ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 No. 1, Mei 2022



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

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 17	No. 1	Halaman 1 - 64	Bandung Mei 2022	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Bijih sinabar terdiseminasi sejajar foliasi (S_1) serta membentuk inklinasi terhadap bidang foliasi (S_2) yang diselimuti (*coated*) oleh limonit, *replacement* pada filit kuarsa-muskovit dengan kedudukan 47°, N122°E difoto ke arah timur laut (Herfien Samalehu, dkk., 2022)

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 1, Mei 2022

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.
Rijal Ahmad Taufik, S.T.
Ernawati, S.I.Pust.
Rahayu Gesang Kami

Editorial Board
Sumardi, S.T., M.M.
Qomariah, S.Kom., M.T.
Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si.
Ir. Prima Muharam Hilman, M.Sc.
Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi
Ir. Asep Suryana
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.
Indra Sukmayana, S.T.

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

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 : http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id

PENGANTAR REDAKSI

Tahun 2022 ini merupakan tahun ke-17 kehadiran Buletin Sumber Daya Geologi kehadapan para pembacanya. Kali ini Buletin Sumber Daya Geologi berisi lima makalah ilmiah yang mengulas tentang mineral, batubara dan panas bumi. Para penulis yang berkontribusi berasal dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Pusat Survey Geologi, Universitas Gadjah Mada, Dinas ESDM Provinsi Maluku, Universitas Indonesia dan PT Geo Dipa Energi (Persero).

Hadir tiga makalah tentang sumber daya mineral antara lain, kajian tentang potensi bauksit, ferit dan unsur tanah jarang pada daerah yang mengalami pelapukan dari batuan berkomposisi felsik. Makalah selanjutnya berupa optimasi valuasi ekonomi nikel yang bertujuan untuk menentukan nilai sekarang bersih maksimum suatu proyek selama umur tambang dengan melakukan estimasi kadar blok berdasarkan interpolasi *inverse distance weighting* (IDW) yang dikombinasikan dengan mempertimbangkan biaya lingkungan dan kebijakan pemerintah seperti pajak, royalti, dan depresiasi. Makalah lainnya tentang mineral berupa tinjauan potensi sinabar dalam batuan metamorf berdasarkan kontrol geologi, karakteristik mineralisasi dan aspek geokimia.

Makalah yang mengulas tentang komoditas batubara berupa kajian hasil identifikasi karakteristik batubara yang ditinjau dari litotipe, cleat dan kilapnya terhadap kedalaman batubara. Objek yang diteliti berupa batubara pada Formasi Dahor yang merupakan batubara berperingkat rendah. Karakteristik litotipe mempunyai kecenderungan semakin dalam kedalaman lapisan batubara, maka kilapnya semakin baik. Frekuensi cleat akan cenderung lebih banyak, jika persentase kilap terangnya besar.

Makalah terakhir berupa kajian tentang pemanfaatan data sumur lapangan panas bumi dengan pemodelan inversi 3-D Magnetotelurik untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dan mendelineasi sistem panas bumi di wilayah tersebut.

Kami mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi dan manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi. Selain itu, ucapan terima kasih disampaikan kepada para Penulis, Editor dan Mitra Bestari atas kontribusinya sehingga Buletin Sumber Daya Geologi selalu hadir untuk para pembaca dengan menyajikan makalah-makalah ilmiah yang berkualitas.

Salam sehat dan selalu semangat,

Dewan Redaksi

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 1, Mei 2022

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

1 - 14 **PEMBENTUKAN BAUKSIT DAN FERIT PADA PROFIL PELAPUKAN DI KABUPATEN LINGGA**
FORMATION OF BAUXITE AND FERRITE IN WEATHERED PROFILES ON LINGGA REGENCY
Oleh : Ronaldo Irzon

15 - 26 **KARAKTERISTIK LITOTIPE DAN HUBUNGANNYA TERHADAP CLEAT BATUBARA DI DAERAH KUALA KUAYAN, KOTAWARINGIN TIMUR, KALIMANTAN TENGAH**
LITHOTYPE CHARACTERISTICS AND THEIR RELATION TO COAL CLEATS IN KUALA KUAYAN AREA, EAST KOTAWARINGIN, CENTRAL KALIMANTAN
Oleh : Muhammad Abdurachman Ibrahim dan Sigit Arso Wibisono

27 - 39 **OPTIMASI VALUASI EKONOMI ENDAPAN NIKEL LATERIT MEMPERHITUNGKAN BIAYA LINGKUNGAN**
OPTIMIZATION OF THE ECONOMIC VALUATION OF LATERITIC NICKEL DEPOSITS CONSIDERING ENVIRONMENTAL COSTS
Oleh : Wahyu Sasongko dan Rheva Dwiky Adhitya

41 - 50 **MINERALISASI ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA KECAMATAN HUAMUAL, KABUPATEN SERAM BAGIAN BARAT, MALUKU**
MINERALIZATION OF CINNABAR DEPOSIT AT TEMBAGA HILL, HUAMUAL DISTRICT, WESTERN SERAM REGENCY, MALUKU
Oleh : Herfien Samalehu, Arifudin Idrus, dan Nugroho Imam Setiawan

51 - 64 **CORRELATION BETWEEN 3-D MAGNETOTELLURIC INVERSION MODEL WITH DRILLING DATA IN PATUHA GEOTHERMAL FIELD**
KORELASI ANTARA PEMODELAN INVERSI 3-D MAGNETOTELLURIK DENGAN DATA SUMUR DI LAPANGAN PANAS BUMI PATUHA
Oleh : Chevy Iskandar and Yunus Daud

ABSTRAK MAKALAH
Oleh : Redaksi

GALERI FOTO
Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH
Oleh : Redaksi

PEMBENTUKAN BAUKSIT DAN FERIT PADA PROFIL PELAPUKAN DI KABUPATEN LINGGA

FORMATION OF BAUXITE AND FERRITE IN WEATHERED PROFILES ON LINGGA REGENCY

Ronaldo Irzon
Pusat Survei Geologi, Badan Geologi
ronaldoirzon18@gmail.com

ABSTRAK

Pelapukan dapat menjadi penyebab pembentukan mineral ekonomis seperti bauksit, ferit, nikel, mangan, dan unsur tanah jarang tipe ion-adsorpsi. Wilayah Kabupaten Lingga berada di sekitar garis Khatulistiwa sehingga beriklim tropis yang rentan terhadap pelapukan. Daerah ini juga terdapat unit-unit batuan yang berumur Paleozoikum dan dekat dengan Sutur Bentong Raub sehingga pelapukan intensif telah lama terjadi. Studi ini bertujuan untuk mengulas karakteristik geokimia hasil pelapukan batuan dan pembentukan deposit mineral terkait pelapukan di Kabupaten Lingga. Seluruh sampel yang dipelajari telah lapuk dengan mengacu pada parameter LOI, CIA, dan IOL. Diagram segitiga SiO_2-Fe_2O_{3T}-Al_2O_3 menunjukkan bahwa ferit maupun bauksit terbentuk pada empat lokasi secara keseluruhan. Kadar Al_2O_3 tertinggi pada bauksit mencapai 60% sedangkan Fe_2O_{3T} tertinggi pada ferit adalah 69%. Rasio La/Y menunjukkan bahwa pelapukan terjadi pada lingkungan basa, sedangkan rasio Al/Ti menjadi dasar kesimpulan bahwa sampel berasal dari batuan felsik. Meskipun UTJ pada profil pelapukan lebih mudah diekstrak daripada dalam batuan beku, kadarnya dalam studi ini kurang menarik untuk dieksploitasi lebih lanjut karena jumlahnya yang berada pada rentang konsentrasi rendah hingga sedang. Studi berikutnya dapat dilakukan dengan mengambil lebih banyak sampel untuk penentuan daerah target eksplorasi.

Kata kunci: bauksit, ferit, Lingga, pelapukan

ABSTRACT

Weathering could stimulate the formation of several economic deposits such as bauxite, ferrite, nickel, manganese, and ion-adsorption type REE. Lingga Regency is situated near the equator with a tropical climate that is vulnerable to weathering. The area is constituted of several Paleozoic rock units and is located near the Bentong-Raub Suture that sustains intensive weathering for a long time. This study aims to describe the geochemical characteristics of weathered rocks and the formation of weathering-related mineral deposits in the Lingga Regency. All samples are weathered based on LOI, CIA, and IOL parameters. The SiO_2-Fe_2O_{3T}-Al_2O_3 triangular diagram shows that ferrite and bauxite are formed in totally four locations. The highest Al_2O_3 concentration of bauxite reaches 60%, while the highest Fe_2O_{3T} of ferrite is 69%. La/Y ratio defines that weathering happened in a basic environment, while Al/Ti ratio concludes that the studied samples are originated from felsic rock. REE in weathering profiles are more extractable than those in igneous rocks, but the composition in this study is not attractive for further exploitation as they are range in low to medium concentrations. Further research is required to quantify bauxite and ferrite resources and reserves in Lingga Regency.

***Keywords**: bauxite, ferrite, Lingga, weathering*

PENDAHULUAN

Pelapukan adalah mekanisme dekomposisi batuan atau mineral yang sebagian besar terjadi di permukaan bumi. Namun demikian proses ini masih dapat terjadi pada kedalaman tertentu terhadap rekahan batuan yang masih memungkinkan adanya penetrasi oksigen dan air permukaan (Hussin dkk., 2015; Gutiérrez and Gutiérrez, 2016; Wang dkk.,2020). Pada prinsipnya terdapat dua jenis pelapukan, yaitu mekanik dan kimia (Lee & Yoon, 2017; Anderson, 2019). Pelapukan mekanik yang juga disebut sebagai pelapukan fisika menyebabkan batuan terpecah tanpa diikuti oleh perubahan komposisi secara signifikan. Pada sisi lain, perubahan kandungan kimia dan kemunculan mineral baru berasosiasi merupakan ciri pelapukan tipe kimia. Laju pelapukan dipengaruhi beragam hal, baik sifat batuan secara internal atau pengaruh lain yang bersifat eksternal. Umur batuan, struktur, tekstur, distribusi pori, permeabilitas, dan komposisi batuan induk merupakan faktor internal. Pada sisi lain, faktor pelapukan yang bersifat eksternal terdiri dari: sirkulasi air, sinar matahari, iklim, angin, pengaruh biogenik, kadar oksigen, dan kelimpahan karbon dioksida (Langman dkk., 2015).

Proses pelapukan kimia terkait erat dengan pembentukan beberapa jenis deposit mineral ekonomis. Mineralisasi bauksit dapat terjadi pada pelapukan batuan induk alkalin, seperti terdapat di Guangxi (Liu dkk., 2016). Pelapukan batuan ultramafik sering berkorelasi dengan keterdapatan deposit tipe nikel laterit (Irzon, 2017; Suryawan dkk., 2019). Batuan induk sufida menjadi sumber pengayaan mangan jenis *supergene*. Kajian mengenai asosiasi pelapukan terhadap deposit mineral tertentu makin menarik karena Unsur Tanah Jarang (UTJ) dapat termobilisasi oleh proses ini. Beberapa penelitian di Asia Tenggara telah mengungkap keterdapatan pengayaan UTJ tipe *ion-adsorption* yang berkorelasi dengan pelapukan (Maulana dkk., 2016; Tohar dan Yunus, 2020).

Beberapa studi terdahulu menegaskan bahwa pelapukan semakin mudah terjadi pada wilayah beriklim tropis-subtropis akibat tingkat curah hujan, kelembaban, dan penetrasi sinar matahari yang baik. Lingga merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Kepulauan Riau dan terletak dekat dengan garis khatulistiwa sehingga beriklim tropis. Pulau Lingga, Pulau Singkep, dan Pulau Selayar merupakan tiga pulau utama pada kabupaten yang memiliki luas wilayah 211,772 km^2 tersebut. Sebagian besar wilayah Kabupaten Lingga diisi oleh batuan berumur Paleozoikum hingga permulaan Mesozoikum sehingga telah lama mengalami proses degradasi. Keterdapatan Sutur Bentong-Raub sebagai garis imajiner batas kolisi lempeng Indochina-East Malaya dan lempeng Sibumasu semakin memperbesar derajat pelapukan di sana.

Mamengko (2013) mengulas kemungkinan pembentukan bauksit pada empat pulau di Kabupaten Lingga tanpa menyertakan data geokimia unsur jejak maupun UTJ. Penelitian lebih rinci dengan menyertakan oksida utama, unsur jejak dan UTJ di Kabupaten Lingga telah dilaksanakan, namun terfokus pada sampel limbah pencucian di Pulau Selayar (Irzon, 2018). Studi ini bertujuan untuk mengulas karakteristik geokimia hasil pelapukan batuan terhadap pembentukan deposit mineral pada beberapa lokasi di Kabupaten Lingga. Hasil penelitian bermanfaat bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan lainnya mengenai pemilihan target eksplorasi sumber daya alam di sana.

METODOLOGI

Sampel pada studi ini adalah hasil pelapukan batuan di Kabupaten Lingga dari beberapa jenis batuan induk. Dua sampel yang diambil dari Pulau Lingga, yaitu BX 28 dan BX 82 A berada dalam domain Formasi Pancur yang berumur Kapur. BX 28 berlokasi tidak jauh sebelum pelabuhan Sungai Tenam dari horizon berwarna merah pucat yang diduga

berkadar besi tinggi (Gambar 1a), sedangkan BX 82 A berada di Desa Mentoda berwarna merah kecoklatan. Satu lokasi bekas galian pada wilayah Granit Muncung dijumpai di Penuba, utara Pulau Selayar. Lokasi tersebut diperkirakan sebagai salah satu deposit bauksit karena juga berada pada wilayah Granit Muncung dan berlokasi sekitar 3 km dari penelitian sebelumnya mengenai limbah bauksit (Irzon, 2018). BX 68 D adalah sampel batuan dari Pulau Selayar yang coklat kemerahan dengan beberapa bagian telah menjadi lempung pasiran.

Kenampakan stasiun BX 53 (Gambar 1b) di Pulau Singkep mirip dengan lokasi BX 28 di Pulau Lingga yang berupa profil pelapukan dengan keterdapatan horizon berwarna merah pucat. Perbedaannya adalah bahwa sampel BX 53 A diperkirakan sebagai lapukan batuan dari Kompleks Malihan Persing, sedangkan BX 28 dari Formasi Pancur. Sebuah profil pelapukan dengan dua horizon yang dapat dibedakan secara megaskopis dapat diamati di Marok Tua pada lokasi BX 57. Sampel BX 57A diambil dari horizon laterit berwarna kemerahan dari lokasi ini, sedangkan BX 57 D diperoleh dari horizon diatasnya dengan warna lebih kehitaman. Meskipun BX 57 D berasal dari horizon paling atas, namun tidak terdapat adanya tetumbuhan seperti layaknya horizon soil. Selain itu, granul bauksit (sampel BX 57 B) juga diperoleh pada lokasi tersebut seperti tampak pada Gambar 1c. Sketsa kondisi lapangan pada stasiun BX 57 dapat diamati pada Gambar 2.



(a)

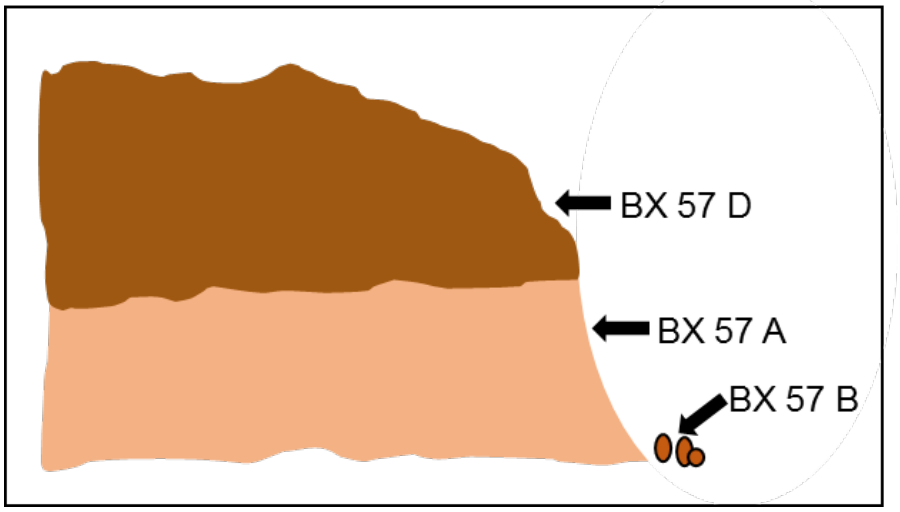


(b)



(c)

Gambar 1. Keadaan lapangan pada studi ini:
a) keadaan stasiun BX 28 dengan horizon pelapukan berwarna merah pucat;
b) warna horizon pelapukan pada lokasi BX 53 mirip dengan BX 28; dan
c) granul bauksit dari daerah Marok Tua



Gambar 2. Sketsa keadaan lapangan pada stasiun BX 57 di Pulau Karimun

Studi lapangan diperlukan untuk mendata keadaan setiap singkapan secara megaskopis dan fenomena lain yang terkait dengan batuan induk maupun horizon pelapukan. Sampel yang diperiksa bukan batuan beku sehingga perlu kehati-hatian dalam pengambilan maupun pengemasannya agar terjamin homogen. Setelah tiba di laboratorium, sampel tidak perlu melalui tahap pencucian untuk menghindari pelepasan bagian sampel yang mengganggu validitas data. Sampel dikeringkan dibawah terik matahari setidaknya selama satu hari kerja. Sampel kemudian digerus hingga mendapatkan besar butir 200 *mesh* dan disimpan dalam wadah berbahan plastik. Wadah berbahan logam harus dihindari karena dapat mengganggu homogenitas sampel di dalamnya.

Kelimpahan oksida utama pada setiap sample diperiksa menggunakan perangkat *X-Ray Fluoresence* (XRF) sedangkan kadar unsur jejak dan unsur tanah jarang dianalisis dengan *Inductively couple plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS). Untuk preparasi XRF, studi ini mengadaptasi metode *pressed pellet* selain *glass disk* yang rentan terhadap keterdapatan pengotor (Irzon dkk., 2019). Studi ini mengadaptasi teknik pelarutan asam sebelum sampel dianalisis dengan perangkat ICP-MS. Dua buah *certified material standard* telah dipreparasi dan diukur dengan proses yang sama dengan sampel untuk verifikasi hasil analisis. Prosedur preparasi hingga pengujian kimia XRF dan ICP-MS mengadaptasi penelitian sebelumnya (Takahashi, 2015; Irzon dkk., 2021). *Loss on ignition* (LOI) diperiksa dengan membandingkan berat sampel setelah dan sebelum dibakar pada temperatur 300^{o}C (Irzon dan Abdullah, 2018).

Selain berdasarkan LOI, beberapa parameter telah dikembangkan dalam penentuan derajat pelapukan dengan mengacu kepada komposisi kimia, seperti CIA (*Chemical Index of Alteration*), PIA (*Plagioclase Index of Alteration*), CALMAG (*flux of calcium and magnesium*), dan IOL (*Index of Lateritization*). Indeks CIA dan IOL yang telah digunakan pada beberapa penelitian sebelumnya (Ferdous and Farazi, 2016; Mohanty dkk., 2016; Gebru dkk., 2020; Barry dkk, 2021) juga diadaptasi pada studi ini. CIA dihitung berdasarkan persamaan (1), sedangkan IOL diketahui melalui persamaan (2) sebagai berikut:

$$CIA = Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO^*+Na_2O+K_2O)\times 100 \quad \ldots\ldots .1)$$
$$IOL = (Al_2O_3+Fe_2O_{3T})/(SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_{3T})\times 100 \ldots 2)$$

CaO* pada persamaan (1) adalah jumlah CaO yang terdapat pada fraksi silika dari sampel dan dikalkulasi menurut persamaan (3), yaitu:

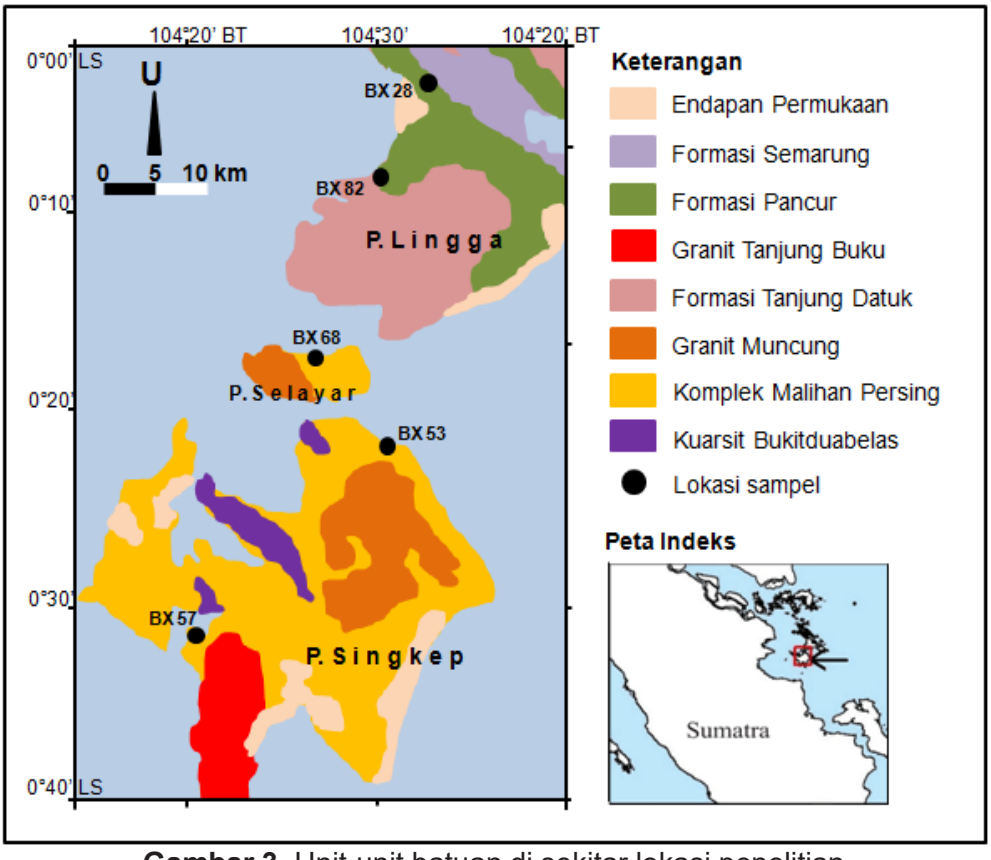
$$CaO^* = CaO - (10/3*(P_2O_5)) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

GEOLOGI

Daerah studi merupakan bagian dari Peta Geologi Lembar Dabo Skala 1:250.000 (Sutisna dkk., 1994). Unit batuan yang tersingkap di Pulau Lingga terdiri dari Formasi Tanjung Datuk, Formasi Pancur, Formasi Semarung, dan endapan Kuarter. Kuarsit Bukitduabelas, Kompleks Malihan Persing, Granit Muncung, Granit Tanjung Buku, Formasi Pancur, Formasi Semarung, dan endapan Kuarter dapat dijumpai di Pulau Singkep. Geologi Pulau Selayar relatif lebih sederhana dari dua pulau sebelumnya karena hanya terdiri dari Komplek Malihan Persing dan Granit Muncung (Gambar 3).

Formasi Tanjung Datuk terendapkan ketika Jura dan terdiri dari batupasir malih, batulempung malih, serta batulanau malih. Formasi ini hanya tersingkap di bagian baratdaya Pulau Lingga. Setelah Formasi Pancur yang terdiri dari serpih merah dengan sisipan batupasir merah dan konglomerat telah selesai tersedimentasi pada waktu Kapur, Formasi Semarung yang tersusun dari batupasir arkosa dengan sisipan batulempung terendapkan diatasnya (Sutisna dkk., 1994). Endapan Kuarter di Pulau Lingga terdiri dari Endapan Rawa, sedangkan di Pulau Singkep juga dilengkapi dengan Aluvium.

Kuarsit Bukitduabelas dan Kompleks Malihan Persing merupakan dua unit batuan ubahan berumur Perem di Pulau Singkep. Kuarsit Bukitduabelas terdiri dari kuarsit dengan sisipan filit dan batusabak, sedangkan Komplek Malihan Persing dibangun oleh filit, batusabak, dan sekis grafit. Terdapat dua buah batuan intrusi di Singkep, yaitu Granit Muncung yang berumur Trias dan Granit Tanjungbuku yang berumur Jura. Granit Muncung tersingkap di bagian timur laut Pulau Singkep, sedangkan Granit Tanjungbuku di wilayah barat dayanya. Kondisi geologi daerah penelitian dapat diamati pada Gambar 3.



Gambar 3. Unit-unit batuan di sekitar lokasi penelitian dan titik pengambilan sampel (sumber: Sutisna dkk., 1994)

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Oksida besi dan aluminium (Fe_2O_{3T} dan Al_2O_3) merupakan oksida utama berkelimpahan terbesar pada sampel yaitu masing-masing pada rentang 0,88-69,42% dan 8,23-57,36% secara berurutan. Seluruh sampel sudah lapuk lanjut yang dikonfirmasi oleh rendahnya kadar SiO_2 (7,68-18,17%) dan tingginya LOI (11,44%-23,92%). Oksida utama lainnya berkelimpahan minor dengan rerata <1%. Suatu sampel batuan dianggap telah lapuk dengan kadar LOI>2% (Irzon et al., 2020; Saputro dkk., 2020; Irzon et al., 2021). Berdasarkan acuan tersebut maka seluruh sampel pada studi ini telah mengalami pelapukan dengan rentang LOI 11,40% hingga 23,92%. Hasil analisis geokimia terlampir pada Tabel 1.

Sampel dengan nilai CIA 80-100 merepresentasikan tingkat pelapukan kuat, 50-60 sebagai pelapukan menengah, dan <50 sebagai batuan yang relatif segar (Irzon dkk., 2019; Gebru dkk., 2020). Batuan yang dianggap segar, lapuk sedang, dan lapuk kuat berada dalam rentang IOL <40, 41-85, dan 85, secara berurutan (Campodonico dkk., 2019). CIA seluruh sampel pada penelitian ini berada pada rentang 82,94-99,23 sehingga disimpulkan telah mengalami pelapukan yang kuat. Lebih jauh, indeks IOL lebih mendetilkan tingkat pelapukan pada sampel dimana hanya tiga sampel berkategori lapuk lanjut berdasarkan parameter ini, yaitu BX 28, BX 57A, dan BX 57 B.

Tabel 1. Komposisi oksida utama, unsur jarang, dan UTJ pada profil pelapukan yang diteliti dari Kabupaten Lingga

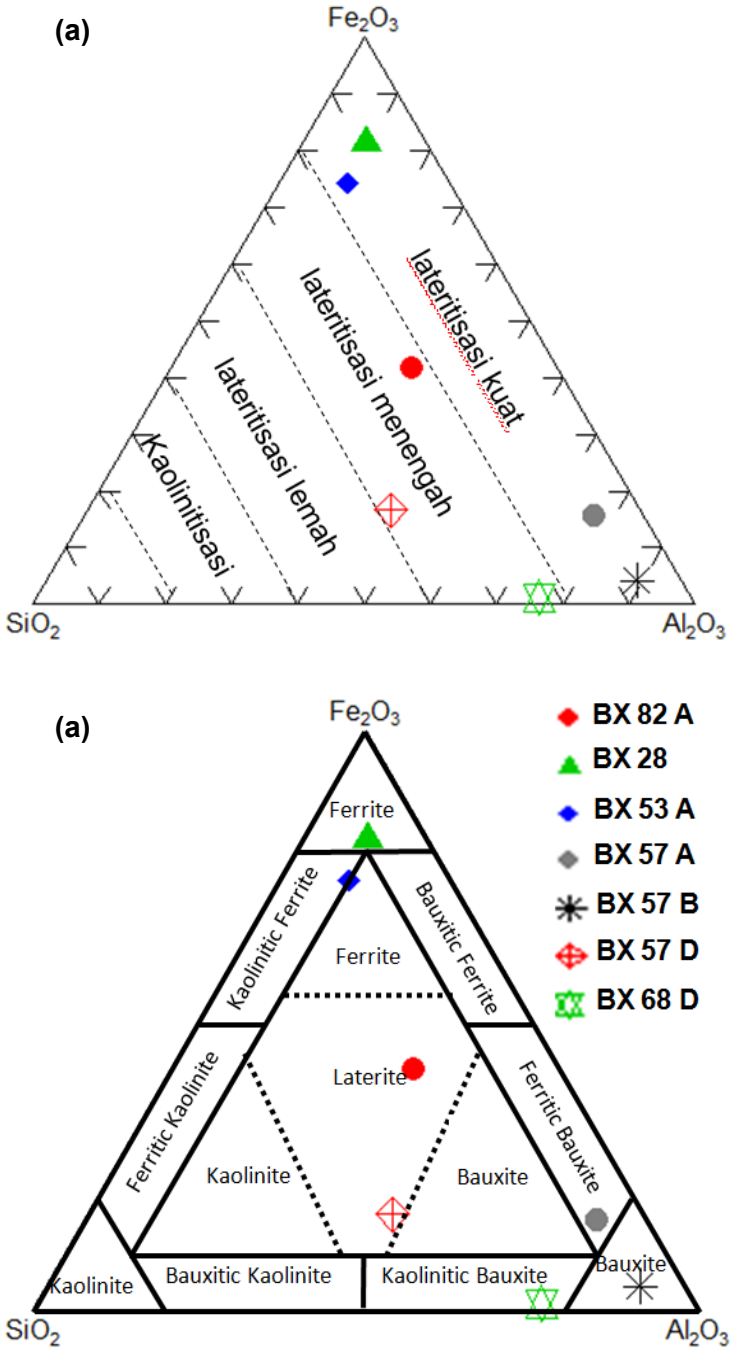
	BX 28	BX 53 A	BX 57 A	BX 57 B	BX 57 D	BX 68 D	BX 82
Oksida utama (%)							
SiO_2	7,68	13,18	5,05	4,57	28,05	17,37	18,17
TiO_2	0,217	0,23	1,25	1,14	1,47	1,36	0,50
Al_2O_3	8,23	9,09	53,77	60,74	35,35	57,36	30,22
Fe_2O_{3T}	69,42	64,11	10,95	2,88	12,01	0,88	34,66
MnO	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
CaO	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
MgO	0,06	0,17	0,08	0,08	0,07	0,08	0,05
Na_2O	0,27	0,14	0,14	0,14	0,24	0,14	0,21
K_2O	0,73	0,57	0,11	0,01	0,02	0,02	0,01
P_2O_5	0,81	0,87	0,11	0,04	0,08	0,01	0,02
SO_3	0,06	0,09	0,09	0,04	0,11	0,02	0,15
LOI	12,26	11,44	28,3	30,34	22,46	23,92	15,76
Unsur Jejak dan Unsur Tanah Jarang (ppm)							
Li	28,81	5,61	0,61	2,41	0,74	10,46	0,89
Be	2,33	21,18	0,33	1,16	0,59	0,83	0,78
Sc	14,12	16,95	9,35	25,94	18,85	1,89	26,03
V	83,97	63,07	121,88	175,78	149,82	10,93	255,42
Rb	85,54	22,65	1,78	1,95	8,43	13,67	0,76

	BX 28	BX 53 A	BX 57 A	BX 57 B	BX 57 D	BX 68 D	BX 82
Sr	143,64	8,88	6,13	14,47	2,67	1,07	5,97
Y	24,05	14,32	3,03	5,55	1,43	2,59	1,92
Ba	343,20	56,58	18,52	43,96	20,64	4,78	7,24
La	31,76	6,42	7,74	21,17	1,60	4,55	9,26
Ce	59,81	9,35	14,86	25,22	5,73	15,56	16,82
Pr	7,34	1,32	1,31	3,18	0,25	0,76	1,64
Nd	30,01	4,89	4,69	9,82	0,88	2,41	5,42
Sm	6,94	1,40	1,02	1,78	0,40	0,60	1,17
Eu	1,33	0,32	0,18	0,40	0,13	0,05	0,58
Gd	6,97	1,74	0,77	1,31	0,36	0,57	0,80
Tb	0,96	0,34	0,14	0,21	0,09	0,12	0,15
Dy	5,53	2,12	0,75	1,13	0,60	0,70	0,84
Ho	1,06	0,45	0,14	0,21	0,12	0,15	0,18
Er	2,96	1,26	0,37	0,55	0,32	0,50	0,49
Tm	0,41	0,21	0,07	0,09	0,06	0,09	0,09
Yb	2,66	1,31	0,40	0,63	0,43	0,68	0,68
Lu	0,38	0,19	0,06	0,10	0,06	0,13	0,10
Th	12,64	6,45	31,98	31,86	26,71	23,23	26,16
U	3,06	2,81	9,96	4,41	8,11	2,64	3,79
∑UTJ	*158,11*	*31,34*	*32,51*	*65,80*	*11,03*	*26,86*	*38,21*
CIA	*82,94*	*89,52*	*98,96*	*99,23*	*97,71*	*99,16*	*97,73*
IOL	*91,00*	*84,74*	*92,76*	*93,30*	*62,51*	*77,03*	*78,12*
La/Y	*1,32*	*0,45*	*2,56*	*3,81*	*1,12*	*1,75*	*4,82*
Al/Ti	*33,49*	*34,60*	*37,99*	*47,05*	*21,24*	*37,24*	*53,16*

PEMBAHASAN

Pembentukan Bauksit dan Ferit

Studi terdahulu menyimpulkan bahwa peningkatan intensitas pelapukan ditandai dengan penurunan kadar SiO_2 dan kenaikan kadar Al_2O_3 maupun Fe_2O_{3T} (Chen dkk., 2018). Perbandingan ketiga oksida tersebut dapat digunakan untuk mengetahui pembentukan kaolinit dan tingkat lateritisasi. Diagram segitiga SiO_2, Al_2O_3, dan Fe_2O_{3T} menunjukkan bahwa seluruh sampel yang dipelajari telah mengalami pelapukan tingkat menengah hingga kuat seperti dapat diperhatikan pada Gambar 4a. Kemudian, komparasi kelimpahan tiga oksida tersebut juga telah dijadikan dasar oleh Aleva dkk (1994) dalam penentuan pembentukan kaolin, bauksit, dan ferit pada horizon pelapukan. Berdasarkan diagram tersebut maka seluruh sampel dari Marok tua (BX 57B, BX 57A, dan BX 57 D) dan sampel dari Selayar (BX 68 D) telah terbauksitisasi. Pada sisi lain, BX 28 dan BX 53 justru mengalami pengayaan ferit. Satu sampel lain dikatergorikan sebagai laterit tanpa dominasi bauksit maupun ferit yang signifikan (Gambar 4b).



Gambar 4. a) Diagram segitiga SiO_2-Fe_2O_{3T}-Al_2O_3 dalam penentuan tingkat pelapukan; b) Diagram segitiga SiO_2-Fe_2O_{3T}-Al_2O_3 untuk membedakan pembentukan kaolinit, ferit, atau bauksit (sumber: Aleva (1994))

Selama proses pelapukan dan pembentukan lapisan tanah (pedogenesis) unsur-unsur seperti Ti, Al, Zr, Hf, Th, Nb, and REEs bersifat *immobile*. Pada sisi lain, Fe, Mn, Na, K, Ca, dan Mg dapat terpisahkan bahkan hilang akibat erosi maupun sedimentasi (Sahoo dkk, 2015; 2017; Liu dkk., 2016). Oleh sebab itu, beberapa rasio kimia dimanfaatkan untuk menelusuri lebih jauh mengenai kondisi lingkungan pelapukan maupun menelusuri sifat batuan asalnya. Nilai La/Y<1 merupakan indikasi pelapukan yang berlangsung kondisi asam, sedangkan La/Y>1 adalah petunjuk lingkungan basa (Sinisi, 2018; Gebru dkk., 2020). Nilai La/Y

pada sampel dari Kabupaten Lingga cukup tinggi, yaitu dengan rerata 2,26. Oleh sebab itu, hampir seluruh sampel pada studi ini disimpulkan terbentuk pada kondisi lingkungan basa kecuali BX 53 A. Kemudian, rasio Al/Ti 3-11, 11-21, dan 21-70 adalah pertanda bahwa hasil pelapukan berasal dari batuan mafik, intermediate, dan felsik secara berurutan (Moraes dkk., 2020; Öztürk dkk., 2021). Rasio Al/Ti pada sampel dalam penelitian ini berada pada rentang 21,24-47,05 sehingga seluruh sampel dianggap sebagai hasil pelapukan batuan yang bersifat felsik.

Stasiun BX 57 pada studi adalah satu-satunya lokasi studi yang terdiri dari tiga sampel sehingga menarik untuk diperbandingkan komposisi kimianya. Perubahan kadar Al_2O_3 pada tiga sampel dari stasiun ini berbanding terbalik dengan komposisi SiO_2, namun berbanding lurus dengan nilai tiga parameter tingkat pelapukan pada studi ini (LOI, CIA, dan IOL). Kemudian, kenaikan kadar Al_2O_3 disertai dengan penurunan kadar Fe_2O_{3T}. Fakta-fakta tersebut sesuai dengan penelitian sebelumnya mengenai profil bauksit (Chen dkk., 2018).

Prospeksi Bauksit dan Ferit

Kabupaten Lingga, terutama di Kecamatan Singkep Barat dan Kecamatan Lingga, merupakan wilayah kaya bauksit dengan jumlah cadangan logam terbukti mencapai >50 juta ton. Beberapa lokasi cadangan logam bauksit terbukti di Pulau Lingga ditampilkan pada Tabel 2. Berdasarkan komposisinya, bauksit dengan kandungan Al_2O_3>45%, Fe_2O_{3T}<20%, dan SiO_2<5% disimpulkan layak dijadikan sumber untuk industri aluminium (Sidibe dan Yalcin, 2019). Deposit di Maroktua (57 B) sesuai dengan karakter tersebut dengan kelimpahan Al_2O_3, Fe_2O_{3T}, dan SiO_2 masing-masing adalah 60,74%, 2,88%, dan 4,57% secara berurutan. Kadar Al_2O_3 (57,36%) sampel dari Selayar sudah memenuhi kriteria, namun komposisi SiO_2 (17,37%) masih tinggi sehingga diperlukan tahap prakonsentrasi sebelum dapat diolah lebih lanjut dalam industri alumina. Teknik penyaringan, pencucian, separasi magnetik, dan penggunaan mikroba dapat menjadi opsi untuk menurunkan kadar silika pada bauksit (Kusrini dkk., 2020).

Ferit adalah material kaya besi sehingga memiliki ragam manfaat. Ferit dibutuhkan dalam pembuatan generator dan kendaraan elektrik karena karakter ferit sebagai magnet permanen. Pada frekuensi sangat tinggi (>500 MHz), ferit menyebabkan efek *nonreciprocal* sehingga menjadi krusial dalam sistem telekomunikasi dunia (Mezher dkk., 2020). Kodar oksida besi pada deposit di Lingga berada dalam level menengah dengan rentang 64%-69%. Komposisi ini lebih rendah daripada penambangan besi di Lhoong (Aceh) maupun pasir besi di Tanjung Bayang (Sulawesi Selatan) dengan komposisi Fe_2O_{3T} 93,88% dan 79,56% secara berurutan (Rahwanto dkk., 2013; Tiwow dkk., 2018), namun hampir sama dengan pasir besi di Labuhan Haji (Aceh) yang berkadar 68% (Purnawan dkk., 2018).

Tabel 2. Beberapa lokasi cadangan logam bauksit terbukti di Kabupaten Lingga

No.	Lokasi	Kecamatan	Nama Perusahaan	Cadangan Logam Bauksit (ton)
1.	Pulau Bendahara	Singkep Barat	PT Sumber Prima Lestari	4.240.697
2.	Tinjul	Singkep Barat	PT Telaga Bintan Jaya	7.465.568
3.	Sei Harapan	Lingga	PT Telaga Bintan Jaya	4.119.399
4.	Langkap	Singkep Barat	PT Telaga Bintan Jaya	24.983.771
5.	Duara	Lingga	PT Sanmas Mekar Abadi	6.221.967
6.	Sekanah	Lingga	PT Sanmas Mekar Abadi	3.444.872
	J u m l a h			**50.476.273**

Sumber: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (2020)

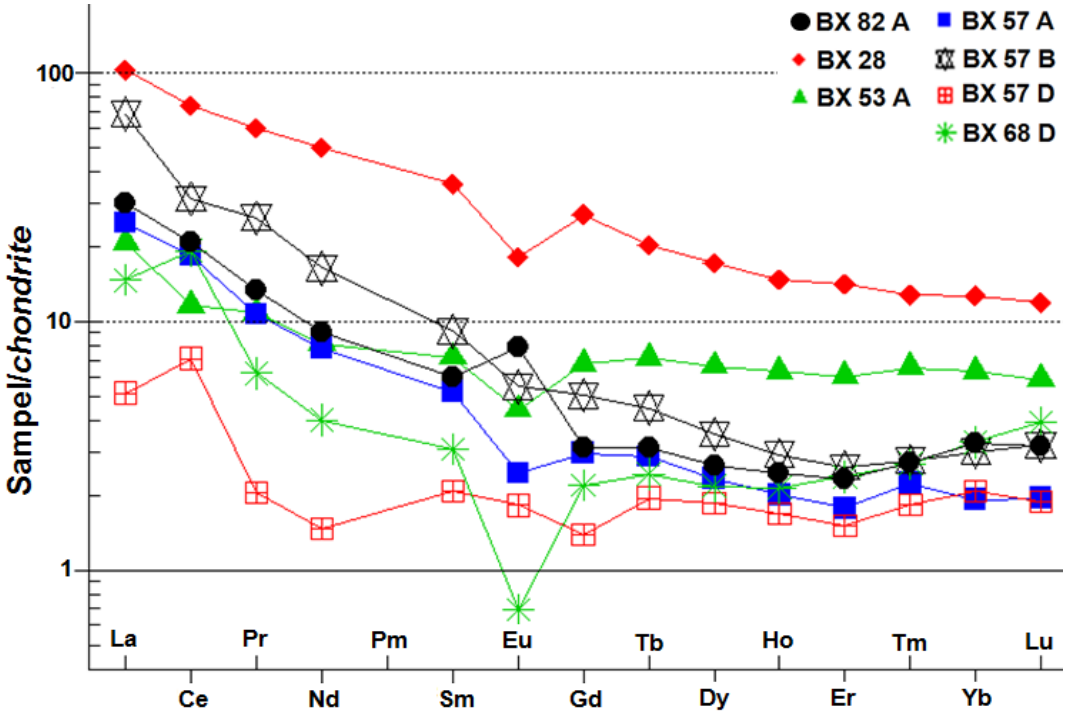
Kelimpahan Unsur Tanah Jarang

Kebutuhan mengenai unsur tanah jarang semakin meningkat karena kelompok elemen tersebut sangat krusial dalam teknologi modern. UTJ terdapat dalam jenis batuan beku, sedimen, maupun metamorf. UTJ dianggap dapat terkayakan melalui proses adsorpsi ion (*ion-adsorption*) pada pelapukan batuan beku yang relatif tinggi UTJ di wilayah tropis (Chen dkk., 2018; Gebru dkk., 2020; Ozturk dkk., 2021). Karena daerah studi berada dalam wilayah tropis, maka kemungkinan terjadinya pengayaan UTJ akibat pelapukan menarik untuk diteliti. Komposisi UTJ pada sampel berada dalam level rendah hingga moderat yaitu pada rentang 31 ppm hingga 158 ppm. Cerium, lantanum, dan neodinium adalah tiga unsur UTJ dengan kelimpahan terbesar dengan rerata masing-masing 25,39 ppm, 12,99 ppm, dan 10,68 ppm secara berurutan (Tabel 1). Dengan demikian kadar UTJ pada lokasi studi kurang prospektif untuk dipelajari lebih lanjut kecuali pada profil pembentukan ferit pada lokasi BX 28. Lonjakan komposisi UTJ pada stasiun tersebut dapat disebabkan oleh tingginya asosiasi kelompok unsur tersebut terhadap besi (Fe).

Kelimpahan UTJ pada sampel dinormalisasi terhadap komposisi kondrit (Boynton, 1984) untuk mengeliminasi efek Oddo-Harkins sehingga dapat dipelajari polanya. Jumlah UTJ pada setiap sampel berada pada 0,7 hingga 100 kali kadar *chondrite* (Gambar 5). Secara umum, sampel dari Kabupaten Lingga menunjukkan tren kemiringan curam pada kenaikan nomor atom dari UTJ-ringan. Pada sisi lain, hasil normalisasi menunjukkan bahwa UTJ-berat cenderung landai (Gambar 5). Anomali Ce positif terdapat pada dua sampel, yaitu 57 D dan 68 D, sedangkan sampel lain relatif tanpa anomali signifikan. Kebanyakan sampel terindikasi dengan anomali Eu negatif, dua sampel relatif tanpa anomali, dan satu sampel dengan anomali Eu positif (BX 82). Pelapukan menyebabkan proses mobilisasi elemen-elemen pada kelompok REE dengan koefisien yang berbeda. Anomali Ce positif disebabkan oleh immobilitas Ce^{4+} sedangkan elemen UTJ lain telah berpindah ke horizon di atas maupun di bawahnya (Gebru dkk., 2020). Plagioklas disebut sebagai mineral utama yang berasosiasi dengan anomali Eu. Sampel dengan anomali Eu negatif menunjukkan bahwa sampel tersebut berasal dari sumber yang minim plagioklas atau telah mengalami pengurangan plagioklas selama pembentukannya seperti diperlihatkan oleh hampir seluruh sampel (Gambar 5). Pada sisi lain, anomali Eu positif pada BX 82 terjadi akibat pemisahan unsur tersebut dari kelompok Eu lainnya sehingga tertinggal pada salah satu horizon pelapukan (Gebru dkk., 2020; Ozturk dkk., 2021).

KESIMPULAN

Seluruh sampel berkategori lapuk berdasarkan nilai LOI, CIA, dan IOL. Proses pelapukan pada dua lokasi studi terindikasi membentuk ferit dengan kadar Fe_2O_{3T} 64%-69%. Deposit bauksit dengan kadar Al_2O_3>55% dijumpai pada dua stasiun pengamatan. Hampir seluruh sampel terlapukkan pada kondisi lingkungan basa berdasarkan rasio La/Y. Sampel pada studi ini disimpulkan berasal dari batuan felsik berdasarkan rentang rasio Al/Ti yang tinggi. Jumlah UTJ berada dalam kadar rendah hingga menengah (maksimal 158 ppm) sehingga bukan hal yang menarik untuk dieksploitasi lebih lanjut. Penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan mengambil lebih banyak sampel untuk penentuan daerah target eksplorasi.



Gambar 5. Diagram laba-laba UTJ setiap sampel pada studi ini setelah dinormalisasi terhadap komposisi kondrit (Boynton, 1984)

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Survei Geologi atas bantuannya dalam penyelesaian tulisan ini. Apresiasi ditujukan atas kontribusi Bapak Profesor Handan Z. Abidin dan Bapak Baharuddin atas masukannya mengenai geologi dan pertambangan. Bapak Kurnia dan Ibu Erna telah membantu penulis mengawasi standar mutu analisis laboratorium dalam studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Aleva, G.J.J., 1994. *Laterites: Concepts, Geology, Morphology and Chemistry*. Wageningen, *Netherlands: International Soil Reference and Information Centre* (ISRIC).

Anderson, S.P., 2019. *Breaking it down: mechanical processes in the weathering engine. Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 15(4), pp.247-252.

Barry, A.D., Cissé, M., Parfait, M.M. and Hallarou, M.M., 2021. *Mineralogical and Geochemical Characteristics of the Sangarédi Bauxite Deposit, Boké Region, Republic of Guinea*. *Environmental and Earth Sciences Research Journal*, 8(1), pp.11-22.

Boynton, W.V., 1984. *Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In Developments in geochemistry* (Vol. 2, pp. 63-114). Elsevier.

Campodonico, V.A., Pasquini, A.I., Lecomte, K.L., García, M.G. and Depetris, P.J., 2019. *Chemical weathering in subtropical basalt-derived laterites: A mass balance interpretation* (Misiones, NE Argentina). *Catena*, 173, pp.352-366..

Chen, J., Wang, Q., Zhang, Q., Carranza, E.J.M. and Wang, J., 2018. *Mineralogical and geochemical investigations on the iron-rich gibbsitic bauxite in Yongjiang basin, SW China*. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, pp.413-426.

Ferdous, N. and Farazi, A.H., 2016. *Geochemistry of Tertiary sandstones from southwest Sarawak, Malaysia: implications for provenance and tectonic setting*. *Acta Geochimica*, 35(3), pp.294-308.

Gebru, Y., Gidey, T., Gebresilassie, B. and Hadgu, T., 2020. *Mineralogical and geochemical characteristics of the iron–duricrust deposit in Adi-Daero area, northwestern Tigray, Ethiopia: implication for the origin and controlling factors*. *Applied Earth Science*, 129(4), pp.231-247.

Gutiérrez, F. and Gutiérrez, M., 2016. *Granite Landforms*. *In Landforms of the Earth* (pp. 103-109). Springer, Cham.

Hussin, H., Jamaluddin, T.A. and Deraman, M.F., 2015. *Mode of Slope Failure of Moderately to Completely Weathered Metasedimentary Rock at Bukit Panji, Chendering*, *Kuala Terengganu*. *Journal of Tropical Resources and Sustainable Science*, 3, pp.5-12.

Irzon, R., 2017. Pengayaan Logam Berat Mn, Co, dan Cr pada Laterit Nikel di Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Buletin Sumber Daya Geologi, 12(2), pp.71-86.

Irzon, R., 2018. Limbah Pencucian Bauksit Sebagai Sumber Unsur Tanah Jarang Potensial; Studi Kasus Pulau Selayar, Provinsi Kepulauan Riau. Buletin Sumber Daya Geologi, 13(1), pp.45-57.

Irzon, R. and Abdullah, B., 2018. *Element mobilization during weathering process of ultramafic complex in North Konawe Regency, Southeast Sulawesi based on a profile from Asera*. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), pp.277-290.

Irzon, R., Kurnia, K., Sendjaja, P., Harisaputra, D. and Baharuddin, B., 2019. Pengaruh Pelapukan Terhadap Kadar Platina dan Paladium Nikel Laterit Konawe Utara. Jurnal Teknologi Mineral *dan Batubara*, 15(2), pp.97-108.

Irzon, R., Syafri, I., Ghani, A.A., Prabowo, A., Hutabarat, J. and Sendjaja, P., 2020. *Petrography and geochemistry of the Pinkish Lagoi Granite, Bintan Island: Implication to magmatic differentiation, classification, and tectonic history*. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 69, pp.27 – 37.

Irzon, R., Syafri, I., Suwarna, N., Hutabarat, J., Sendjaja, P. and Setiawan, V.E., 2021. *Geochemistry of plutons in central Sumatra and their correlation to Southeast Asia tectonic history*. *Geologica Acta*, 19, pp.1-III.

Kusrini, E., Trisko, N., Harjanto, S., Rahman, A. and Usman, A., 2020. *Optimizing Extraction and Enrichment of Lanthanide from Indonesian Low Grade Bauxite Using Sequential Magnetic Separation, Acid Leaching, and Precipitation Processes*. *Engineering Journal*, 24(4), pp.327-337.

Langman, J.B., Blowes, D.W., Sinclair, S.A., Krentz, A., Amos, R.T., Smith, L.J., Pham, H.N., Sego, D.C. and Smith, L., 2015. *Early evolution of weathering and sulfide depletion of a low-sulfur, granitic, waste rock in an Arctic climate: a laboratory and field site comparison*. *Journal of Geochemical Exploration*, 156, pp.61-71.

Lee, J.S. and Yoon, H.K., 2017. *Characterization of rock weathering using elastic waves: A Laboratory-scale experimental study*. *Journal of Applied Geophysics*, 140, pp.24-33.

Liu, X., Wang, Q., Zhang, Q., Zhang, Y. and Li, Y., 2016. *Genesis of REE minerals in the karstic bauxite in western Guangxi, China, and its constraints on the deposit formation conditions*. *Ore Geology Reviews*, 75, pp.100-115.

Mamengko, D.V., 2013. Potensi Bauksit di Kabupaten Lingga Provinsi Kepulauan Riau. Istech, 5(2), pp.66-70.

Maulana, A., Sanematsu, K. and Sakakibara, M., 2016. *An overview on the possibility of scandium and REE occurrence in Sulawesi, Indonesia*. *Indonesian Journal on Geoscience*, 3(2), pp.139-147.

Mezher, S.J., Kadhim, K.J., Abdulmunem, O.M. and Mejbel, M.K., 2020. *Microwave properties of Mg–Zn ferrite deposited by the thermal evaporation technique*. *Vacuum*, 173 , p.109114.

Mohanty, B., Gupta, A. and Das, B.S., 2016. *Estimation of weathering indices using spectral reflectance over visible to mid-infrared region*. *Geoderma*, 266, pp.111-119.

Moraes, A.M., Sahoo, P.K., Guimarães, J.T.F., Leite, A.S., Salomão, G.N., Souza-Filho, P.W.M., Júniora, W.N. and Dall'Agnol, R., 2020. *Multivariate statistics and geochemical approaches for understanding source-sink relationship-a case study from close-basin lakes in Southeast Amazon*. *Journal of South American Earth Sciences*, 99, p.102497.

Ozturk, H., Hanilci, N., Cansu, Z. and Kasapci, C., 2021. *Formation of Ti-rich bauxite from alkali basalt in continental margin carbonates, Payas region, SE Turkey: implications for sea level change in the Upper Cretaceous*. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 30(1), pp.116-141.

Purnawan, S., Azizah, A., Jalil, Z. and Zaki, M., 2018. Karakteristik Sedimen dan Kandungan Mineral Pasir Besi di Labuhan Haji Timur, Kabupaten Aceh Selatan. Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan, 13(2), pp.110-119.

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2020. Laporan Data Neraca Sumber Daya dan Cadangan Mineral Tahun 2020.

Rahwanto, A., Yahya, M. and Jalil, Z., 2013. *Magnetic behavior of natural Fe_2O_3 from Lhoong iron ore mining area, Aceh Province, Indonesia*. *Journal of Mining*, *2013*.

Sahoo, P.K., Guimarães, J.T.F., Souza-Filho, P.W.M., da Silva, M.S., Júnior, W.N., Powell, M.A., ... & Costa, V.E., 2017. *Geochemical characterization of the largest upland lake of the Brazilian Amazonia: Impact of provenance and processes*. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, p.541-558.

Saputro, S.P., Purwaningsih, D.R. and Priadi, B., 2020. Peralihan Rezim Tektonik: Implikasinya pada Konsentrasi Torium di Mamasa dan Tana Toraja, Sulawesi-Indonesia. *Eksplorium*, 41(2), pp.87–100.

Sidibe, M. and Yalcin, M.G., 2019. *Petrography, mineralogy, geochemistry and genesis of the Balaya bauxite deposits in Kindia region, Maritime Guinea, West Africa*. *Journal of African Earth Sciences*, 149, pp.348-366.

Sinisi, R., 2018. *Mineralogical and geochemical features of Cretaceous bauxite from San Giovanni Rotondo (Apulia, Southern Italy): A provenance tool*. *Minerals*, 8(12), p.567.

Suryawan, E.H., Hilyah, A., Fajar, M.H.M. and Pajrin, A., 2019. Identifikasi Dan Penentuan Volume Endapan Nikel Laterit Berdasarkan Data Geolistrik Metode Sounding Studi Kasus Blok Selatan Daerah Pomalaa, Sulawesi Tenggara. Jurnal Geosaintek, 5(2), pp.53-60.

Sutisna, K., Burhan, G. and Hermato, B., 1994. Peta Geologi Lembar Dabo Sumatera Skala 1: 250.000. Pustlitbang Geologi Bandung.

Takahashi, G., 2015. *Sample Preparation for X-Ray Fluorescence Analysis. III. Pressed and Loose Powder Methods. Rigaku Journal*, 31(1), pp.26-30.

Tiwow, V.A., Arsyad, M., Palloan, P. and Rampe, M.J., 2018. *March. Analysis of mineral content of iron sand deposit in Bontokanang Village and Tanjung Bayang Beach, South Sulawesi, Indonesia.* In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 997, No. 1, p. 012010). IOP Publishing.

Tohar, S.Z. and Yunus, M.M., 2020. *Mineralogy and BCR sequential leaching of ion-adsorption type REE: A novelty study at Johor, Malaysia*. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 120, p.102947.

Wang, W., Huang, R. and Feng, J., 2020. *A new method for determining weathering rates in weathering pits*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), pp.1262-1272.

Diterima	: 12 Oktober 2021
Direvisi	: 17 November 2021
Disetujui	: 9 Mei 2022

KARAKTERISTIK LITOTIPE DAN HUBUNGANNYA TERHADAP *CLEAT* BATUBARA DI DAERAH KUALA KUAYAN, KOTAWARINGIN TIMUR, KALIMANTAN TENGAH

LITHOTYPE CHARACTERISTICS AND THEIR RELATION TO COAL CLEATS IN KUALA KUAYAN AREA, EAST KOTAWARINGIN, CENTRAL KALIMANTAN

Muhammad Abdurachman Ibrahim dan Sigit Arso Wibisono
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
abdurachman.ibrahim@esdm.go.id

ABSTRAK

Karakteristik batubara dapat dilihat dari litotipe dan *cleat*. Objek yang diteliti adalah batubara Formasi Dahor yang memiliki peringkat rendah dengan mengetahui litotipe, *cleat* dan kilap batubara. Litotipe batubara merupakan asosiasi maseral dalam bentuk pita-pita tipis. *Cleat* merupakan rekahan yang terdapat pada batubara. Kilap merupakan kenampakan batubara secara megaskopis. Penelitian ini mengambil sampel batubara di daerah Kuala Kuayan, Kotawaringin Timur, Kalimantan Tengah. Data yang diteliti merupakan sampel batubara dari tiga lokasi pengeboran. Analisis dilakukan dengan melihat kilap dan *cleat* secara megaskopis terhadap lapisan batubara dan terhadap kedalaman batubara. Karakteristik litotipe mempunyai kecenderungan semakin dalam kedalaman lapisan batubara, maka kilapnya semakin baik. Karakteristik litotipe memiliki klasifikasi *banded coal/clarain*. Karakteristik *cleat* memperlihatkan frekuensi *cleat* akan cenderung lebih banyak, jika persentase kilap terangnya besar. Litotipe cukup berpengaruh terhadap frekuensi *cleat*.

Kata kunci: batubara, karakteristik, litotipe, cleat, Kuala Kuayan

ABSTRACT

The characteristics of coal can be seen from the lithotype and cleats. This research studied about low rank coal from Dahor Formation to characterize lithotype, cleats, and luster of the coal. Coal lithotypes are associated with maceral in the form of thin bands. Cleats are fractures in coal. Luster is the bright appearance in coal. The coal samples for this research are obtained from Kuala Kuayan area, Kotawaringin Timur, Central Kalimantan. Coal samples were obtained from three exploration wells in this area. Analysis was carried out by looking at the luster and cleats megascopically to the coal seam and to the depth of the coal. The lithotype characteristics indicates that the deeper the depth of the coal seam, the better the bright luster of the coal. The lithotype characteristics are classified as banded coal/clarain. Cleat characteristics from this research are more cleat ferquency and more bright luster. Litotype is quite influential on the frequency of cleats.

***Keywords**: coal, characteristics, lithotype, cleat,* Kuala Kuayan

PENDAHULUAN

Berbagai penelitian dilakukan untuk mengetahui karakteristik batubara pada setiap daerah dengan pendekatan yang berbeda-beda, misalnya dengan melihat karakter litotipe dan *cleat*.

Litotipe batubara merupakan pemerian secara megaskopis yang membagi batubara berdasarkan keberadaan pita karbon (*banding*) dan kilap (cerah dan kusam), dari setiap pita karbon tersebut. Pemerian litotipe berguna untuk mengidentifikasi awal batubara

terhadap komposisi material organik dan anorganik, serta tingkat diagenesis (Diessel, 1992).

Karakteristik *cleat* (rekahan batubara) dapat dilihat baik melalui pengamatan terhadap sampel batubara secara megaskopis maupun secara mikroskopis. *Cleat* merupakan suatu rekahan yang alami di dalam batubara dengan sifat terbuka. *Cleat* dapat sebagai jalan keluarnya gas dalam batubara. Karakteristik *cleat* bergantung juga terhadap tingkat diagenesis batubara. Selain itu, kehadiran *cleat* dalam batubara disebabkan oleh berbagai faktor yang meliputi mekanisme pengendapan, derajat pembatubaraan, tektonik (struktur), dan aktivitas pekerjaan tambang (Laubach, dkk., 1998).

Batubara pada setiap daerah memiliki karakteristik yang beragam, tergantung pada kondisi geologis tertentu. Oleh karena itu perlu mempelajari karakteristik batubara pada suatu daerah untuk mengetahui lebih dalam mengenai lapisan batubara pada daerah tertentu. Ada dua aspek yang dapat diteliti untuk mengetahui karakteristik batubara pada penelitian ini, yaitu dari litotipe dan *cleat*. Hubungan antara karakteristik litotipe terhadap *cleat* akan dilihat pada penelitian ini. Penelitian tentang hubungan keduanya masih jarang dilakukan, sehingga menarik untuk dilakukan penelitian keduanya.

Lapisan batubara yang diteliti adalah lapisan batubara Formasi Dahor dari daerah Kuala Kuayan dan sekitarnya, Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah. Formasi ini merupakan formasi pembawa batubara yang memiliki karakteristik tersendiri, karena penyebaran batubaranya tidak pada semua Formasi Dahor (Wibisono dkk., 2019).

GEOLOGI REGIONAL

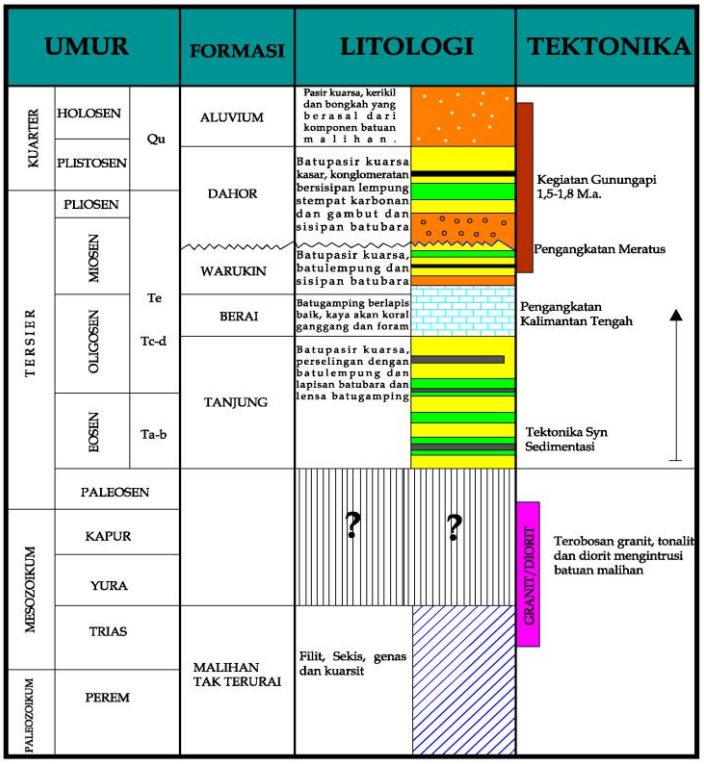
Secara regional, daerah penelitian berdasarkan tatanan tektonik terletak di bagian barat Cekungan Barito. Cekungan ini merupakan salah satu cekungan sedimen dengan potensi batubara di Indonesia. Batuan alas pada cekungan ini berumur Pra-Tersier yang terdiri dari batuan terobosan yang berkomposisi andesit dan basal, granit, breksi, dan batuan metamorf. Batuan yang berumur Tersier diendapkan secara tidak selaras di atas batuan alas berumur Pra-Tersier. Batuan berumur Tersier tersebut dikelompokkan menjadi Formasi Tanjung, Formasi Berai, Formasi Warukin, Formasi Dahor, dan Endapan Aluvial (Gambar 1).

Stratigrafi regional daerah penelitian merujuk pada Peta Geologi Lembar Tewah (Kuala Kurun) oleh Sumartadipura dan Margono, 1996, dan Lembar Palangkaraya oleh Nila, dkk., 1995, yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi dengan skala 1:250.000. Stratigrafi secara regional dapat dikelompokkan dari yang tertua hingga termuda sebagai berikut.

Batuan tertua yang tersingkap adalah Batuan Malihan Tak Teruraikan berumur Permo-Trias, terdiri dari filit, sekis, gneis, dan kuarsit (Sumartadipura dan Margono, 1996).

Formasi Tanjung berumur Eosen hingga Oligosen Awal diendapkan pada lingkungan paralik sampai neritik, secara tidak selaras diendapkan di atas batuan Pra-Tersier. Formasi ini di bagian bawah terdiri dari perselingan batupasir, serpih, batulanau, dan konglomerat aneka bahan, sebagian bersifat gampingan, sedangkan bagian atas terdiri dari perselingan batupasir kuarsa bermika, batulanau, batugamping, dan batubara (Sumartadipura dan Margono, 1996).

Formasi Berai berumur Oligosen terdiri dari batugamping masif, batugamping dengan selingan napal, serpih, batulempung. Formasi Berai mempunyai lingkungan pengendapannya laguna dan laut dangkal (Sumartadipura dan Margono, 1996).



Gambar 1. Stratigrafi regional daerah penelitian (modifikasi dari Sumartadipura dan Margono, 1996, dan Nila, dkk., 1995, dalam Kusnama, 2008)

Formasi Warukin berumur Miosen Awal, diendapkan pada lingkungan transisi darat-laut dangkal, disusun oleh batupasir kuarsa, batulempung, batulanau, dan konglomerat di bagian bawahnya; serta sisipan batubara dan lensa batugamping (Sumartadipura dan Margono, 1996).

Formasi Dahor diendapkan secara tidak selaras di atas Formasi Warukin, terdiri dari batupasir kuarsa dan konglomerat yang mengandung kepingan kuarsit dan basal, berselingan dengan batupasir berbutir sedang sampai sangat kasar, setempat berstruktur silang-siur, sisipan batulempung setempat karbonan hingga gambut dan batulempung. Formasi ini berumur Miosen Akhir hingga Plistosen dan diendapkan pada lingkungan fluvial (Sumartadipura dan Margono, 1996). Formasi ini merupakan formasi pembawa batubara yang menjadi target penelitian pada tulisan ini.

Aluvium merupakan batuan yang bersifat lepas, berumur Resen dan menutupi satuan batuan yang lebih tua di daerah penelitian Kuala Kuayan ini (Sumartadipura dan Margono, 1996).

Struktur geologi regional daerah ini relatif sederhana, yakni berupa sumbu lipatan yang umumnya berarah timur laut-barat daya. Sesar memperlihatkan arah timur laut- barat daya dan barat laut-tenggara. Perlapisan batuan mempunyai arah kemiringan ke tenggara dengan sudut kemiringan mencapai 60°. Foliasi pada batuan malihan umumnya berarah timur laut-barat daya. Formasi Dahor ternyata tidak terpengaruh oleh proses tektonik yang kuat. Formasi Dahor diendapkan secara regresif, dalam lingkungan fluvial atau litoral (Sumartadipura dan Margono, 1996).

METODE

Litotipe batubara merupakan asosiasi maseral dalam bentuk pita-pita tipis yang memiliki ketebalan berkisar mulai dari beberapa mm hingga beberapa cm pada batubara (Diessel, 1992). Selain

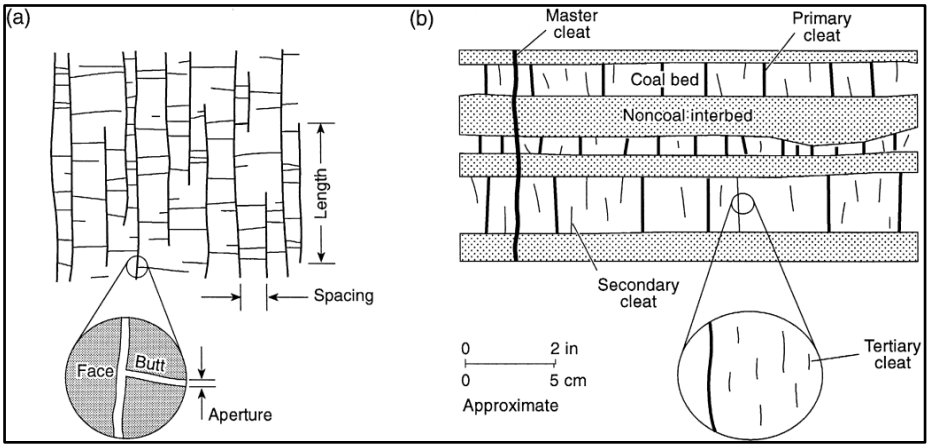
litotipe, ada juga *cleat* yang biasa dijumpai di batubara. Batuan sedimen pada umumnya dapat ditemukan rekahan, istilah yang biasa digunakan untuk rekahan pada batubara disebut *cleat* (Laubach, dkk., 1998).

Cleat dapat dilihat melalui pengamatan terhadap jenis *cleat*, jarak antar-*cleat* (spasi), lebar bukaan (*aperture*), pengisi, panjang, orientasi bidang *cleat*, dan derajat fragmentasi *cleat* (Laubach, dkk., 1998). Terdapat dua *cleat* dalam batubara, yaitu *face cleat* yang merupakan *cleat* utama, biasanya tidak terpotong oleh bidang *cleat* lainnya, dan *butt cleat* yang merupakan bidang *cleat* lainnya, biasanya tegak lurus terhadap bidang *face cleat* dan terpotong oleh adanya *face cleat* (Gambar 2). *Cleat* merupakan salah satu faktor penting dalam kegiatan eksplorasi gas metana batubara, karena gas dalam batubara akan keluar melalui *cleat* batubara pada saat air mengubah tekanan pada reservoir (Laubach, dkk., 1998).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melihat sampel batubara dalam suatu *hand specimen* batubara. Terdapat kenampakan pita-pita tipis akibat dari akumulasi berbagai jenis hancuran tumbuhan selama pembentukan endapan organik. Perbedaan senyawa organik yang memperlihatkan perbedaan asal mula batubara, yang diklasifikasikan berdasarkan litotipe batubara (Tabel 1).

Data yang dianalisis merupakan litotipe dan *cleat* batubara dari daerah penelitian dengan jumlah 34 sampel batubara. Sampel tersebut merupakan sampel batuan inti dari hasil pengeboran pada tiga titik pengeboran dengan rincian sebagai berikut: KKB-02 terdiri dari tujuh sampel batubara, KKB-03 terdiri dari 16 sampel batubara, dan KKB-04 terdiri dari 11 sampel batubara.

Analisis litotipe batubara dilakukan dengan membandingkan antara kilap kusam dengan kilap terang, sedangkan analisis *cleat* batubara dilakukan secara megaskopis dengan menghitung frekuensi *face cleat* dan *butt cleat* dalam dimensi 4 cm x 4 cm. Data kilap terang dan kusam serta *cleat* kemudian dilakukan perhitungan rata-rata dan standar deviasi serta normalisasi dari tiap unit tersebut. Pengolahan dan analisis data dituangkan dalam tabel dan grafik terhadap lapisan batubara dari setiap titik pengeboran. Setiap titik pengeboran memiliki kedalaman 100 meter. Analisis litotipe dan *cleat* terhadap kedalaman, dibagi menjadi beberapa kedalaman dengan interval 10 meter. Hasilnya disajikan dengan interval kedalaman 0-10 meter, 10-20 meter, 20-30 meter, 30-40 meter, 40-50 meter, 50-60 meter, 60-70 meter, 70-80 meter, 80-90 meter, dan 90-100 meter. Tidak ada data pada interval kedalaman 70-80 meter dan 90-100 meter dikarenakan pada kedalaman tersebut tidak ditemukan lapisan batubara dengan ketebalan ≥1 meter. Pada tahap akhir dilakukan analisis data *cleat* yang dihubungkan dengan grafik litotipenya untuk melihat hubungannya.



Gambar 2. Kenampakan sistem *cleat* pada batubara (Laubach, dkk., 1998)

Tabel 1. Klasifikasi litotipe batubara
(Diessel, 1992; Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991)

Diesel, 1992	Hower dkk., 1990	Deskripsi
Bright Coal (B) [Vitrain]	*Vitrain*	Memiliki kilau vitreous-subvitreous, dan pecahan konkoidal; rapuh; kemungkinan berisi hingga 10% *dull bands* dengan ukuran kurang dari 5mm
Bright Banded Coal (BB)	*Bright Clarain*	Utamanya berkomposisi vitrain yang mengandung 10-40% *dull bands* dengan ketebalan kurang dari 5 mm
Banded Coal (BD) *[Duroclarain]*	*Clarain*	Disusun oleh 40-60% *dull bands* dengan ukuran kurang dari 5 mm
Dull Banded Coal (DB) *[Clarodurain]*	*Dull Clarain*	Terutama tersusun oleh *dull coal* 10-40% (ketebalan kurang dari 5 mm) dengan *bright bands*
Dull Coal (D)	*Durain*	Berkilau kusam dan pecahan tidak rata; mengandung kurang dari 10% vitrain dengan ukuran kurang dari 5 mm
Fibrous Coal (F) *[Fusain]*	*Fusain*	Kusam dengan kilau satin, gembur, mengandung hingga 10% dari litotipe batubara lainnya kurang dari 5 mm
Shaly Coal (Cs)	*Bone*	Tersusun atas 30-60% dari lempung dan lanau, baik tercampur dengan batubara atau dalam lapisan yang terpisah masing-masing kurang dari 5 mm
Coaly shale, coaly, mudstone, etc		Setiap sedimen mengandung 60-90% material karbonan halus
Shale, mudstone, etc.		Setiap sedimen yang mengandung 10% bahan karbon

Marchioni dan Kalkreuth., 1991	Deskripsi
Bright Coal (B)	Kilau subvitreous ke vitreous atau fraktur konkoidal, berisi kurang dari 10% *dull bands*
Banded Bright Coal (BB)	Lignit cerah dengan beberapa pita kusam tipis, berisi 10-40% *dull bands*
Banded Coal (BC)	Pita lignit cerah dan kusam dalam proporsi yang sama, berisi 40-60% *dull bands*
Banded Dull Coal (BD)	Lignit kusam dengan beberapa pita cerah tipis den 10-40% *bright bands*
Dull Coal (D)	Matt lustre, fraktur yang tidak rata, kurang dari 10% *bright bands*
Fibrous Coal (F)	Kilap satin, rapuh
Sheared Coal (S)	Kilau bervariasi, lapisannya cukup kompleks, banyak permukaan *slip/slickenslide*, sangat rapuh

HASIL DAN PEMBAHASAN

Batubara daerah penelitian ditemukan pada Formasi Dahor yang berasosiasi dengan litologi dominan batupasir dan batulempung. Karakteristik batubara ini secara megaskopis mempunyai warna hitam kecoklatan, kilap cerah hingga kusam, segar sampai sedikit lapuk, agak kompak, kekerasan sedang hingga getas, bagian atas seperti membentuk struktur menyerpih atau berlembar dan sebagian mudah hancur/retak, struktur *cleat* terlihat, terdapat sisipan batulempung kelabu kecokelatan, dengan banyak pengotor mineral lempung dan getah (resin). Arah jurus dan kemiringan lapisan batubara mulai dari N300°E s.d. N330°E dan mulai dari 8° s.d. 14°, dengan ketebalan batubara mulai dari 0,20 s.d. 5,50 meter.

Analisis karakterisasi litotipe dan cleat dilakukan terhadap tiga titik pengeboran dengan kedalaman maksimal 100 meter diberi notasi KKB-02, KKB-03, dan KKB-04. Titik pengeboran KKB-02 menembus tujuh lapisan batubara dengan ketebalan mulai dari 0,20 s.d. 3,50 meter. Titik pengeboran KKB-03 menembus 13 lapisan batubara dengan ketebalan mulai dari 0,20 s.d. 4,00 meter. Titik pengeboran KKB-04 menembus 13 lapisan batubara dengan ketebalan mulai dari 0,20 s.d. 5,50 meter (Tabel 2).

Hasil analisis proksimat memiliki nilai kandungan kelembaban mulai dari 41,51 s.d. 55,82% (adb), kandungan zat terbang mulai dari 29,19 s.d. 47,72% (adb), kandungan karbon tertambat mulai dari 24,85 s.d. 50,39% (adb), kandungan abu mulai dari 3,41 s.d. 30,43% (adb), total sulfur mulai dari 0,14 s.d. 2,93%, dan nilai kalori batubara mulai dari 3.539 s.d. 5.803 kal/gr (adb). Hasil analisis petrografi organik menunjukkan nilai reflektan vitrinit mulai dari 0,28 s.d. 0,39%. Komposisi kelompok maseral umumnya didominasi oleh vitrinit. Komposisi ini umumnya terdapat pada sebagian besar batubara Indonesia (Santoso dan Daulay, 2005; Daulay dan Santoso, 2008; Belkin dkk., 2009; Suwarna dan Kusumahbrata, 2010; Santoso dan Utoyo, 2012; Santoso, 2015). Peringkat batubara daerah penelitian berdasarkan klasifikasi ASTM (2009) termasuk peringkat lignit hingga subbituminus.

Klasifikasi litotipe tiap sumur

Hasil analisis klasifikasi litotipe berdasarkan perbandingan antara kilap terang dengan kilap kusam pada daerah penelitian pada setiap lapisan batubara dari masing-masing titik pengeboran mengacu pada klasifikasi, Hower dkk. (1990), Marchioni dan Kalkreuth (1991), dan Diessel (1992) sebagai berikut. Persentase antara kilap terang dan kilap kusam akan 100% bila dijumlahkan.

Titik Pengeboran KKB-02

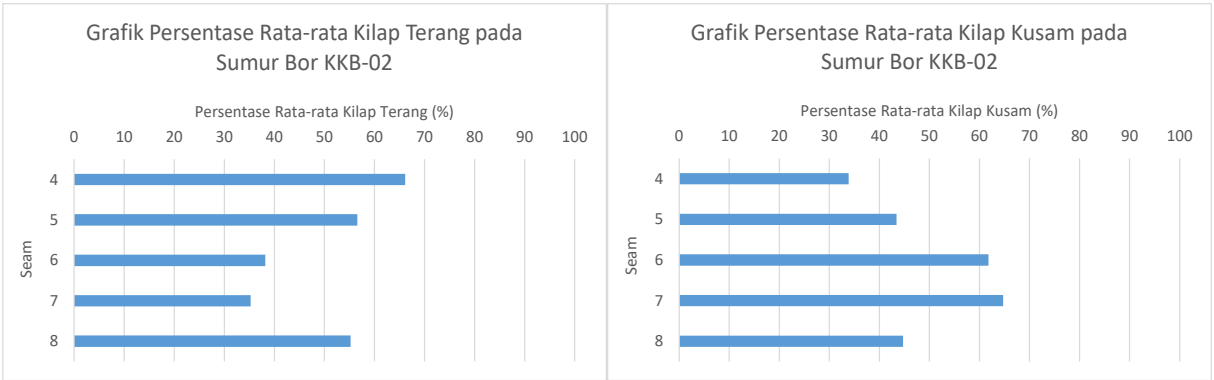
Batubara memiliki karakteristik berwarna cokelat kehitaman, relatif ringan, mudah hancur, getas, terdapat pengotor lempung dan resin. Berdasarkan data dari kedua grafik kilap terang dan kilap kusam (Gambar 3) didapatkan bahwa batubara pada titik pengeboran KKB-02 didominasi oleh klasifikasi litotipe *banded coal (BD)/Banded Coal (BC)/Clarain* (Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991; Diessel, 1992) terlihat pada lapisan 4, 5, dan 8 kilap terang dapat mencapai lebih dari 50%.

Titik pengeboran KKB-03

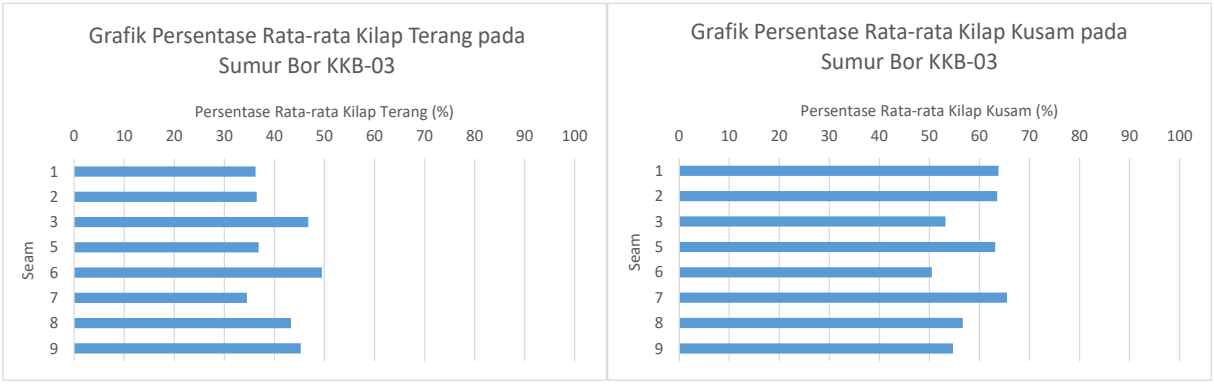
Batubara ini memiliki karakteristik berwarna cokelat kehitaman, relatif ringan, mudah hancur, getas, terdapat pengotor lempung dan resin yang lebih banyak dibandingkan pada titik pengeboran KKB-02. Berdasarkan data dari kedua grafik kilap terang dan kilap kusam (Gambar 4) didapatkan bahwa batubara pada titik pengeboran KKB-03 didominasi oleh klasifikasi litotipe *Dull Banded Coal (DB)/Banded Dull Coal (BD)/Dull Clarain* (Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991; Diessel, 1992), terlihat pada kilap kusam lebih dominan hingga mencapai lebih dari 60%.

Tabel 2. Kedalaman dan ketebalan batubara dari titik pengeboran

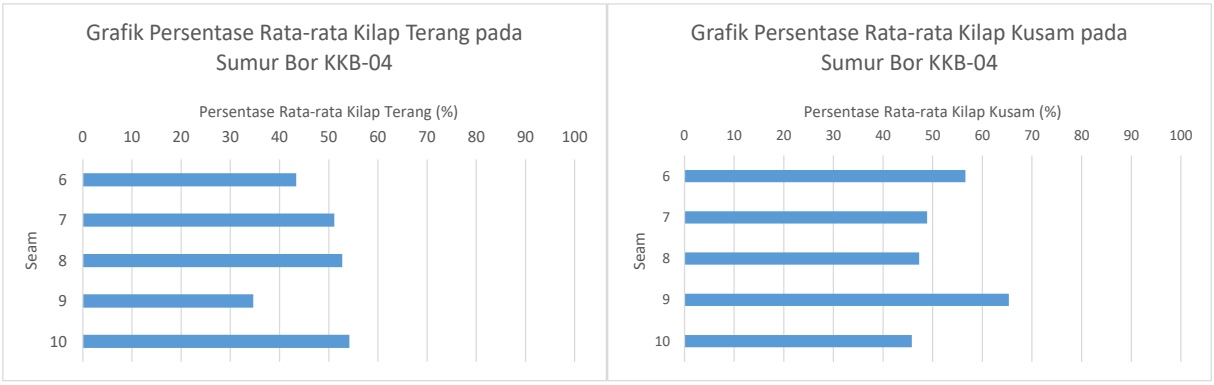
Titik Pengeboran	Koordinat		Batubara yang ditembus (m)			Lapisan
	X (B.T.)	Y (L.S.)	Dari	Sampai	Tebal	
KKB-02	112°36'08,80"	2°00'57,70"	20,32	20,65	0,35	-
			25,20	25,40	0,20	-
			26,50	27,60	1,10	4
			30,10	31,25	1,15	5
			33,00	34,70	1,70	6
			36,65	37,80	1,15	7
			38,90	42,40	3,50	8
KKB-03	112°36'00,90"	2°00'47,60"	5,70	7,90	2,20	1
			12,15	13,15	1,00	2
			21,00	24,15	3,15	3
			37,05	37,50	0,45	-
			42,15	42,40	0,25	-
			43,65	43,95	0,30	-
			44,20	44,95	0,75	4
			48,35	50,00	1,65	5
			53,60	55,60	2,00	6
			60,65	61,70	1,05	7
			62,10	66,10	4,00	8
			75,55	75,75	0,20	-
			87,00	88,30	1,30	9
KKB-04	112°36'30,90"	2°01'08,80"	15,00	15,30	0,30	-
			22,30	23,70	1,40	6
			24,45	29,95	5,50	7
			30,35	32,80	2,45	8
			34,80	35,60	0,80	-
			56,75	57,45	0,70	-
			58,40	60,80	2,40	9
			75,50	75,70	0,20	-
			75,85	76,15	0,30	-
			76,35	76,55	0,20	-
			84,25	84,60	0,35	-
			85,60	85,85	0,25	-
			86,80	87,90	1,10	10



Gambar 3. Grafik hasil analisis kilap terang dan kilap kusam pada titik pengeboran KKB-02



Gambar 4. Grafik hasil analisis kilap terang dan kilap kusam pada titik pengeboran KKB-03



Gambar 5. Grafik hasil analisis kilap terang dan kilap kusam pada titik pengeboran KKB-04

Titik pengeboran KKB-04

Batubara ini memiliki karakteristik berwarna hitam kecokelatan, relatif ringan, memiliki kilap, mudah hancur dan di beberapa bagian agak keras, getas, terdapat resin yang dominan dan pengotor lempung. Berdasarkan data dari kedua grafik kilap terang dan kilap kusam (Gambar 5) didapatkan bahwa batubara pada titik pengeboran KKB-04 didominasi oleh klasifikasi litotipe *Banded Coal (BD)/Banded Coal (BC)/Clarain* (Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991; Diessel, 1992), terlihat pada lapisan 7, 8, dan 9 kilap terang dapat mencapai lebih dari 50%.

Klasifikasi litotipe terhadap kedalaman

Berdasarkan data dari kedua grafik kilap terang dan kilap kusam (Gambar 6) didapatkan bahwa batubara pada ketiga titik pengeboran yang dibagi rentang 10 meter dari kedalaman pengeboran, didominasi oleh klasifikasi litotipe *Banded Coal (BD)/Banded Coal (BC)/Clarain* (Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991; Diessel, 1992), terlihat pada rentang kedalaman 20-30 m, 30-40 m, 40-50 m, 50-60 m, 60-70 m, dan 80-90 m, kilap terang dapat mencapai lebih dari 40%.

Secara keseluruhan, litotipe batubara daerah penelitian didominasi oleh klasifikasi litotipe *Banded Coal (BD)/Banded Coal (BC)/Clarain* (Hower dkk., 1990; Marchioni dan Kalkreuth, 1991; Diessel, 1992). Semakin dalam kedalaman lapisan batubara, maka cenderung semakin banyak kilap terang (*bright* pada klasifikasi litotipenya).

Lapisan batubara di Kalimantan umumnya didominasi oleh litotipe *vitrain* (hitam cerah) dan *clarain* (hitam agak cerah) serta sedikit *durain* (hitam kusam). Litotipe *vitrain* dan *clarain* ini berasosiasi erat dengan kandungan maseral vitrinit, sedangkan litotipe *durain* terkait erat dengan maseral inertinit (Santoso, 2015). Hal ini terlihat dari hasil klasifikasi daerah penelitian didominasi *clarain* dengan maseral vitrinit mendominasi pada seluruh sampel batubara daerah penelitian

hingga 81,93%, diikuti maseral inertinit 8,16%, dan sedikit maseral liptinit 2,01%, serta material mineral lainnya 7,92%. Komposisi seperti ini sangat umum ditemukan pada batubara yang terdapat di Indonesia (Santoso dan Daulay, 2005; Daulay dan Santoso, 2008; Belkin dkk., 2009; Suwarna dan Kusumahbrata, 2010; Santoso dan Utoyo, 2012; Sinaga, 2019).

Kandungan vitrinit tinggi menunjukkan bahwa batubara ini terbentuk pada keadaan dasar rawa-rawa yang mengalami penurunan cepat (Santoso dan Utoyo, 2012). Kandungan liptinit yang sedikit mengindikasikan bahwa batubara ini terbentuk dari sekumpulan tetumbuhan yang berbeda (Santoso dan Utoyo, 2012). Kandungan inertinit dalam batubara dapat ditafsirkan bahwa batubara ini terbentuk pada rawa-rawa yang relatif kering dan terpengaruh oleh kondisi oksidasi (Santoso dan Utoyo, 2012).

Litotipe batubara erat kaitannya dengan lingkungan pengendapan. Interpretasi hasil litotipe batubara daerah penelitian memperlihatkan kondisi lingkungan yang relatif basah (rawa-rawa basah). Lapisan batubara dengan dominasi litotipe *clarain* mengalami banjir berkala, sehingga tidak memiliki waktu yang cukup untuk muncul ke permukaan air, dalam periode tertentu selalu dalam kondisi tergenang air, dan didominasi proses oksidasi atau selalu dalam kondisi reduksi, sehingga batubara yang terbentuk berwarna hitam agak cerah (Santoso dan Utoyo, 2012; Purnama dkk., 2020). Lingkungan pengendapan batubara diinterpretasikan berada di *transitional lower delta plain* pada zona *limno-telmatik*. Lokasi ini berada pada *bog ombrotropik,* yaitu lokasi rawa yang banyak ditumbuhi oleh tanaman lumut atau tanaman merambat yang miskin kandungan makanan (Purnama dkk., 2020).

Kusnama (2008) dan Rizal dkk. (2019) yang menyelidiki batubara daerah Sampit menemukan batubara yang didominasi litotipe *bright banded* dengan sedikit *dull*, memiliki lingkungan pengendapan pada hutan-rawa basah yang mempunyai pohon tinggi dan semak perdu. Daerah yang diteliti mempunyai kemiripan dengan hasil penelitian ini.

Karakteristik *cleat* tiap titik pengeboran

Hasil analisis kilap terang dibandingkan dengan frekuensi *cleat* (jumlah keterdapatan *cleat* yang diamati) pada lapisan batubara dari masing-masing titik pengeboran dapat dilihat sebagai berikut.

Titik pengeboran KKB-02

Berdasarkan data dari grafik kilap terang dan frekuensi *cleat* pada lapisan batubara titik pengeboran KKB-02 (Gambar 7) didapatkan bahwa terdapat kecenderungan berbanding lurus antara banyaknya kilap terang terhadap banyaknya frekuensi *cleat*.

Titik pengeboran KKB-03

Berdasarkan data dari grafik kilap terang dan frekuensi *cleat* pada lapisan batubara titik pengeboran KKB-03 (Gambar 8) didapatkan bahwa terdapat kecenderungan berbanding lurus antara banyaknya kilap terang terhadap banyaknya frekuensi *cleat*. Pada grafik frekuensi *cleat* juga terlihat semakin dalam lapisan batubara, maka frekuensi *cleat* juga cenderung semakin banyak.

Titik pengeboran KKB-04

Berdasarkan data dari grafik kilap terang dan frekuensi *cleat* pada lapisan batubara sumur KKB-04 (Gambar 9) didapatkan bahwa terdapat kecenderungan berbanding lurus antara banyaknya kilap terang terhadap banyaknya frekuensi *cleat*.

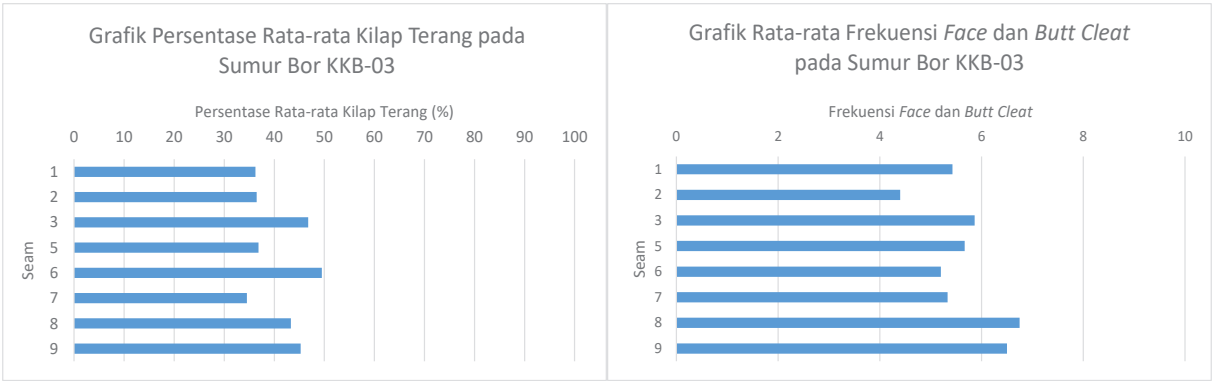
Hasil analisis kilap terang dengan frekuensi *cleat* terlihat saling berpengaruh. Semakin banyak kilap terang, maka frekuensi *cleat* juga akan semakin banyak. Hal ini juga dikarenakan *cleat* akan semakin jelas terlihat pada batubara yang mengilap, sedangkan pada batubara yang kusam, *cleat* cenderung sulit terlihat. Pada beberapa lapisan batubara terdapat anomali, kilap terang rendah tetapi frekuensi *cleat* tinggi, kemungkinan hal

ini terjadi karena adanya pengaruh tektonik lokal yang menyebabkan *cleat* akibat tektonik bukan karena pembentukan batubara. Akan tetapi *cleat* dari pembatubaraan dan tektonik belum dapat dibedakan.

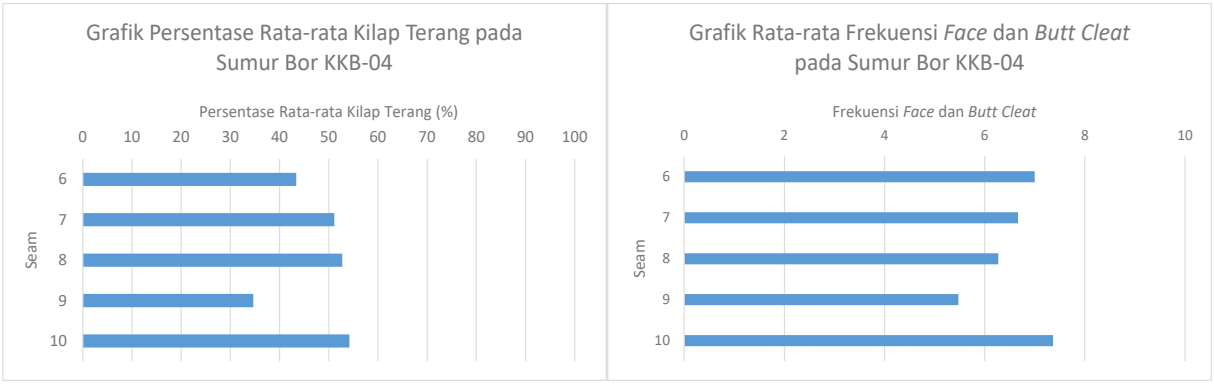
Karakteristik *cleat* terhadap kedalaman

Berdasarkan data dari grafik kilap terang dan frekuensi *cleat* (Gambar 10) didapatkan bahwa batubara pada ketiga titik pengeboran yang dibagi rentang 10 meter dari kedalaman pengeboran, memperlihatkan bahwa terdapat kecenderungan banyaknya frekuensi *cleat* tidak selalu diikuti oleh persentase kilap terang.

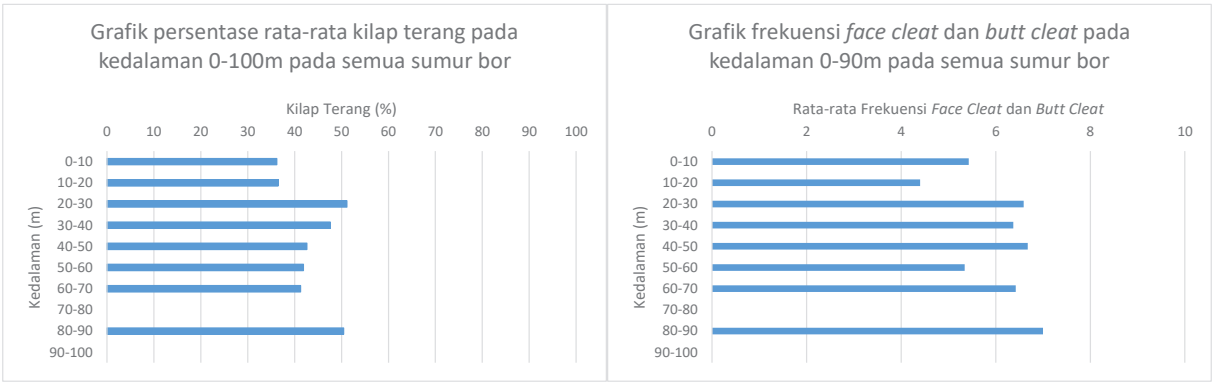
Grafik frekuensi *cleat* mempunyai kecenderungan semakin dalam lapisan batubara, maka frekuensi *cleat* juga cenderung semakin banyak. Semakin dalam lapisan batubara, maka diinterpretasikan diagenesis batubara dan derajat pembatubaraan semakin baik.



Gambar 8. Grafik hasil analisis kilap terang dan frekuensi *cleat* pada titik pengeboran KKB-03



Gambar 9. Grafik hasil analisis kilap terang dan frekuensi *cleat* pada titik pengeboran KKB-04



Gambar 10. Grafik hasil analisis kilap terang dan frekuensi *cleat* terhadap semua titik pengeboran pada rentang kedalaman 0-100 meter

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Karakteristik litotipe batubara didominasi kilap terang lebih dari 40%, dengan klasifikasi litotipe *Banded Coal (BD)/Banded Coal (BC)/Clarain*. Semakin dalam kedalaman lapisan batubara, maka cenderung semakin banyak kilap terang. Lingkungan pengendapan dilihat dari karakteristik litotipenya berada pada lingkungan rawa.

Karakteristik frekuensi *cleat* terhadap frekuensi kilap terang cenderung memiliki perbandingan lurus. Semakin banyak kilap terang, maka frekuensi *cleat* juga akan semakin banyak. Batubara yang mengilap akan memberikan kenampakan *cleat* yang lebih jelas dan lebih banyak dibandingkan batubara yang kusam. Semakin dalam lapisan batubara, maka frekuensi *cleat* juga semakin banyak. Semakin dalam lapisan batubara, maka pengendapan dan derajat pembatubaraan semakin baik.

Cleat bukan hanya dipengaruhi oleh proses pengendapan dan derajat pembatubaraan, tetapi juga proses tektonik serta aktivitas lainnya, sehingga pada beberapa sampel masih terdapat anomali.

SARAN

Analisis menggunakan mikroskop dapat membantu mengidentifikasi lebih baik *cleat*. Litotipe memengaruhi frekuensi *cleat,* tetapi masih banyak faktor yang memengaruhi frekuensi *cleat*, sehingga karakterisasi terhadap faktor lainnya perlu dipelajari. Penambahan sampel batubara yang lebih beragam dan pengeboran batubara yang lebih dalam dapat menambah data penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM (Annual Book of American Society for Testing and Material Standards), 2009, *Petroleum products, lubricants and fossil fuels; gaseous fuels; coal and coke*, USA, 650 hal.

Belkin, H.E., Tewalt, S.J., Hower, J.C., Stucker, J.D., and O'Keefe, J.M.K., 2009, Geochemistry and petrology of selected coal samples from Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, and Papua, Indonesia. *International Journal of Coal Geology*, *vol. 77,* p. 260-268.

Diessel, C.F.K., 1992, *Coal-Bearing Depositional System*. Springer-Verlag, Berlin.

Hower, J.C., Esterle, J.S., Wild, G.D., and Pollock, J.D., 1990, Perspectives on coal lithotype analysis. *Journal of Coal Quality, vol. 9,* p. 48-52.

Kusnama, 2008, Batubara Formasi Warukin di daerah Sampit. Jurnal Geologi Indonesia, *vol. 3 no.1,* Pusat Survei Geologi, Bandung, hal. 11-22.

Laubach, S.E., Marret, R.A., Olson, J.E., Scott, A.R., 1998, *Characteristics and origins of coal cleat: a review*. Elsivier, p. 175-207.

Marchioni, D. dan Kalkreuth, W., 1991, *Coal facies interpretations based on lithotype and maceral variations in Lower Cretaceous (Gates Formation) coals of Western Canada*. *International Journal of Coal Geology*, *18(1-2),* p. 125-162.

Nila, E.S., Rustandi, E., Heryanto, R., 1995, Peta Geologi Lembar Palangkaraya, Kalimantan, Skala 1:250.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Purnama, A.A., Nurdrajat, Ganjar, R.M., Firmansyah, Y., dan Wibisono, S.A., 2020, Studi lingkungan pengendapan berdasarkan litotipe dan proksimat di daerah Kuala Kuayan, Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah. Padjadjaran Geoscience Journal, *vol. 4, no. 2,* p. 136-144.

Rizal, Y., Fahmi, M.A.A., dan Haq, H.I., 2019, Geologi dan sumber daya batubara daerah Satiung-Kuala Kuayan dan sekitarnya, Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah, *Bulletin of Geology*, *vol. 3, no. 3,* hal. 398-416.

Santoso, B. and Daulay, B., 2005, *Type and rank of selected Tertiary Kalimantan coals*. *Indonesian Mining Journal*, *vol. 8, no 02,* p. 1-12.

Daulay, B. and Santoso, B., 2008, *Characteristics of selected Sumateran Tertiary coals regarding their petrographic analyses*. *Indonesian Mining Journal*, *vol. 11, no. 10,* p. 1-18.

Santoso, B., 2015, Petrologi Batubara Sumatra dan Kalimantan: Jenis, Peringkat, dan Aplikasi, Lipi Press, Jakarta.

Santoso, B. dan Utoyo, H., 2012, Faktor pengontrol komposisi maseral dan mineral batubara Marah Haloq-Kalimantan Timur. Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 8, no. 3,* hal. 141-151.

Sinaga, H.J., 2019, Studi Petrografi Batubara di Daerah Kuala Kuayan, Mentaya Hulu, Kotawaringin, Kalimantan Tengah, Universitas Trisakti, Jakarta.

Sumartadipura, A. S. dan Margono, U., 1996, Peta Geologi Lembar Tewah (Kuala Kurun), Kalimantan*,* Skala 1:250.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Suwarna, N. dan Kusumahbrata, Y., 2010, *Macroscopic, microscopic and paleo-depositional features of selected coals in Arahan, Banjarsari, Suban Jeriji and South Banko regions, South Sumatera*. *Jurnal Geologi Indonesia*, *vol. 5, no. 4,* hal. 269-290.

Wibisono, S.A., Dwitama, E.P., dan Prahesthi, O.I., 2019, Petrografi dan geokimia batubara di daerah Pahirangan dan sekitarnya, Kabupaten Kotawaringin Timur, Provinsi Kalimantan Tengah. Buletin Sumber Daya Geologi, *vol 14, no. 1,* Bandung, hal. 65-78.

Diterima	: 7 Februari 2022
Direvisi	: 17 Februari 2022
Disetujui	: 31 Mei 2022

OPTIMASI VALUASI EKONOMI ENDAPAN NIKEL LATERIT MEMPERHITUNGKAN BIAYA LINGKUNGAN

OPTIMIZATION OF THE ECONOMIC VALUATION OF LATERITIC NICKEL DEPOSITS CONSIDERING ENVIRONMENTAL COSTS

Wahyu Sasongko dan Rheva Dwiky Adhitya
Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
wahyu_sas@ugm.ac.id

ABSTRAK

Optimasi valuasi ekonomi mineral bertujuan untuk menentukan nilai sekarang bersih maksimum suatu proyek selama umur tambang. Model optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pengembangan dari model Lane (1988) dan Sasongko (2013) dengan memperhitungkan biaya lingkungan serta mengacu rerangka aliran kas. Metode penelitian ini meliputi tahapan sebagai berikut: (1) pemodelan dan estimasi sumber daya, (2) pemodelan valuasi ekonomi mineral, (3) penentuan solusi model, dan (4) valuasi ekonomi mineral. Pemodelan sumberdaya dalam bentuk model blok ukuran 25 m x 25 m x 1 m. Estimasi kadar blok menggunakan metode interpolasi *inverse distance weighting* (IDW). Pemodelan optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pemodelan dalam rerangka aliran kas dengan mempertimbangkan biaya lingkungan dan kebijakan pemerintah seperti pajak, royalti, dan depresiasi. Optimasi *cut-off grade* adalah suatu usaha untuk menentukan kadar optimum yang akan menghasilkan keuntungan atau nilai sekarang bersih (*net present value, NPV*) maksimum. Solusi model dalam hal ini meliputi optimasi *cut-off grade* untuk optimasi profit dan optimasi *NPV*. Solusi model untuk menentukan kadar batas optimum tergantung pada batasan kapasitas penambangan, konsentrasi, dan pemurnian. Penentuan solusi model optimasi kadar batas menggunakan metode analitik. Pada studi kasus, estimasi sumberdaya terukur sejumlah US$4.253.566 ton bijih nikel. Pada laju penambangan konstan pada kadar batas optimum 0,95 %, maka umur tambang 4,85 tahun dengan *NPV* US$811.248.447. Optimasi valuasi ekonomi dengan indikator *NPV*, umur tambang 4,44 tahun dan dihasilkan *NPV* maksimum sebesar US$841,596.460. Nilai c*ut-off grade* berbeda-beda di setiap tahun penambangan, yaitu tahun ke-1 kadar 0,99%; tahun ke-2 kadar 0,99%; tahun ke-3 kadar 0,98%; tahun ke-4 kadar 0,97%; tahun ke-5 kadar 0,95%. Optimasi valuasi ekonomi *NPV* memiliki nilai lebih besar dan waktu yang lebih pendek, dibandingkan dengan optimasi keuntungan (*profit*).

Kata kunci: Endapan nikel laterit, model valuasi ekonomi, kadar batas optimum, biaya lingkungan

ABSTRACT

Optimization of mineral economic valuation aims to determine the maximum net present value of a project over the life of mine. The economic valuation optimization model in this study is the development of the Lane (1988) and Sasongko (2013) model by considering environmental costs and referring to the cash flow framework. The research methods are include the following: (1) resource modeling and estimation, (2) mineral economic valuation modeling, (3) solution model determination, and (4) mineral economic valuation. Resource modeling in the block model with a size of 25 m x 25 m x 1 m. The block content estimation uses the inverse distance weighting (IDW) interpolation method. Economic valuation optimization modeling in this research is modeling in terms of cash flow by considering environmental costs and government policies such as taxes, royalties, and depreciation. Optimizing cut-off grade is an attempt to determine the optimum grade that will produce the maximum profit or net present

value (NPV). The solution model in this case includes cut-off grade optimization for profit optimization and NPV optimization. The model solution to determine the optimum cut-off grade depends on constrains of the mining, concentrating and refining. Determination of the cut-off grade optimization model solution using analytical methods. In the case study, the estimated amount is US$4,253,566 tons of nickel ore. At a constant mining rate at an optimum level of 0.95%, the mine life is 4.85 years with an NPV of US$811,248,447. Optimization of economic valuation with NPV indicator, the life of mine of 4.44 years and maximum NPV of US$841,596,460. The cut-off grade value varies in each mining year: the 1st year with a grade of 0.99%; 2nd year level 0.99; 3rd year level 0.98%; 4th year level 0.97%; 5th year the rate is 0.95%. NPV economic valuation optimization has a greater value and shorter time, compared to profit optimization (profit).

***Keywords**: Lateritic nickel deposit, economic valuation model, optimum limit content, environmental costs*

PENDAHULUAN

Endapan nikel laterit merupakan produk residu dari pelapukan kimia batuan beku ultramafik, seperti dunit dan piroksenit, yang kemudian mengalami pengayaan unsur *Ni*. Logam nikel memiliki nilai ekonomi strategis dan dimanfaatkan terutama dalam industri elektronika, baterai, pesawat, kapal, peralatan militer, pelindung baja dan tembaga, peralatan rumah tangga, dan uang koin.

Sebelum tahap penambangan nikel laterit, dilakukan pemodelan sumberdaya berdasarkan data eksplorasi geologi dan diperlukan valuasi ekonomi mineral. Optimasi valuasi ekonomi mengacu pada hasil proses penentuan kadar batas optimum (*optimum cut-off grade*). Kadar batas optimum kemudian dipergunakan sebagai penentuan sebaran cadangan dan valuasi ekonomi cadangan nikel mengacu standar penyusunan aliran kas.

Kadar batas optimum didefinisikan sebagai suatu parameter yang digunakan untuk memisahkan antara kriteria material yang termasuk ke dalam bijih (*ore*) dan material yang termasuk ke dalam limbah/buangan (*waste*) (Lane, 1964, 1988; Sasongko, 2013; Cetin, 2013) yang ditulis dalam satuan persen untuk bijih nikel. Tujuan penentuan kadar batas optimum adalah untuk mendapatkan keuntungan maksimal dari proyek pertambangan. Sasongko *et al.* (2013) menyatakan bahwa kadar batas optimum bersifat dinamis, terutama bergantung pada harga jual logam, biaya-biaya tambang, dan kebijakan. Biaya-biaya tambang dipengaruhi proses sepanjang struktur rantai tambang yang tergantung pada karakteristik model dan keterdapatan sumberdaya mineral serta sistem penambangan. Biaya eksternal yang mempengaruhi valuasi ekonomi mineral adalah kebijakan dan ketentuan pemerintah tentang kewajiban finansial perusahaan kepada negara (perpajakan, royalti dan depresiasi), tingkat suku bunga dan inflasi.

Analisis penentuan kadar batas optimum mineral mengacu pada persamaan Lane (1988) yang didasarkan pada aliran kas dasar (*base cash flow*) dan biaya operasional utama saja. Gholamnejad (2008) menyatakan bahwa aspek lingkungan merupakan salah satu aspek krusial yang harus dipertimbangkan dalam optimasi valuasi ekonomi mineral.

Pada penelitian ini akan mengembangkan model penentuan kadar batas optimum (Lane. 1988), Setiawan & Sasongko (2015) dan pertimbangan faktor biaya lingkungan (Gholamnejad, 2008; Osanloo *et al.*, 2008; Rahimi *et al.*, 2014; Rahimi & Ghasemzadeh, 2015), dan kebijakan-ketentuan pemerintah, sebagai dasar dalam usaha optimasi valuasi ekonomi mineral bijih nikel. Indikator optimasi adalah nilai sekarang bersih (*net present value*; *NPV*) dari aliran kas terproyeksi (*projected cash flow*) (Kržanović *et al.*, 2015). Biaya lingkungan yang dimaksud

pada penelitian ini adalah biaya pengupasan dan penanganan tanah/material penutup (*waste*), pembuangan dan penanganan *tailing* dan reklamasi tambang.

Pemodelan sumberdaya menggunakan data pengeboran dari penelitian terdahulu, Asy'ari (2011) yang berlokasi di Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah. Penentuan parameter dalam pemodelan mengacu pada penetitian terdahulu dan asumsi-asumsi. Pada penelitian ini lebih ditekankan pada metodologi dan pemodelan.

GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Lokasi untuk studi kasus penelitian berada di Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, yaitu pada Blok A PT X dengan luas daerah penelitian sekitar 247,63 hektar. Lokasi termasuk ke dalam Peta Geologi Lembar Bungku 2213-14. Morfologi daerah penelitian terdiri dari perbukitan bergelombang dengan ketinggian berkisar antara 100 meter hingga 400 meter di atas permukaan laut.

Daerah penelitian termasuk ke dalam Mandala Sulawesi Timur Formasi Tomata yang tersusun atas batuan sedimen dan kompleks ultramafik (Simanjuntak, 1994). Asy'ari (2011) menyatakan daerah penelitian didominasi oleh harzburgit yang merupakan bagian dari kompleks batuan ultramafik yang tersingkap setempat-setempat sebagian besar tertutup tipis oleh batuan sedimen karbonat.

METODE

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu pemodelan dan estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit, pengembangan model optimasi valuasi ekonomi, penentuan solusi model, dan valuasi ekonomi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Pemodelan dan Estimasi Sumberdaya

Pemodelan sumberdaya endapan bijih nikel menggunakan data topografi, data *assay*, data *collar*, data survei, dan data geologi. Data pengeboran tersebut digunakan sebagai basis data pembuatan model blok dan penaksiran kadar. Penaksiran kadar dilakukan dengan interpolasi menggunakan metode estimasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) pangkat 2. Rumus dari perhitungan IDW adalah,

Taksiran (Z*) adalah $Z^* = \sum_{i=1}^{j} W_j Z_i$

Faktor pembobot,

$$W_{j_n} = \frac{\frac{1}{d_j^n}}{\sum_{i=1}^{j} \frac{1}{d_i^n}}$$

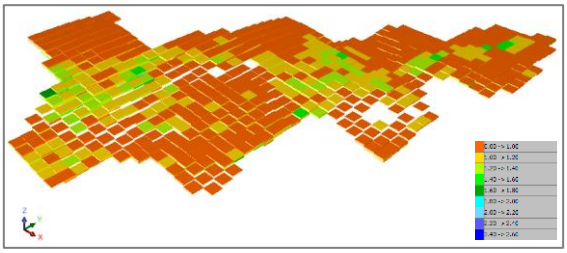
Keterangan:
d : jarak titik yang ditaksir
Z_i : titik data yang diketahui
W_j : faktor pembobotan

Pembuatan model blok berukuran dimensi disesuaikan dengan jarak atau spasi antara titik lubang bor, yaitu 25 m x 25 m x 1 m. Dimensi model blok akan memengaruhi perhitungan dan estimasi sumberdaya. Semakin kecil dimensi model blok, semakin meningkat pula keakuratan estimasi sumberdaya.

Setelah model blok dibuat, atribut ditambahkan pada model blok sebagai *handle* untuk menyimpan informasi di setiap bloknya. Atribut yang ditambahkan disesuaikan pada kebutuhan penelitian, seperti kadar nikel, litologi, berat jenis, dan lain-lain. Sedangkan untuk mendapatkan blok-blok yang termasuk ke dalam lokasi penelitian, perlu dibatasi suatu pembatas yang disebut *'constraint'*.

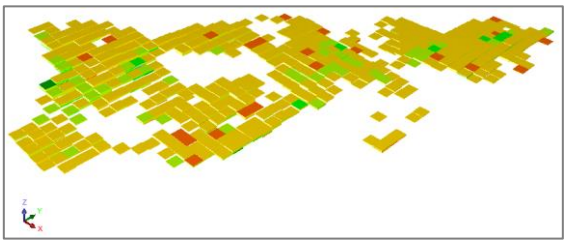
Beberapa kategori zona lapisan dalam penelitian ini, yaitu RL atau *red limonite* (limonit merah), YL atau *yellow limonite* (limonit kuning), SP atau saprolit, dan BZ atau *bed zone* (batuan dasar). Yang diijadikan *input* pada jendela *constraint* adalah topografi, batas bawah zona limonit merah, batas bawah zona limonit kuning, dan batas atas zona batuan dasar.

Model blok yang dibuat dengan menggunakan batasan (*constraints*) yang menyisakan lapisan limonit kuning dan saprolit, terlihat kadar rendah ditandai dengan blok berwarna coklat pada lapisan-lapisan atas/limonit kuning (Gambar 1).



Gambar 1. Sebaran kadar Ni pada lapisan limonit kuning dan saprolit

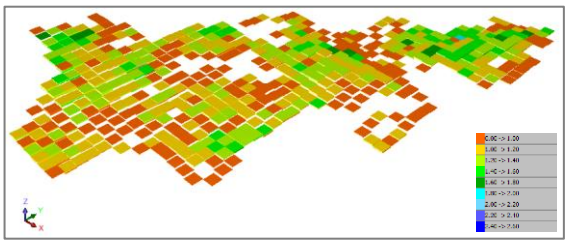
Dengan mengeliminasi blok yang atribut Ni-nya <1,0% pada lapisan limonit dan saprolit, sisa model blok secara umum didominasi oleh kadar 1,0% s.d. 1,2% (Gambar 2).



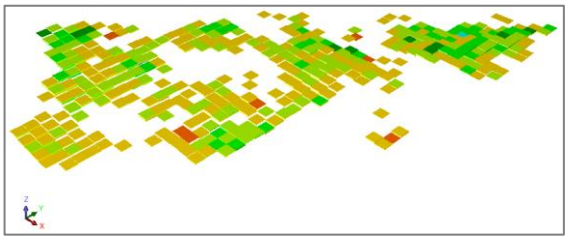
Gambar 2. Sebaran kadar Ni >1% pada lapisan saprolit dan limonit kuning

Sebaran kadar nikel pada saprolit terlihat cukup beragam, dengan kadar berkisar 1,4% dengan blok berwarna jingga, kuning, dan hijau muda (Gambar 3).

Dengan mengeliminasi blok yang atribut Ni-nya <1,0% menggunakan batasan, pada lapisan saprolit, model blok secara umum didominasi oleh kadar 1,0% s.d. 1,4% (Gambar 4).



Gambar 3. Sebaran kadar Ni pada lapisan saprolit



Gambar 4. Sebaran kadar Ni >1% pada lapisan saprolit

Hasil dari estimasi pada blok model kemudian diekspor dalam bentuk data tabel. Data tersebut disusun berdasarkan rentang kadar yang terdapat pada atribut masing-masing blok (Tabel 1).

Tabel 1. Hasil estimasi sumberdaya terukur dalam rentang kadar

Rentang kadar	Volume	Sumberdaya Terukur	Rata-rata kadar Ni
%	m^3	ton	%
0,0 - 0,1	13.750	21.313	0,00
0,2 - 0,3	1.875	2.875	0,26
0,3 - 0,4	9.375	14.250	0,36
0,4 - 0,5	19.375	29.625	0,45
0,5 - 0,6	71.250	108.000	0,55
0,6 - 0,7	176.875	266.875	0,65
0,7 - 0,8	298.750	451.188	0,75
0,8 - 0,9	385.625	584.625	0,85
0,9 - 1,0	460.625	702.125	0,95
1,0 - 1,1	426.250	651.875	1,04
1,1 - 1,2	373.750	576.063	1,14
1,2 - 1,3	257.500	399.813	1,24
1,3 - 1,4	143.125	223.000	1,34
1,4 - 1,5	71.875	112.750	1,44
1,5 - 1,6	40.625	64.438	1,54
1,6 - 1,7	18.125	28.813	1,64
1,7 - 1,8	6.875	10.938	1,74
1,8 - 1,9	1.875	3.000	1,84
1,9 - 5,0	1.250	2.000	2,23
Total	2.778.750	4.253.566	0,99

Sumberdaya terukur bijih nikel dalam satuan ton berdasarkan kadar batas (Tabel 2).

Tabel 2. Hasil estimasi sumberdaya terukur berdasarkan kadar batas, tonase, dan rata-rata kadar

COG	Volume	Sumberdaya Terukur	Rata-rata Kadar Ni
%	m^3	ton	%
0,0	2.778.750	4.253.566	0,99
0,1	2.765.000	4.232.253	1,00
0,3	2.763.125	4.229.378	1,00
0,4	2.753.750	4.215.128	1,00
0,5	2.734.375	4.185.503	1,00
0,6	2.663.125	4.077.503	1,02
0,7	2.486.250	3.810.628	1,04
0,8	2.187.500	3.359.440	1,08
0,9	1.801.875	2.774.815	1,13
1,0	1.341.250	2.072.690	1,19
1,1	915.000	1.420.815	1,26
1,2	541.250	844.752	1,34
1,3	283.750	444.939	1,43
1,4	140.625	221.939	1,52
1,5	68.750	109.189	1,61
1,6	28.125	44.751	1,70
1,7	10.000	15.938	1,82
1,8	3.125	5.000	2,00
1,9	1.250	2.000	2,23

Pengembangan Model Valuasi Ekonomi

Pengembangan model optimasi valuasi ekonomi mengacu pada model Lane (1988), model Gholamnejad (2008) dan memperhitungakan biaya lingkungan serta kebijakan pemerintah (legislasi dan regulasi). Dalam pengembangan model valuasi ekonomi mineral bijih nikel melibatkan struktur rantai proses tambang yang teraktualisasikan dalam rerangka aliran kas.

Penyederhanaan dari penjabaran persamaan aliran kas (Crundwell, 2008; Sasongko, 2013) di atas adalah,

	Pendapatan	*R*	
-	Royalti (x)	*S*	*= xR*
=	Pendapatan bersih	*NR*	*= R-S* *= (1-x)R-R*
-	Biaya operasi total	*TC*	
=	Keuntungan	*P*	*= NR-TC*
-	Penyusutan & amortisasi	*D*	
=	Laba sebelum pajak	*TI*	*= P-D*
-	Pajak	*IT*	*= t(P-D)*
=	Laba setelah pajak	*NI*	*= TI-IT* *= (1-t)(P-D)*
+	Penyusutan & amortisasi	*D*	
=	Aliran kas terproyeksi	*CF*	*= (1-t)(P-D)+D* *= (1-t)P+tD*

Berdasarkan diagram aliran kas di atas hasil akhir,

$$CF = (1 - t)P + tD \quad \text{(Pers. 1)}$$

Notasi-notasi yang digunakan dalam pemodelan dijabarkan dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Notasi pemodelan

Notasi	Satuan	Definisi
s	$/ton	Harga jual unit
m	$/ton	Biaya penambangan
c	$/ton	Biaya pengonsentrasian
r	$/ton	Biaya pemurnian
f	$/tahun	Biaya tetap (*fixed costs*)
Q_m	ton/tahun	Material yang ditambang
Q_c	ton/tahun	Material yang dikonsentrasikan
Q_r	ton/tahun	Material yang dimurnikan
M	ton/tahun	Kapasitas penambangan
C	ton/tahun	Kapasitas pengonsentrasian
R	ton/tahun	Kapasitas pemurnian
T	tahun	Umur tambang; waktu dalam notasi n = 0, 1, …, T
x	%	Royalti
t	%	Pajak (*tax*)
y	%	Faktor perolehan
d	%	Tingkat suku bunga diskonto
D	$/tahun	Depresiasi dan amortisasi

Rantai tambang secara umum terbagi atas tiga tahap (*stage*), yaitu tahap penambangan (*mining stage*), tahap pengonsentrasian (*processing*/*concentrating*/ *miling stage*), dan tahap pemurnian (*refinery stage*). Menurut Lane (1964, 1988), persamaan profit dirumuskan dalam bentuk:

$$P = (s - r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT$$

(Pers. 2)

Berdasarkan uraian Pers. 1 dan Pers. 2, aliran kas (*cash flow*, *CF*) dapat dirumuskan menjadi (Pers. 2):

$$CF = (1 - t)\big((s - r)Q_r - mQ_m - cQ_c - fT\big) + tD$$

(Pers. 3)

Jumlah dari material yang masuk ke tahap pemurnian tergantung oleh jumlah material dari tahap pengonsentrasian, dan jumlah dari material yang masuk ke tahap pengonsentrasian tergantung oleh jumlah material dari tahap penambangan, sehingga $Q_r = \bar{g}yQ_c$. Dengan memperhitungkan biaya lingkungan, pajak dan royalti, dan depresiasi, maka Pers. 3 dituliskan menjadi,

$$CF = (1 - t)\Big(\big((1 - x)(s - r)\big)\bar{g}yQ_c - mQ_m - w(Q_m - Q_c) - cQ_c - fT\Big) + tD$$

(Pers. 4)

Dengan memperhitungkan *discount rate* (*d*) pada aliran kas tahunan, aliran kas terdiskonto atau *discounted cash flow* (DCF) (Pers. 5 dan Pers. 6), maka dapat dituliskan persamaan:

$$DCF = CF\left(\frac{1}{(1 + d)^n}\right)$$

Pers. 5

$$DCF = \Big((1 - t)\Big(\big((1 - x)(s - r)\big)\bar{g}yQ_c - mQ_m - w(Q_m - Q_c) - cQ_c - fT\Big) + tD\Big)\left(\frac{1}{(1 + d)^n}\right)$$

Pers. 6

Nilai sekarang bersih (*net present value*, NPV) merupakan metode valuasi ekonomi yang memerhatikan nilai waktu terhadap uang yang ditulis dengan persamaan:

$$NPV = \sum_{n=0}^{N} \frac{CF}{(1 + d)^n}$$

Pers. 7

Keterangan:
NPV = nilai sekarang bersih(*net present value*)
CF = aliran kas (*cash flow*)
d = tingkat suku bunga/ diskonto (*discount rate*)
n = indeks tahun (*n* = 0, ... , *N*)

Metode perhitungan *NPV* menggunakan suku bunga diskonto yang akan mempengaruhi aliran kas (*cash inflow*) (Frederick, 1984). *NPV* menganggap aliran kas di masa yang akan datang dapat diprediksi, meski hal tersebut sebenarnya cukup sulit dilakukan. Optimasi *NPV* yang melibatkan aliran kas terdiskonto, Lane (1988) mendefinisikan *value* (*v*) sebagai fungsi dari dua faktor, yaitu cadangan dan laju ekstraksi (Minnit, 2004). Kedua faktor tersebut juga memengaruhi umur tambang (*T*).

Kadar Batas Optimum

Metode solusi optimum valuasi ekonomi yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada model dan metode Lane (1988) yang diaplikasikan pada model optimasi valuasi ekonomi (Pers. 6) yang ditujukan untuk mendapatkan *NPV* maksimal.

Pada model optimasi valuasi ekonomi (Pers. 6) merupakan fungsi yang memiliki variabel tunggal, yaitu kadar batas rata-tara ($\bar{g}$). Nilai kadar rata-rata yang akan menghasilkan NPV optimum selama umur tambang, secara matematis dapat dicari dengan syarat turunan pertama dari model fungsi *NPV* terhadap kadar sama dengan nol dan turunan kedua bernilai lebih kecil dari nol.

Solusi model sebagai usaha optimasi dengan hasil sebagai berikut:

- Jika kapasitas penambangan menjadi batasan optimasi, maka $T = \frac{Q_m}{M}$, sehingga

$$g_m = \bar{g} = \frac{c - w}{(1 - x)(s - r)y} \quad \text{(Pers. 8)}$$

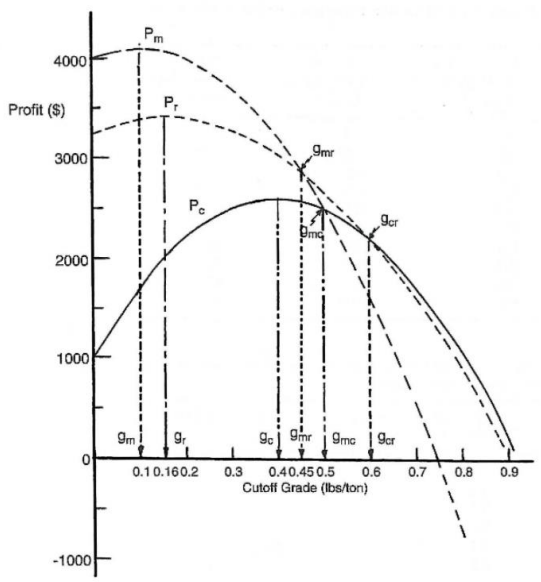
- Jika kapasitas pengonsentrasian menjadi batasan, maka $T = \frac{Q_c}{C}$, sehingga

$$g_c = \bar{g} = \frac{c - w + \frac{f + \frac{tD}{1-t}}{C}}{(1 - x)(s - r)y} \quad \text{(Pers. 9)}$$

- Jika kapasitas pemurnian menjadi batasan optimasi, maka $T = \frac{Q_r}{R} = \frac{\bar{g} y Q_c}{R}$, sehingga

$$g_r = \bar{g} = \frac{c - w}{\left((1 - x)(s - r) - \frac{f + \frac{tD}{1-t}}{R}\right)y} \quad \text{(Pers. 10)}$$

Menurut Lane (1964, 1988), kadar batas optimum adalah satu dari 6 kandidat kadar batas, yaitu 3 kadar ekonomis (g_m, g_c, dan g_r) dan 3 kadar penyeimbang (g_{mc}, g_{mr}, dan g_{cr}). Kandidat-kandidat tersebut dapat dibuat dalam grafik (Gambar 5) untuk mencari perpotongan nilai kadar yang merupakan nilai optimumnya.



Gambar 5. Contoh kurva profit sebagai fungsi kadar batas (Hustrulid *et al*., 2013)

Kadar batas paling optimum dapat dicari setelah keenam kadar batas diketahui, yaitu g_m, g_c, g_r, g_{mc}, g_{cr}, dan g_{mr} dan akan hanya menyisakan tiga kandidat sebagai kadar batas optimum. Ada tiga syarat untuk menjadi kadar batas optimum pada kadar yang berpasangan (g_{mc}, g_{cr}, dan g_{mr}), yaitu:

$$G_{mc}\begin{cases} g_m & \text{if } g_{mc} \le g_m \\ g_c & \text{if } g_{mc} \ge g_c \\ g_{mc} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

$$G_{cr}\begin{cases} g_c & \text{if } g_{cr} \le g_c \\ g_r & \text{if } g_{cr} \ge g_r \\ g_{cr} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

$$G_{mr}\begin{cases} g_m & \text{if } g_{mr} \le g_m \\ g_r & \text{if } g_{mr} \ge g_r \\ g_{mr} & \text{selain di atas} \end{cases}$$

Nilai kadar batas optimum *G* adalah nilai tengah dari ketiga kadar di atas.

$$G = \text{nilai tengah } (G_{mc}, G_{mr}, G_{rc}) \quad \text{(Pers. 11)}$$

Solusi Model Optimasi Valuasi Ekonomi

Karena PV memperhitungkan tingkat suku bunga diskonto (*discount rate*) yang memengaruhi nilainya terhadap waktu, maka ada perbedaan nilai (*v*) pada saat

t = 0, dan *t* = *T* (Hustrulid dan Kuchta, 1995 dalam Osanloo *et al*., 2003), maka untuk optimasi *NPV* atau optimasi valuasi ekonomi dituliskan menjadi (Lane, 1988):

$$v = P - VTd$$

Pers. 12

Dengan cara yang sama seperti sebelumnya, ditentukan g_m, g_c, dan, namun masih memiliki variabel *Vd* yang nilai *V* tersebut belum diketahui. Nilai *V* tersebut tergantung oleh kadarnya, sementara kadarnya tergantung oleh *net present value*. Untuk mendapatkan nilai optimum diperlukan proses iterasi.

Solusi model optimasi kadar batas pada untuk memaksimalkan *NPV* di dapat:

- Jika kapaitas penambangan menjadi batasan, maka $T = \frac{Q_m}{M}$, sehingga

$$g_m = \bar{g} = \frac{c - w}{(1 - x)(s - r)y}$$

(Pers. 13)

- Jika kapasitas pengonsentrasian menjadi batasan, maka $T = \frac{Q_c}{C}$, sehingga

$$g_c = \bar{g} = \frac{c - w + \dfrac{f - \dfrac{(tD - Vd)}{1 - t}}{C} - h}{(1 - x)(s - r)y}$$

(Pers. 14)

- Jika kapasitas pemurnian yang menjadi batasan, maka $T = \frac{Q_r}{R} = \frac{\bar{g}yQ_c}{R}$ sehingga

$$g_r = \bar{g} = \frac{c - w}{\left((1 - x)(s - r) - \dfrac{f - \dfrac{(tD - Vd)}{1 - t}}{R}\right)y}$$

(Pers. 15)

PEMBAHASAN

Optimasi Profit

Perhitungan kadar batas optimum untuk optimasi profit ditentukan menggunakan solusi model Pers. 8 s.d. Pers. 10, serta asumsi parameter ekonomi seperti pada Tabel 4.

Tabel 4. Parameter ekonomi dan nilainya

Notasi	Keterangan	Biaya
s	Harga jual	12.665 $/ton
m	Biaya penambangan	2,60 $/ton
c	Biaya pengonsentrasian	1,15 $/lbs
r	Biaya pemurnian	1,41 $/lbs
w	Biaya penanganan buangan (*waste*) dan limbah	2,00 $/ton
f	Biaya tetap	2,61 $/ton
M	Batasan penambangan	1.000.000 ton/thn
C	Batasan pengonsentrasian	500.000 ton/thn
R	Batasan pemurnian	250.000 ton/thn
T	Umur tambang	
g	Kadar	
Sr	Stripping ratio	
x	Royalti	4%
p	Pajak	30%
y	Recovery rate	30%
d	Discount rate	5,75%
D	Depresiasi	612.759 $/tahun

Perhitungan kadar batas untuk profit optimum dengan menggunakan solusi model Pers. 8, Pers 9 dan Pers. 10), sebagai berikut:

$$g_m = \frac{c - w}{\big((1 - x)(s - r)\big)y} = 0{,}948\%$$

$$g_c = \frac{c - w + \dfrac{f - \dfrac{tD}{1 - t}}{C}}{\big((1 - x)(s - r)\big)y} = 0{,}95\%$$

$$g_r = \frac{c - w}{\left((1 - x)(s - r) - \dfrac{f - \dfrac{tD}{1 - t}}{R}\right)y} = 0{,}949\%$$

Perhitungan profit optimum dilakukan untuk setiap kadar batas dengan distribusi jumlah sumberdaya terukur dan kadar nikel (Tabel 2), seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Perhitungan profit pada masing-masing batasan kapasitas

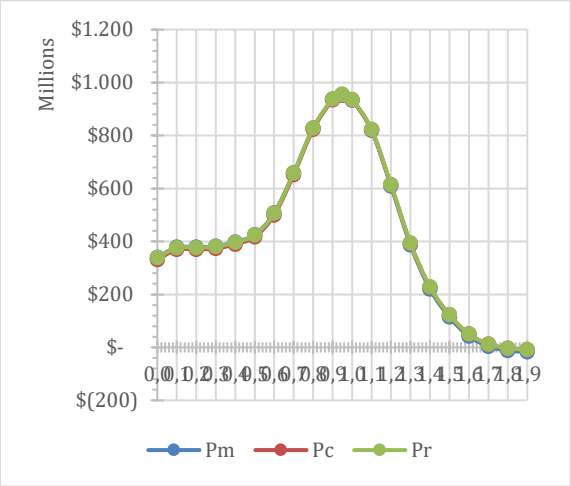
g (%)	Profit		
	Pm ($)	*Pc* ($)	*Pr* ($)
0,0	339.706.683	331.156.171	338.073.863
0,1	378.108.446	369.643.621	376.475.626
0,2	378.108.446	369.643.621	376.475.626
0,3	381.867.464	373.414.197	380.236.447
0,4	397.789.886	389.393.910	396.171.244
0,5	425.822.652	417.545.780	424.236.168
0,6	507.484.940	499.642.272	506.041.743
0,7	658.539.099	651.769.374	657.514.350
0,8	828.135.931	823.180.160	827.927.461
0,9	936.740.606	934.135.260	937.730.853
0,948	953.741.699	952.491.307	955.480.837
0,949	953.735.894	952.513.730	955.491.091
0,95	953.709.275	952.515.340	955.480.557
1,0	933.684.045	933.901.521	936.283.300
1,1	819.304.389	822.142.661	823.539.021
1,2	608.704.996	613.859.270	614.523.773
1,3	386.526.769	393.288.449	393.541.457
1,4	220.207.402	227.865.630	227.942.915
1,5	114.679.247	122.790.775	122.806.411
1,6	42.117.576	50.488.171	50.484.118
1,7	4.194.166	12.680.601	12.674.694
1,8	(12.281.878)	(3.751.469)	(3.755.441)
1,9	(17.371.180)	(8.828.709)	(8.831.427)

- g_m = 0,948%, profit optimum US$953.741.699 (batasan laju penambangan),
- g_c = 0,95%, profit optimum US$952.515.340 (batasan laju pengonsentrasian)
- *gr* = 0,949%, profit optimum US$955.491.091 (batasan laju pemurnian).

Untuk menentukan kadar batas optimum dibuat grafik kurva total profit terhadap fungsi kadar batas. Perpotongan pada kurva menjadi kadar batas penyeimbang yang dipengaruhi lebih dari satu batasan (Gambar 6).

Merujuk pada kurva (Gambar 6), kadar batas yang menjadi penyeimbang nilainya berkisar 0,817% yang ditulis dalam bentuk variabel g_{cr}. Tiga kadar batas penyeimbang adalah sebagai berikut:

$$g_{mc} = 0{,}992\% \sim 0{,}99\%$$
$$g_{cr} = 1{,}2\%$$
$$g_{mr} = 0{,}817\% \sim 0{,}82\%$$



Gambar 6. Kurva total profit berdasarkan fungsi kadar batas dipengaruhi beberapa batasan

Tiga kadar batas dengan batasan kapasitas tunggal dan tiga kadar batas penyeimbang adalah kandidat kadar batas optimum

$$g_m = 0{,}948\%$$
$$g_c = 0{,}95\%$$
$$g_r = 0{,}949\%$$
$$g_{mc} = 0{,}99\%$$
$$g_{cr} = 1{,}2\%$$
$$g_{mr} = 0{,}82\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas yang sudah didapatkan, maka nilai kadar batas optimum *G* adalah nilai tengah dari ketiga kadar di atas (Pers 11).

$$G = \text{nilai tengah } (G_{mc}, G_{mr}, G_{rc}) = 0{,}95\%$$

Kadar *G* 0,95% memiliki nilai kadar rata-rata 1,16%. Laju penambangan 100% menghasilkan,

$$Q_m = 4.253.566$$
$$Q_c = 2.423.753$$
$$Q_r = 843.104$$

Batasan kapasitas mengatur laju dari tahap produksi sehingga lama operasi penambangan pada kapasitas maksimum untuk kadar batas 0,95% adalah 4,85 tahun, dengan profit adalah $P = \$952.515.340$ dengan profit tahunan yaitu $P_y = \$196.495.999$

NPV profit tahunan dengan laju diskonto 5,75% menghasilkan

$$\text{NPV} = \$196.495.999 * \frac{(1+5{,}75\%)^{4{,}85}-1}{5{,}75\% * (1+5{,}75\%)^{4{,}85}}$$

$$\mathbf{NPV} = \$\mathbf{811.248.447}$$

Optimasi Valuasi Ekonomi (Optimasi *NPV*)

Perhitungan kadar batas optimum untuk optimasi *NPV* ditentukan menggunakan solusi model Pers. 13 s.d. Pers. 15, serta asumsi paramter ekonomi seperti pada Tabel 4.

Perhitungan kadar batas optimum sebelumnya menghasilkan nilai kadar batas 0,95%. Adanya beberapa batasan kapasitas memengaruhi *NPV* yang paling optimal. *NPV* tersebut dipengaruhi oleh kadar batas optimum yang berubah-ubah sepanjang umur tambang sehingga menghasilkan profit tahunan yang juga berbeda-beda. Metode perhitungan untuk optimasi *NPV* dijabarkan dalam tahap:

Tahap 1: Kadar batas dihitung dengan mempertimbangkan adanya batasan kapasitas.

$$g_m = 0{,}948\%$$
$$g_c = \frac{2579{,}74 - 0{,}00000016V}{2.716} \quad \text{(Pers. 16)}$$

$$g_r = \frac{2574}{2712{,}57 - 0{,}0000001V} \quad \text{(Pers. 17)}$$

Kadar batas optimum adalah satu di antara enam kandidat kadar batas. Tiga di antara kandidat tersebut adalah kadar batas penyeimbang yang didasarkan pada sebaran kadar material yang ditambang dan kapasitas (Tabel 2). Sedangkan untuk tiga kadar batas lainnya yang didasarkan pada kapasitas dan biaya/harga, pada tahap ini dihitung dengan menggunakan ketiga persamaan di atas. Dari ketiga kadar batas dengan batasan tunggal di atas, g_c dan g_r memiliki variabel *V* yang nilainya belum diketahui, sementara untuk mencari nilai *V*, *g* perlu diketahui. Perhitungan ini menggunakan proses iterasi.

Tahap 2: Perhitungan iterasi dilakukan pada operasi penambangan maksimal, yaitu Q_m = 1.000.000 ton hingga total material 4.253.566 ton yang akan ditambang habis pada tahun ke-*n*. Proses iterasi pada penambangan 1.000.000 ton pertama adalah,

1. Iterasi ke-1, *V* = 0

$$g_{mc} = 0{,}992\%$$
$$g_{cr} = 1{,}2\%$$
$$g_{mr} = 0{,}817\%$$
$$g_m = 0{,}948\%$$
$$g_c = \frac{2579{,}74 - 0{,}00000016V}{2.716} = 0{,}95\%$$
$$g_r = \frac{2574}{2712{,}57 - 0{,}0000001V} = 0{,}949\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas, didapat kadar batas optimum pada iterasi pertama *V* = 0 adalah $0{,}95\%$. Kadar 0,95% memiliki nilai Q_c sebesar 569.817 ton pada penambangan Q_m maksimum 1.000.000 ton. Dengan batasan kapasitas *M* = 1.000.000 ton dan *C* = 500.000, maka nilai Q_c ini melebihi batasan kapasitasnya dan menjadi pengontrol lamanya operasi penambangan. Profitnya dalam 1 tahun adalah $196.495.999$ dengan NPV $US\$811.248.447$. Nilai *V* ini digunakan untuk iterasi kedua.

2. Iterasi ke-2, *V* = $811.248.447

$$g_c = \frac{2579{,}74 - 0{,}00000016V}{2.716} = 1{,}0\%$$
$$g_r = \frac{2574}{2712{,}57 - 0{,}0000001V} = 0{,}98\%$$

Mengikuti syarat kadar batas optimum dari keenam kandidat kadar batas, didapat kadar batas optimum pada iterasi kedua $0{,}992\%$. Jumlah material *Qm* dan *Qc* dengan mempertimbangkan kapasitasnya masing-masing adalah adalah 1.000.000 ton dan 500.000 ton. Keduanya tidak melebihi kapasitas maksimum sehingga tidak diperlukan penyesuaian. Kapasitas penambangan Q_m menjadi pengontrol laju penambangan, sehingga profitnya adalah $US\$223.190.918$ dengan NPV $US\$821.517.493$.

Nilai *V* ini kemudian digunakan untuk iterasi ketiga. Iterasi ketiga menghasilkan nilai kadar batas yang sama yaitu 0,99% sehingga iterasi dihentikan. Kadar batas optimum pada penambangan 1.000.000 ton di tahun pertama adalah 0,99% dengan jumlah material

$$Q_m = 1.000.000 \text{ ton}$$
$$Q_c = 500.000 \text{ ton}$$
$$Q_r = 178.200 \text{ ton}$$

Penambangan pertama sejumlah 1.000.000 ton, ada 487.283 ton material nilainya berada di atas kadar batas optimum 0,99% dengan profit sebesar US$223.190.918. 1.000.000 ton yang ditambang dari total 4.253.566 ton menyisakan material untuk ditambang pada tahun berikutnya sebesar,

$$4.253.566 - 1.000.000 = 3.253.566 \text{ ton}$$

Metode iterasi ini dilakukan setiap tahunnya hingga pada tahun ke-5 didapatkan kadar batas 0,95%. Keseluruhan perhitungan iterasi kadar batas optimum dan *V* menghasilkan lama penambangan 4,44 tahun.

NPV keseluruhan tambang berdasarkan profit tahunannya dengan laju diskonto 5,75% adalah,

$$NPV = \frac{\$223.190.918}{(1+5{,}75\%)^1} + \frac{\$221.329.296}{(1+5{,}75\%)^2} + \frac{\$220.288.643}{(1+5{,}75\%)^3} + \frac{\$219.640.734}{(1+5{,}75\%)^4} + \frac{\$90.648.609}{(1+5{,}75\%)^{4{,}44}}$$
$$\boldsymbol{NPV = \$841.596.460}$$

Pada kadar batas 0,95%, material yang masuk ke pengonsentrasian adalah 2.423.753 ton dari 4.253.566 ton total material. Jumlah material buangannya adalah 1.829.814 ton (Tabel 6) sehingga rasio pengupasannya bernilai 0,75.

Tabel 6. Distribusi kadar dan material yang ditambang setiap tahun

g	T = 1	T = 2	T = 3	T = 4	T = 5
	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95
0,0-0,1					
0,1-0,2					
0,2-0,3					
0,3-0,4					
0,4-0,5	500.000	487.704	456.625	421.663	168.040
0,5-0,6					
0,6-0,7					
0,7-0,8					
0,8-0,9					
0,9-1,0	12.717	18.709	33.853	12.717	30.675
1,0-1,1	153.254	151.369	146.606	153.254	59.397
1,1-1,2	135.431	133.765	129.556	135.431	52.489
1,2-1,3	93.995	92.839	89.918	93.995	36.430
1,3-1,4	52.427	51.782	50.153	52.427	20.319
1,4-1,5	26.507	26.181	25.357	26.507	10.273
1,5-1,6	15.149	14.963	14.492	15.149	5.871
1,6-1,7	6.774	6.691	6.480	6.774	2.625
1,7-1,8	2.571	2.540	2.460	2.571	997
1,8-1,9	705	697	675	705	273
1,9-5,0	470	464	450	470	182
Total	1.000.000	987.704	956.625	921.663	387.574

Kadar batas optimum pada penambangan tahun ke-1 adalah 0,99%. Kadar batas ini terus menurun hingga 0,95% pada tahun ke-5, lama penambangan adalah 4,44 tahun dengan nilai sekarang bersih/ *NPV* optimum sebesar US$841.596.460 (Tabel 7).

Tabel 7. Jadwal rencana produksi

T	COG	Q_m	Q_c	*P* ($)
1	0,99	1.000.000	500.000	223.190.918
2	0,99	987.704	500.000	221.329.296
3	0,98	956.625	500.000	220.288.643
4	0,97	921.663	500.000	219.640.734
5	0,95	387.574	219.533	90.648.609

Optimasi valuasi ekonomi endapan bijih nikel dengan asumi-asumsi dan parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 8.

KESIMPULAN

- Model blok dengan ukuran 25 m x 25 m x 1 m yang dibuat dengan metode estimasi IDW menunjukkan bahwa lokasi didominasi oleh nikel berkadar rendah < 1,0%, terutama pada lapisan limonit. Sebaran kadar > 1,0% tidak terlalu dominan, namun lebih banyak jumlahnya pada lapisan saprolite.
- Model yang dihasilkan merupakan pengembangan model Lane (1988) dan Setiawan & Sasongko (2015) dengan mempertimbangkan royalti, pajak, depresiasi, dan biaya lingkungan.
- Sebagai usaha optimasi profit, dengan asumsi-asumi parameter yang diberikan, kadar batas optimum adalah 0,948% jika dibatasi oleh kapasitas penambangan, 0,95% jika dibatasi oleh kapasitas pengonsentrasian, dan 0,949% jika dibatasi oleh kapasitas pemurnian, dengan umur tambang adalah 4,85 tahun dengan profit tahunan sebesar US$196.495.999. *NPV* selama umur tambang adalah US$811.248.447.
- Optimasi valuasi ekonomi tambang (optimasi *NPV*) menghasilkan kadar batas yang berubah-ubah selama operasi pertambangan; 0,99% pada tahun ke-1; 0,99% pada tahun ke-2; 0,98% pada tahun ke-3, 0,97% pada tahun ke-4; dan 0,95% pada tahun ke-5. Lama operasi tambang adalah 4,44 tahun dengan *NPV* maksimal sebesar US$841.596.460.
- Perbedaan antara optimasi profit (US$811.248.447) dan optimasi *NPV* (US$841.596.460) sebesar US$30.348.013.

Tabel 8. Aliran kas terproyeksi

	Parameter	Tahun 1	Tahun 2	Tahun 3	Tahun 4	Tahun 5
	Pendapatan	$ 2.256.903.000	$ 2.253.103.500	$ 2.250.823.800	$ 2.249.304.000	$ 975.916.205
-	Royalti	$ 90.276.120	$ 90.124.140	$ 90.032.952	$ 89.972.160	$ 39.036.648
=	Pendapatan bersih	$ 2.166.626.880	$ 2.162.979.360	$ 2.160.790.848	$ 2.159.331.840	$ 936.879.557
-	Total biaya operasi	$ 1.848.045.323	$ 1.847.057.262	$ 1.846.355.398	$ 1.845.821.974	$ 807.496.848
=	Keuntungan	$ 318.581.557	$ 315.922.098	$ 314.435.450	$ 313.509.866	$ 129.382.709
-	Penyusutan & amortisasi	$ 612.759	$ 612.759	$ 612.759	$ 612.759	$ 269.042
=	Laba sebelum pajak	$ 317.968.798	$ 315.309.339	$ 313.822.691	$ 312.897.107	$ 129.113.667
-	Pajak	$ 95.390.639	$ 94.592.802	$ 94.146.807	$ 93.869.132	$ 38.734.100
=	Laba setelah pajak	$ 222.578.159	$ 220.716.537	$ 219.675.884	$ 219.027.975	$ 90.379.567
+	Penyusutan & amortisasi	$ 612.759	$ 612.759	$ 612.759	$ 612.759	$ 269.042
=	Aliran kas	$ 223.190.918	$ 221.329.296	$ 220.288.643	$ 219.640.734	$ 90.648.609
=	Aliran kas terdiskonto	$ 211.055.241	$ 197.914.745	$ 186.273.459	$ 175.627.040	$ 70.725.975

DAFTAR PUSTAKA

Asy'ari, M. A. 2011. Geologi dan Estimasi Sumberdaya Endapan Nikel Laterit Dengan Metode IDW (Inverse Distance Weight) dan Kriging Pada Daerah Bahodopi, Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Tesis. Yogyakarta: Program Pasca Sarjana Teknik Geologi FT UGM.

Cetin, E., dan P. A. Dowd. 2013. *Multi-mineral cut-off grade optimization by grid search.* Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy Vol. 113 (8). h. 659–665.

Crundwell, F. K. 2008. Finance for Engineers: Evaluation and Funding of Capital Projects. London: Springer-Verlag London Limited. 622 h.

Gholamnejad, Javad. 2008. *Determination of the Optimum Cutoff Grade Considering Environmental Cost*. J. Int. Environmental Aplication & Science Vol. 3 (3). h. 186–94.

Hustrulid. M., Kuchta, R., Martin. 2013, *Open pit Mine Planning & Design*. CRC Press/Balkema: London

Kržanović, Daniel, Božo Kolonja, & Dejan Stevanović. 2015. *Maximizing the net present value by applying an optimal cut-off grade for long-term planning of the copper open pits*. Acta Montanistica Slovaca Vol. 20 (1). h. 49–61.

Lane, K. F.. 1964. Choosing the Optimum Cut-Off Grade. Quarterly of the Colorado School of Mines. h. 811–829.

Lane, K. F.. 1988. The economic definition of ore, cut-off grade in theory and practice. 156 h.

Osanloo, M., dan M. Ataei. 2003. *Using equivalent grade factors to find the optimum cut-off grades of multiple metal deposits*. Minerals Engineering Vol. 16 (8). h. 771–776.

Osanloo, M., F. Rashidinejad, dan B. Rezai. 2008. *Incorporating environmental issues into optimum cut-off grades modeling at porphyry copper deposits.* Resources Policy Vol. 33 (4). h. 222–229.

Rahimi, Esmaeil, dan Hasan Ghasemzadeh. 2015. *A new algorithm to determine optimum cut-off grades considering technical, economical, environmental and social aspects.* Resources Policy Vol.46. Elsevier. h. 51–63.

Rahimi, Esmaeil, Kazem Oraee, Zia Aldin Shafahi Tonkaboni, dan Hasan Ghasemzadeh. 2014. *Considering environmental costs of copper production in cut-off grades optimization.* Arabian Journal of Geosciences Vol. 8 (9): h. 7109–7123.

Rashidinejad, F., M. Osanloo, dan B. Rezai. 2009. *Cutoff grades optimization with environmental management; a case study: Sungun copper project.* IUST International Journal of Engineering Science Vol. 19 (5). h. 1–13.

Sasongko, W., A. Idrus, dan L. Lintjewas. 2013. *Kajian Kadar Batas Optimum (Optimum Cut-Off Grade) pada Penambangan Nikel Laterit dengan Penjualan dalam Bentuk Material Bijih Mentah.* Annual Engineering Seminar 2013. h. 89–92.

Setiawan, Eko Billy, dan Sasongko, W. 2015. *Pemodelan kadar batas optimum endapan nikel laterit dengan penjualan dalam bentuk konsentrat dan memperhitungkan biaya pengupasan material penutup.* Proceeding Seminar Nasional Kebumian ke-8. h. 854–864.

Simanjuntak, T. O., E. Rusmana, dan J. B. Supandjono. 1994. Geologi Lembar Bungku Skala 1:250.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. 13 h.

Diterima	: 18 Maret 2022
Direvisi	: 20 April 2022
Disetujui	: 31 Mei 2022

MINERALISASI ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA KECAMATAN HUAMUAL, KABUPATEN SERAM BAGIAN BARAT, MALUKU

MINERALIZATION OF CINNABAR DEPOSIT AT TEMBAGA HILL, HUAMUAL DISTRICT, WESTERN SERAM REGENCY, MALUKU

Herfien Samalehu[1], Arifudin Idrus[2], dan Nugroho Imam Setiawan[2]
[1]Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral, Pemerintah Daerah Provinsi Maluku,
[2]Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
ferhin2001@yahoo.com

ABSTRAK

Wilayah Iha – Luhu terletak di bagian barat Pulau Seram, Provinsi Maluku yang berada pada elevasi 9 s.d. 341 meter diatas permukaan laut serta menempati batuan metamof Kompleks Taunusa. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kontrol geologi, karakteristik mineralisasi serta geokimia bijih endapan sinabar di Iha - Luhu. Metode penelitian dimulai dengan kajian studi pustaka, kegiatan investigasi dilapangan (*fieldwork*) untuk pengambilan sampel, pemetaan geologi, alterasi dan mineralisasi serta analisis laboratorium yang meliputi sayatan poles, geokimia bijih (FA/AAS dan ICP-AES, XRF) dan *elemental mapping* (Micro-XRF).

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik endapan sinabar di Iha – Luhu terbentuk dalam dua jenis urat (*fracture-related mineralization*) dan diseminasi (*disseminated*) dalam *host* batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit yang dikontrol oleh sesar - sesar berarah utara barat laut - selatan menenggara dan timur laut - barat daya. Mineralisasi terdiri dari sinabar (±metasinabar), arsenopirit, stibnit, sfalerit, hematit, *minor* pirit±pirhotit dengan *gangue* terdiri dari kuarsa, illit, smektit dan kaolinit. Bijih sinabar mengandung kelimpahan Zn, Sb, Fe, As, menunjukan kehadiran logam mulia (Au) serta kandungan merkuri (Hg) mencapai 72,4%.

Kata kunci: Mineralisasi sinabar, geokimia bijih, *fracture-related mineralization*, *disseminated*, alterasi argilik

ABSTRACT

Iha – Luhu is located in the western part of Seram Island, Maluku which is placed at an elevation of 9 up to 341 meters above sea level and occupies Taunusa Metamorphic Complex. This study aims to study geological control, mineralization characteristics and ore geochemistry of cinnabar deposit in Iha - Luhu. Research method applies a literature review, fieldwork for sampling, geological mapping, alteration & mineralization and laboratory analysis including polished section, ore geochemistry (FA/AAS and ICP-AES, XRF) and elemental mapping (Micro-XRF).

The results showed that characteristics of cinnabar deposits in Iha – Luhu were formed in two type of veins (fracture-related mineralization) and disseminated in metapelites and quartz-muscovite phyllite hostrocks and controlled by NNW-SE and NE- SW trending faults. Mineralization consists of cinnabar (±metacinnabar), arsenopyrite, stibnite, sphalerite, hematite, minor pyrite±pyrrhotite with gangue minerals consisting of quartz, illite, smectite and kaolinite. Cinnabar ore contains an abundance of Zn, Sb, Fe, As, indicating presence of precious metal (gold) and mercury (Hg) content reaching 72.4%.

***Keywords**: Cinnabar mineralization*, *ore geochemistry*, *fracture-related mineralization*, *disseminated*, *argillic alteration*

PENDAHULUAN

Secara administratif lokasi penelitian terletak di Bukit Tembaga, Desa Iha - Luhu, Kecamatan Huamual, Kabupaten Seram Bagian Barat, Provinsi Maluku (Gambar 1). Wilayah penelitian tersusun atas batuan metasedimen dan batuan metamorf berderajat rendah dengan protolith merupakan batuan pelitik (Tjokrosapoetro dkk, 1993 ; Pownall, 2013;2017). Merebaknya eksploitasi sinabar oleh masyarakat pada tahun 2014 mendorong untuk dilakukannya penelitian untuk mengetahui tipe dan karakteristik endapan sinabar yang kemungkinan terindikasi membawa logam emas (*Au - bearing cinnabar*). Selain itu, penelitian pendahuluan mengenai endapan ini belum pernah dilakukan.

Kondisi geologi dan keberadaan mineralisasi di Bukit Tembaga, desa Iha - Luhu dikontrol oleh adanya orientasi struktur geologi yang berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya dengan mekanisme regime *transpression* dan *compressional*. Samalehu (2021) menyatakan bahwa endapan di daerah Iha – Luhu dan sekitarnya merupakan tipe orogenik yang berada pada zona epizonal – mesozonal dengan periode mineralisasinya diperkirakan terbentuk pada kala Miosen akhir – Pliosen. Terangkatnya batuan metamorf ke permukaan melalui mekanisme sesar naik yang kemudian diikuti dengan naiknya larutan magmatik/hidrothermal yang mengisi rekahan dan foliasi batuan metamorf menjadi pemicu keterdapatan endapan ini.

Beberapa endapan sinabar di dunia yang berasosiasi dengan sabuk orogenesa antara lain di Almaden (Hernandez dkk., 1999; Jebrak dan Hernandez, 1995), Levigliani dan Ripa di Italia (Dini dkk., 2021) dan Horny Luby di Ceko (Velebil dan Zacharias, 2013). Tujuan penelitian ini dimaksudkan untuk mengkaji kontrol geologi, karakteristik mineralisasi serta geokimia bijih endapan sinabar di daerah Iha – Luhu.

METODOLOGI

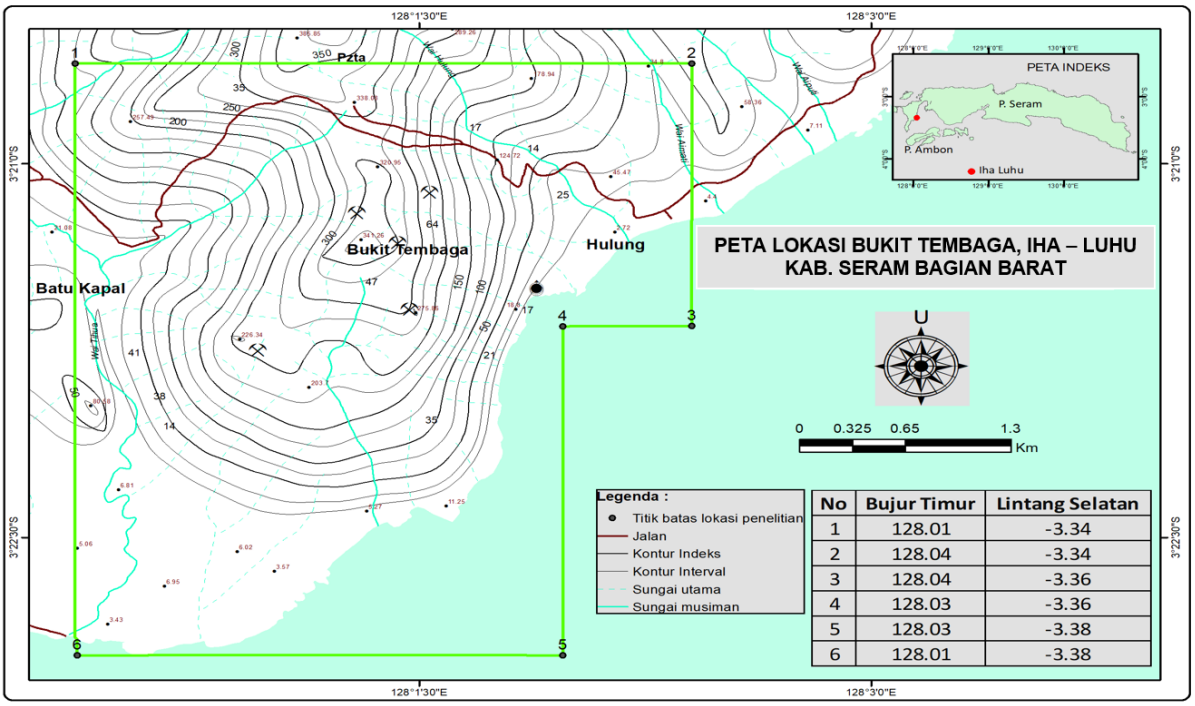
Metodologi penelitian dimulai dengan kajian studi pustaka atau studi literatur, kegiatan penyelidikan dilapangan (*fieldwork*) untuk pengambilan sampel, pemetaan geologi, alterasi dan mineralisasi serta analisis laboratorium. Preparasi dan analisis sayatan poles dilakukan di Universitas Gadjah Mada. Untuk geokimia bijih (FA/AAS dan ICP-AES) dilakukan di ALS,Kanada sedangkan analisis XRF dan Micro-XRF melalui Laboratorium bahan galian di BATAN.

Data sekunder yang terkait dengan wilayah penelitian digunakan untuk studi literatur sebelum melakukan kegiatan lapangan (*fieldtrip*). Untuk kegiatan pemetaan geologi, alterasi dan mineralisasi dilakukan dengan pengamatan, pengukuran, perekaman serta pengambilan sampel. Setelah data lapangan diperoleh, maka dilakukan pengolahan serta analisis data yang dapat mengkaji karakteristik mineralisasi endapan sinabar di daerah penelitian.

GEOLOGI

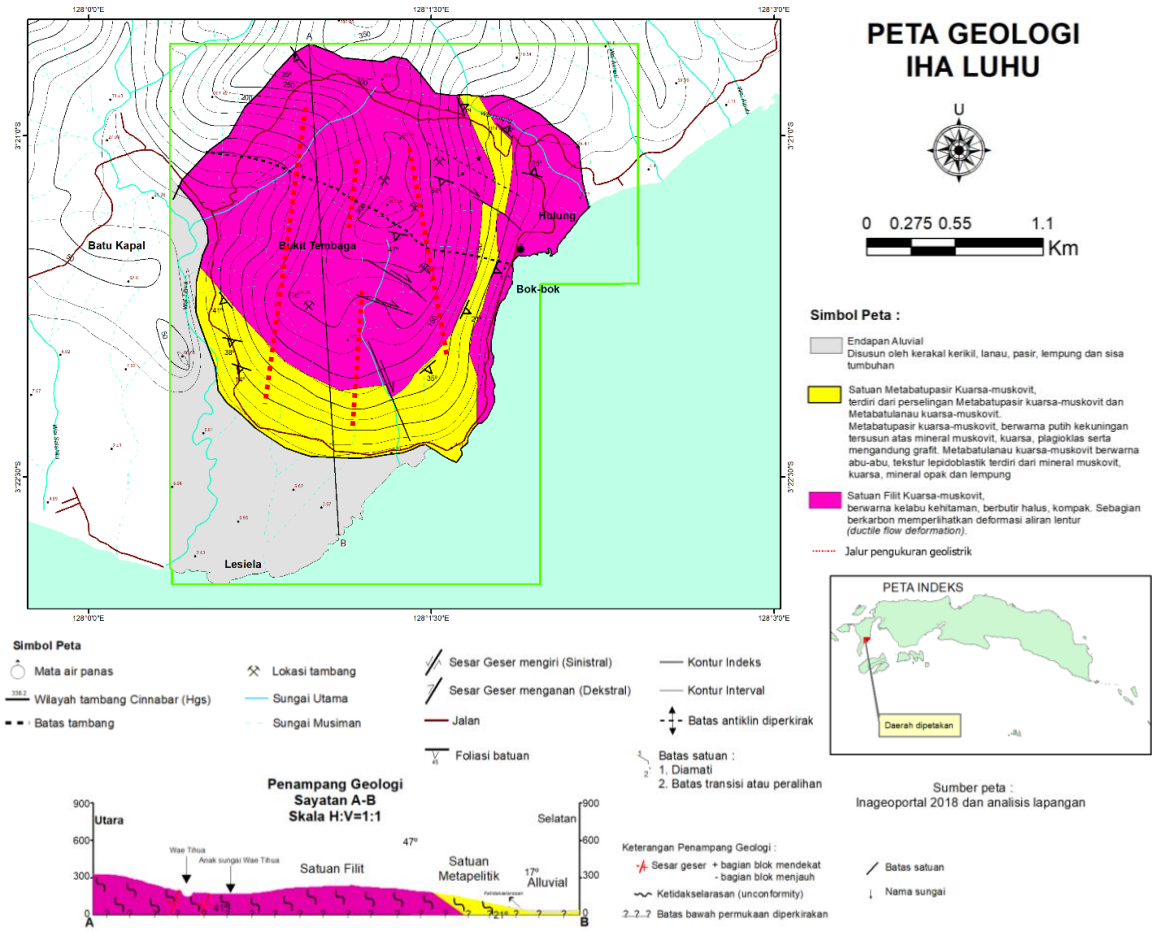
Pulau Seram dan Busur Banda dikenal sebagai zona interaksi antara Lempeng Australia dan Lempeng Eurasia yang merupakan salah satu daerah yang paling menarik karena batas konvergen Busur Banda yang membentuk geometri berbentuk “U” (Patria dan Hall, 2018). Proses deformasi dan metamorfisme di Pulau Seram serta vulkanisme di Pulau Ambon masih sulit untuk dijelaskan dengan model subduksi yang sederhana (Patria dan Hall, 2018).

Stratigrafi Pulau Seram terdiri dari batuan metamorf, sedimen serta batuan terobosan (Tjokrosapoetro dan Budhitrisna, 1982 ; Tjokrosapoetro dkk., 1993 ; Pownall dkk., 2017). Batuan tertua di Pulau Seram merupakan batuan Kompleks Taunusa dan Kompleks Tehoru yang berumur Perm hingga endapan Alluvial.



No	Bujur Timur	Lintang Selatan
1	128.01	-3.34
2	128.04	-3.34
3	128.04	-3.36
4	128.03	-3.36
5	128.03	-3.38
6	128.01	-3.38

Gambar 1. Peta Lokasi penelitian di Bukit Tembaga, Iha-Luhu, Kabupaten Seram Bagian Barat, Provinsi Maluku



Gambar 2. Peta Geologi Daerah Iha–Luhu (Samalehu, 2021)

Selain itu, Kemp dan Mogg (1992) menguraikan secara rinci mengenai tatanan stratigrafi Pulau Seram yang dibagi menjadi batuan Seri Australia (*Australian Series)* dan batuan Seri Seram (*Seram Series*).

Morfologi Iha – Luhu terdiri dari perbukitan berlereng curam hingga landai menempati luas sekitar 9.67 km^2. Penyebaran satuan ini pada bagian utara Bukit Tembaga dan wilayah perbukitan yang memanjang barat - timur dengan ketinggian elevasi rata-rata antara 50 s.d. 341 meter dan persentase kelerengan 30 s.d. 40 %. Litologi penyusunnya yaitu filit dan perselingan batuan metapelitik.

Satuan pedataran rendah memanjang timur - barat yang umumnya merupakan morfologi pedataran pantai. Persentase kelerengan berkisar 0% s.d. 2% dan meliputi daerah Bok-bok, Iha, Batukapal dan Dusun Hulung serta meliputi sungai - sungai utama yaitu Wae Aeputi, Wai Hulung, Wae Airmati, Wae Samhitu dan Wae Tihua (Samalehu, 2021).

Tatanan stratigrafi Iha - Luhu dibagi menjadi satuan Filit kuarsa – muskovit, satuan Meta-batupasir kuarsa-muskovit serta satuan endapan alluvial (Gambar 2).

Filit kuarsa – muskovit berwarna putih kelabu kehitaman, berbutir halus tersusun atas plagioklas, kuarsa, serisit, muskovit, opak, tekstur kristaloblastik - lepidoblastik serta dibeberapa tempat bersisipan dengan urat kuarsa. Di Dusun Hulung, perselingan filit kuarsa – muskovit dan Meta-batupasir kuarsa – muskovit memperlihatkan deformasi aliran lentur *(soft - ductile flow deformation*).

Satuan Metabatupasir kuarsa – muskovit disusun oleh batuan pelitik yang termetamorfisme tingkat rendah dan tersusun atas perselingan Meta-batupasir kuarsa – muskovit dan Meta-batulanau kuarsa – muskovit. Satuan ini menyebar relatif baratlaut – tenggara dan umumnya tersingkap baik disepanjang punggung Bukit Tembaga dan bagian selatan daerah Iha – Luhu.

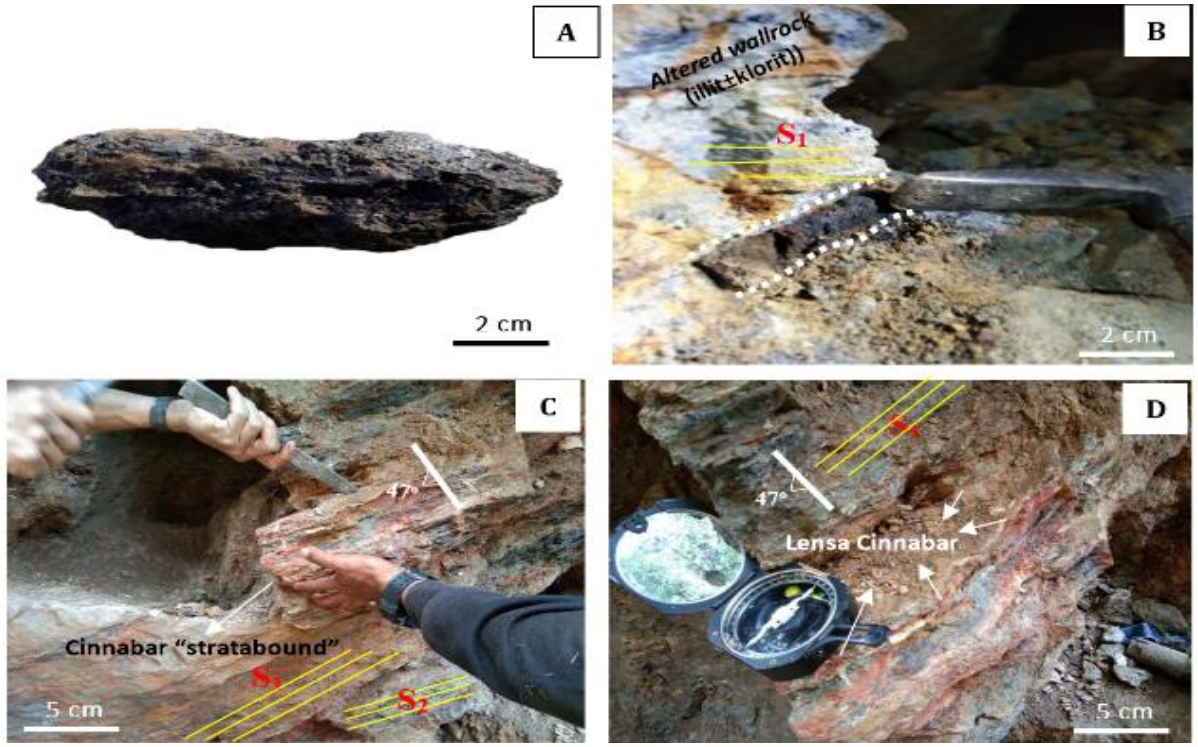
Meta-batupasir kuarsa - muskovit memperlihatkan warna putih kekuningan, berlapis dengan jurus perlapisan (*strike*) berarah timur laut – barat daya dan kemiringan 17 s.d. 41 derajat, ukuran butir pasir halus, tekstur kristaloblastik-lepidoblastik dan terdiri dari komposisi mineral muskovit, kuarsa, lempung dan grafit. Sedangkan ciri fisik lanau malihan berwarna segar abu – abu kehitaman dan coklat kemerahan pada kondisi lapuk, ukuran butir sangat halus (*silt*), tekstur kristaloblastik-lepidoblastik serta tersusun atas komposisi mineral muskovit, kuarsa, dan lempung.

Endapan alluvial merupakan material sedimen dengan ukuran lempung hingga kerakal serta mengandung material sinabar. Warna endapan berwarna abu - abu kecoklatan hingga kemerahan terutama disekitar Dusun Hulung. Karakteristik endapan alluvial bersifat *loose*, terpilah buruk dan lunak yang sebagian besar merupakan material rombakan dengan intensitas pelapukan tinggi serta berkembangnya alterasi argilik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Di wilayah Iha-Luhu, mineralisasi sinabar dominan terbentuk dalam urat (*fracture-related mineralization*) dan diseminasi (*disseminated*) dalam *host* batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit yang dikontrol oleh sesar - sesar berarah utara barat laut - selatan tenggara dan timur laut - barat daya yang terbentuk selama fase orogenesa Miosen Tengah – Pliosen. Mineralisasi terdiri dari sinabar (±metasinabar), arsenopirit, stibnit, sfalerit, hematit, *minor* pirit±pirhotit dengan mineral *gangue* terdiri dari kuarsa, illit, smektit dan kaolinit. Bijih sinabar mengandung kelimpahan unsur Zn, Sb, Fe, As, kehadiran logam mulia Au dan kandungan merkuri (Hg) mencapai 72,4%.



Gambar 3. Mineralisasi di Bukit Tembaga, Iha – Luhu : **A.** Urat metasinabar dengan ketebalan 2 cm, kilap logam, terpetakan pada koordinat pit 128°01'48.7" BT dan 03°21'42.8" LS **B.** Urat metasinabar cenderung memotong foliasi (*cleavage plane,* S_1) dengan ketebalan terukur 2 cm kedalaman 4,4 m pada koordinat *pit* 128°01'48.7" BT dan 03°21'42.8" LS **C.D.** Bijih sinabar terdiseminasi sejajar foliasi (S_1) serta membentuk inklinasi terhadap bidang foliasi (S_2) yang diselimuti (*coated*) oleh limonit, *replacement* pada filit kuarsa-muskovit dengan kedudukan 47°, N122°E difoto ke arah timur laut.

Tabel 1. Kadar bijih sinabar (Bulk) di wilayah Iha – Luhu menggunakan ICP – AES dan Fire Assay

Sampel ID	Hasil anallsls unsur																
	Au	Ag	As	Bi	Ca	Co	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Ni	p	S	Sb	Zn	Hg•
	ppm	ppm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
CNB-LH.01 (urat)	<0,005	1	0,244	0,005	0,01	<0,001	0,003	8,33	0,01	<0,005	0,001	<0,001	0,01	8,76	0,274	0,314	58,94
CNB-LH.02 (urat)	<0,005	1	0,648	0,005	0,01	<0,001	0,001	8,40	<0,01	<0,005	0,001	<0,001	0,01	9,42	1,345	0,335	62,28
CNB-LH.03 (urat)	<0,005	1	0,275	0,005	0,01	0,001	0,002	3,47	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	11,75	0,513	0,360	71,71
CNB-LH.04 (urat)	0,011	1	0,154	<0,005	0,01	0,001	0,007	2,64	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	13,30	0,588	0,405	72,47
CNB-LH.05 (urat)	0,018	1	0,068	<0,005	0,01	0,001	0,003	1,23	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	14,15	0,146	0,374	54,99
CNB-LH.06 (urat)	0,020	2	0,103	<0,005	0,01	0,001	0,004	1,91	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	13,80	0,251	0,363	55,35
CNB-LH.07 (urat)	0,395	6	0,337	<0,005	0,01	0,001	0,006	8,89	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	0,01	11,65	0,063	0,371	62,17
CNB-IHA.01 (urat)	<0,005	1	0,268	0,005	0,01	<0,001	0,003	6,39	0,01	<0,005	0,001	<0,001	<0,01	9,41	1,895	0,209	60,13
CNB-IHA.02 (urat)	<0,005	1	0,197	0,005	0,01	<0,001	0,002	7,33	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	12	0,152	0,525	68,84
CNB-IHA.03 (urat)	0,124	1	0,269	<0,005	0,001	0,001	<0,001	4,24	<0,01	<0,01	<0,001	<0,001	<0,01	11,40	0,244	0,381	69,53
CNB-IHA.04 (urat)	<0,005	1	0,406	0,005	0,01	<0,001	0,002	7,02	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	0,01	10,85	0,273	0,342	67,74
CNB-IHA.05 (urat)	0,010	1	0,147	<0,005	0,01	<0,001	0,001	7,53	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	12,20	0,049	0,567	60,13
CNB-IHA.06 (urat)	0,033	2	0,658	<0,005	0,01	0,001	0,001	8,45	<0,01	<0,005	0,002	0,001	0,01	11,15	1,035	0,450	68,84
CNB-IHA.10 *(diseminated)*	<0,001	1	0,246	<0,005	0,01	<0,001	0,001	5,56	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	0,01	<0,05	0,198	<0,002	0,13
CNB-IHA.11 *(diseminated)*	0,002	1	0,158	<0,005	0,01	<0,001	0,001	4,14	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	0,01	0,05	0,117	<0,002	0,16
RMT.01 (ural)	<0,005	1	0,443	0,005	0,01	<0,001	0,007	17,80	0,01	<0,005	0,001	0,001	<0,01	0,22	0,204	0,005	13,57
ARK-02 (urat)	0,026	4	0,130	<0,005	0,01	<0,001	0,001	2,85	<0,01	<0,005	<0,001	<0,001	<0,01	13,20	0,123	0,292	7,27

Ket : - * Nilai Hg berdasarkan analisis XRF semikualitatif yang dilakukan di BATAN
- Kadar Cd < 0.001% sedangkan Pb dan Ti < 0.005%

Urat – urat sinabar di Bukit Tembaga berkembang dalam bentuk mineralisasi vein dan *stockwork* serta menipis ke kedalaman dangkal dengan ketebalan 3 s.d. 12 cm, urat metasinabar cenderung memotong foliasi (*cleavage plane,* S_1) dengan ketebalan terukur 2 s.d. 5 cm (Gambar 3A-B), sedangkan biji *disseminated* membentuk endapan *stratabound* yang sejajar dengan foliasi batuan metamorf. Pada beberapa singkapan dipermukaan bijih sinabar *disseminated* mengisi foliasi filit kuarsa - muskovit dengan ketebalan ±2 cm dan diselimuti (*coated*) oleh limonit, *replacement* pada batuan samping (*wall-rock*) dan menunjukan zona oksidasi (Gambar 3C-D). Tabel 1. menunjukan kadar bijih sinabar (*bulk*) di wilayah Iha – Luhu menggunakan ICP - AES dan Fire Assay.

PEMBAHASAN

Karakteristik urat mineralisasi dan tekstur bijih Iha – Luhu

Jenis urat yang ditemukan di wilayah Iha – Luhu merupakan urat sinabar /metasinabar dan urat kuarsa yang berasosiasi dengan alterasi argilik (Samalehu dkk., 2021). Urat kuarsa yang hadir pada batuan merupakan urat yang berasal dari aktivitas hidrotermal. Urat kuarsa yang merupakan mineral *gangue* endapan sinabar berbentuk masif, kristalin dan melensa. Urat yang dijumpai memiliki karakteristik berwarna cerah - *milky,* ketebalan 5 s.d. 20 cm, dan beberapa urat berukuran kecil yang menunjukan arah orientasi yang cenderung sejajar (*concordant*) serta memotong (*discordant*) foliasi batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit.

Berdasarkan pengukuran dilapangan, arah sebaran urat-urat sinabar menunjukan penyebaran timur laut-baratdaya (umumnya N47ºE, N50ºE, N60ºE), saling memotong (*cross-cutting*), *irreguler vein* (*stockwork*) dengan kemiringan 35 s.d. 40 derajat dan ketebalan urat 3 s.d. 12 cm. Secara umum, pelamparan zona mineralisasi sinabar di Bukit Tembaga terbagi 4 zona mineralisasi dengan luas masing-masing 230 m, 500 m, 800 m dan 1 km. Luasnya mineralisasi di Bukit Tembaga seiring dengan intensitas alterasi yang terbentuk di daerah penelitian. Urat – urat sinabar yang dominan memotong foliasi batuan memiliki karakteristik berasosiasi dengan alterasi ilit±klorit. Berdasarkan data penggalian bawah permukaan (*pit/shaft*), kedalaman bijih pada zona/kedalaman vertikal didominasi pada kedalaman 100 meter, 85 meter hingga kedalaman dangkal < 20 meter (Samalehu, 2021).

Arah urat menunjukan bahwa pembentukan urat – urat sinabar yang tersebar secara luas di Bukit Tembaga memiliki keterkaitan dengan sesar – sesar dilokasi penelitian yang berarah utara barat laut - selatan tenggara dan utara timur laut - selatan barat daya.

Berdasarkan hasil analisis mikroskopis bijih, terdapat 3 tekstur bijih endapan sinabar yaitu *intergrowth*, pengisian rongga/retakan (*open space filling*) dan penggantian (*replacement*). Tekstur pengisian rongga/retakan terbentuk pada sfalerit yang mengisi retakan stibnit dan sinabar. Bentuk pengisian rongganya berbentuk acak dan menyelubungi sinabar. Tekstur *intergrowth*, terbentuk pada stibnit dengan batas kristal dengan sinabar serta tekstur *replacement* dimana sfalerit terlihat mengganti sinabar pada bagian tepi (*fringe*).

Mineralisasi bijih Iha - Luhu (Bukit Tembaga)

Mineralisasi sinabar di wilayah Iha - Luhu yang berlokasi pada Bukit Tembaga terbentuk dominan pada urat dan *stockwork* serta *disseminated.* Mineralisasi *disseminated* pada endapan sinabar sejajar dan mengisi foliasi filit kuarsa-muskovit serta hadir mengisi porositas batuan metapelitik. Tubuh bijih sinabar yang terdiseminasi pada *host-rock* menunjukan *replacement* dan fase transisi.

Velebil dan Zacharias (2013) menyatakan bahwa fase transisi pada mineralisasi sinabar terjadi karena kontak tubuh bijih sinabar dengan batuan *host* yang termineralisasi lemah. Lensa bijih *disseminated* berlapis, sejajar bidang foliasi dengan ketebalan mencapai < 45 cm dan tersingkap baik pada punggungan Bukit Tembaga. Sebaran lensa bijih ini searah dengan *strike* filit kuarsa-muskovit 47º, N122ºE yang terukur pada stasiun IHA-18 dan LH.10 (Gambar 3C-D). Pada fase mineralisasi, porositas dan permeabilitas dalam meta-batupasir kuarsa-muskovit serta foliasi pada filit kuarsa-muskovit yang terbentuk sejajar tubuh biji menentukan luasan endapan sinabar. Hal ini menunjukan bahwa tubuh bijih urat, *stockwork* dan *disseminated* yang terbentuk sangat tergantung pada porositas dan permeabilitas batuan induk. Selain itu, endapan sinabar berskala besar dipengaruhi oleh luasan sebaran batuan tudung atau *seal* yang berasosiasi dengan lipatan (Rytuba,1986 ; Rytuba dkk.,1988). Oleh sebab itu, zona antiklin dibagian timur bukit Tembaga diperkirakan memiliki ketebalan endapan *disseminated stratabound* yang intensif, tebal dan luas pada sayap lipatan.

Mineralisasi bijih sinabar di Bukit Tembaga Iha – Luhu berdasarkan analisis sayatan poles menunjukan kehadiran mineral Sinabar (HgS), Stibnit (Sb_2S_3), Sfalerit (ZnS), Pirit (FeS_2), Pirhotit (FeS_x), dan mineral oksida limonit ($FeO(OH).nH_2O$). Limonit sebagai mineral oksida dominan mengganti sulfida-Fe seperti pirit dan pirhotit atau unsur minor Fe pada sinabar.

Pada analisis mikrokopis biji belum ditemukan mineral arsenopirit dan emas namun mineral ini kemungkinan hadir dengan jumlah yang terbatas. Hal ini berdasarkan analisis kimia bijih sinabar (Tabel.1) dan data XRD menunjukkan kehadiran mineral tersebut. Hasil analisis mikroskopi bijih dan *elemental mapping* disajikan pada Gambar 4.

Analisis kadar dan kimia bijih sinabar

Berdasarkan analisis data geokimia bijih Sinabar di Bukit Tembaga menunjukkan bahwa variasi kadar Hg mencapai 0,13% - 72,47% (Tabel.1) dengan asosiasi logam mulia emas (Au) dan perak (Ag) mencapai 0,395 ppm dan 6 ppm. Kadar logam mulia tertinggi terdapat pada sampel CNB-LH.07. Pengayaan logam mulia tidak diikuti dengan kenaikan kadar logam dasar dimana menunjukan nilai yang cenderung rendah khususnya timbal (Pb) dan tembaga (Cu) sedangkan kadar Seng (Zn) dapat mencapai 0,0525 % atau 525 ppm. Selain itu, kadar antimoni (Sb) dan beberapa unsur minor dalam sinabar juga mengalami peningkatan. Kadar antimoni (Sb) bervariasi dari 0,049 s.d. 1,895%, Fe mencapai 17.80%, As memiliki kadar tertinggi 0,658%, sedangkan belerang (S) bervariasi dari 0.22 s.d. 14.15%.

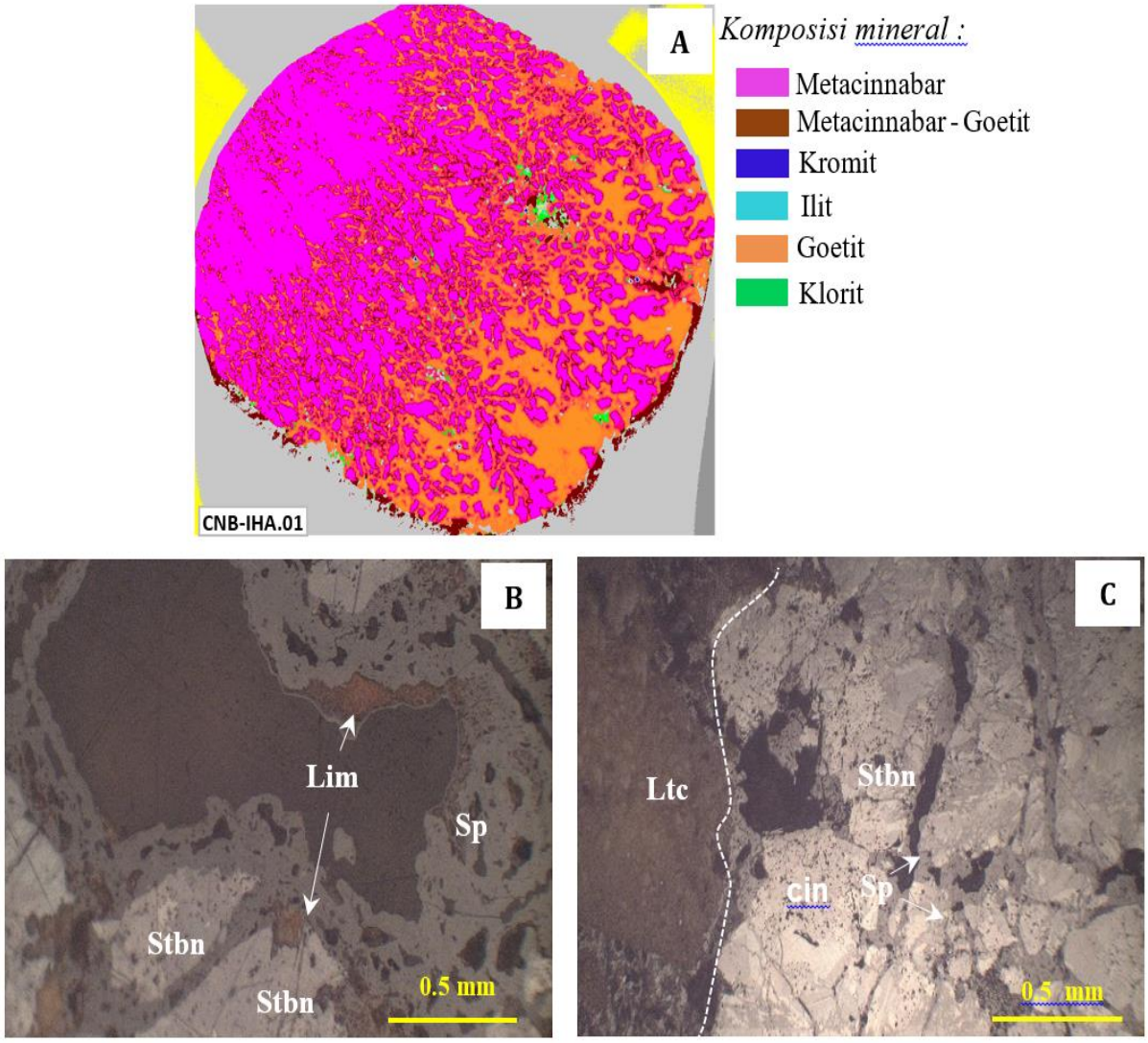
Pada bijih sinabar tipe urat menunjukan pengayaan unsur merkuri (Hg) yang bervariasi mencapai 7,27% s.d. 72,74% sedangkan bijih sinabar tipe *disseminated* menunjukan kadar merkuri (Hg) rendah berkisar 0,13 s.d. 0,16%. Kadar merkuti (Hg) yang rendah pada tipe *disseminated* disebabkan keberadaan endapan berada diatas permukaan yang dipengaruhi oleh proses pengayaan *supergen* atau pelapukan yang intensif. Selain itu, kedudukan muka air tanah yang dangkal memungkinkan merkuri (Hg) dapat kemudian larut dipermukaan tanah.

Paragenesa

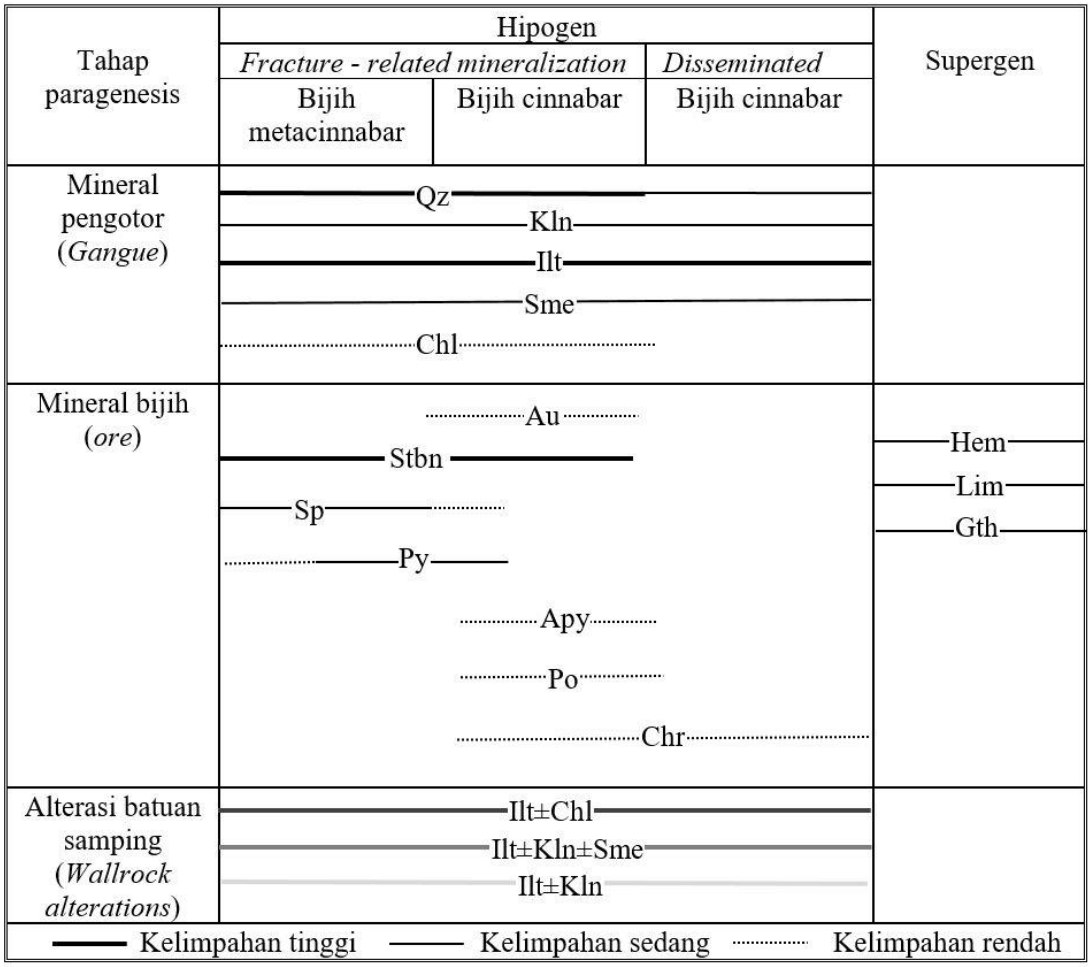
Berdasarkan analisis tekstur dan *elemental mapping* endapan biji sinabar maka tahapan paragenesa mineralisasi urat di Iha – Luhu dapat diinterpretasi dan disajikan pada Gambar 5. Tekstur pengisian rongga/retakan (*open space filling*) pada sfalerit dan pirit yang mengisi retakan stibnit dan sinabar mengindikasikan sinabar dan stibnit terbentuk terlebih dahulu daripada sfalerit

dan pirit. Tekstur *intergrowth* pada stibnit dan sinabar mengindikasikan paragenesa pembentukannya sama. Keberadaan pirit dan pirhotit menunjukan *interlocking* sehingga paragenesa pirit dan pirhotit bersamaan. Paragenesa emas dan arsenopirit belum memiliki korelasi dengan sinabar, namun paragenesanya dianggap simultan dengan pembentukan bijih sfalerit. Tekstur *replacement* terhadap pengayaan *supergen* terbentuk pada gutit yang menggantikan pirit serta kehadiran hematit, limonit dan gutit yang terbentuk pada fase akhir (zona *supergen*).

Selain itu, adanya mineral kromit yang terdeteksi dari *elemental mapping* diperkirakan karena adanya interaksi endapan ini dengan batuan ultramafik (JKU).



Gambar 4. Mikroskopi bijih di Bukit tembaga, Iha – Luhu. **A.** *Elemental mapping* sampel CNB-IHA.01 yang menunjukkan kehadiran mineral kromit yang berasosiasi dengan alterasi ilit±klorit di Iha – Luhu. **B.** Sfalerit yang hadir mengisi *fracture* dalam sinabar dan stibnit serta limonit hadir sebagai mineral oksida menggantikan sfalerit dan sinabar pada sampel CNB-IHA.06. **C.** Sfalerit mengisi *fracture* pada stibnit dan sinabar pada sampel CNB-LH.02. Sp = Sfalerit, Stbn = Stibnit, Cin = sinabar, Lim=limonit, Po = Pirhotit, Py = pirit, Ltc = *Lithick*.



Gambar 5. Tahap paragenesis mineralisasi urat di Iha – Luhu

KESIMPULAN

Karakteristik sinabar di Bukit Tembaga, Iha – Luhu terbentuk dalam 2 jenis urat (*fracture-related mineralization*) dan diseminasi (*disseminated*) dengan *host* batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit. Secara umum keterdapatan sinabar dikontrol oleh sesar berarah utara barat laut - selatan tenggara dan timur laut - barat daya. Mineralisasi terdiri dari sinabar (±metasinabar), arsenopirit, stibnit, sfalerit, hematit, *minor* pirit±pirhotit. Bijih sinabar mengandung kelimpahan Zn, Sb, Fe, As, menunjukan kehadiran logam mulia (Au) serta kandungan merkuri (Hg) mencapai 72,4%. Pada bijih sinabar tipe urat menunjukan pengayaan unsur merkuri (Hg) yang bervariasi mencapai 7,27% s.d. 72,74% sedangkan bijih sinabar tipe *disseminated* menunjukan kadar merkuri (Hg) rendah 0,13 s.d. 0,16%. Disarankan melakukan survey geolistrik tahanan jenis dimasa mendatang untuk menentukan aspek luasan endapan lebih detail.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pemerintah Daerah Provinsi Maluku dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membantu dalam pembiayaan penelitian ini. Tak lupa juga kami ucapkan terimakasih kepada Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta untuk penggunaan fasilitas Laboratorium. Selain itu, terimakasih atas dukungan Tim teknis Bidang Geologi pada Dinas ESDM Maluku, Pak Oki Verdiansyah dan Pak I Gede Sukadana yang telah membantu analisis dan kegiatan dilapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Dini, A., Benvenuti, M., Lattanzi, P., Tanelli, G., 2001. Mercury deposits in metamorphic settings; the example of Levigliani and Ripa mines, Apuane alps (Tuscany, Italy). *Ore geology review*, 18, 149-167.

Hernandez, A., Jebrek, M., Higueras, P., Oyarzun, R., Morata, D., Munha, J., 1999. The Almaden mercury mining district-Spain. *Miner depos*, 34, 539-548

Jebrak, M., Hernandes, A., 1995. Tectonic deposition of mercury in the Almaden district, Las Cuevas deposit, Spain. *Miner depos*, 30, 413-423.

Kemp, G., Mogg, W., 1992. A re-appraisal of the geology, tectonics and prospectivity of Seram Island, Eastern Indonesia. *Proceedings of Indonesian Petroleum Association* 21st Annual Convention, 521–552

Patria, A., Hall, R. 2018. Oblique Intraplate Convergence of the Seram Trough, Indonesia. *Bulletin of the Marine Geology*, 33, 41 – 58

Pownall, J.M., Hall, R. and Watkinson, I.M. 2013. Extreme extension across Seram and Ambon, eastern Indonesia : evidence for Banda slab rollback. Solid Earth, 4: 277–314.

Pownall, J.M., Forster, M.A., Hall, R., Watkinson I.M., 2017. Tectonometamorphic evolution of Seram and Ambon, eastern Indonesia: Insights from $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology. *Gondwana research*, 44, 35-53

Rytuba, J.J., 1986. Descriptive model of silica-carbonate Hg, *in* Cox, D.P., singer, D.A., mineral deposit models. *U.S. geological survey bulletin 1693*, 181

Rytuba, J.J., Rye, R.O., Hernandez, A.M., Deen, J.A., Arribas, A., Sr., 1988, Genesis of Almaden-type mercury deposits, Almaden-Spain. *28th International Geologic Congress abstracts with program*, 2-741

Samalehu, H., 2021. Geologi, karakteristik dan mineralisasi hidrotermal batuan metamorf kompleks Tehoru dan Taunusa di Pulau Seram, Indonesia. *Disertasi*. Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Tjokrosapoetro, S., Achdan, A., Suwitodirdjo, S., Rusmana, E.,Abidin, H.Z., 1993. Pemetaan Geologi lembar Masohi sekala 1 : 250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Tjokrosapoetro, S., Budhitrisna, T., 1982. Geology and tectonics of the northern Banda Arc. *Bulletin of the Indonesian Geological Research and Development Centre*, 6, 1–17.

Velebil, D., Zacharias, J., 2013. Fluid inclusion study of the Horny Luby cinnabar deposit, saxothuringian Zone, Bohemian Massif : clues for the metamorphic remobilization of mercury. *Journal of geoscience*, 58, 283-298.

Diterima	: 17 Maret 2022
Direvisi	: 13 April 2022
Disetujui	: 31 Mei 2022

CORRELATION BETWEEN 3-D MAGNETOTELLURIC INVERSION MODEL WITH DRILLING DATA IN PATUHA GEOTHERMAL FIELD

KORELASI ANTARA PEMODELAN INVERSI 3-D MAGNETOTELLURIK DENGAN DATA SUMUR DI LAPANGAN PANAS BUMI PATUHA

Chevy Iskandar[1,2] **and Yunus Daud**[1]
[1]Geothermal Exploration Magister Program, Graduate Study Program of Physical Sciences, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Indonesia, Kampus Depok 16424, Indonesia
[2] PT Geo Dipa Energi (Persero), Aldevco Octagon Building 2nd Floor, South Jakarta
ydaud@sci.ui.ac.id

ABSTRACT

The Patuha geothermal field is located in West Java Province, Indonesia and developed by state owned company PT Geo Dipa Energi (Persero). The Commercial Operation Date (COD) for Patuha was in September 2014 with plant capacity of 1x60 MW. Until now, Patuha Unit I geothermal field has been running for almost 7 years. The current production wells have experienced a natural decline, which is showed by a reduction in production capacity to the initial production. This causes the steam supply to the Power Plant Unit I to be not optimal, so a make-up well program is needed. Furthermore, to support the addition of electricity production capacity from geothermal energy in Indonesia, the development of the Patuha Geothermal Field is planned to be carried out for the next Power Plant Unit's expansion (Unit 2 and Unit 3). Nevertheless, determining the location for both make-up and development drilling might still pose high risks. This is especially because the development area (where production and injection wells are located) is only concentrated in the eastern area of the contract area. Geophysical data especially Magnetotelluric (MT) has an indispensable role considering the limited data and the limited number of existing wells that cover the entire Patuha prospect area. To understanding the subsurface feature and see the correlation between MT model with well results in Patuha Geothermal Field, MT and TDEM survey were conducted in the eastern and western parts of Patuha area with total 100 stations. Considering the complexity of the subsurface condition in volcanic area, 3-D inversion of the MT data will be the most representative approach to investigate geothermal system in Patuha Geothermal Field. An obvious subsurface resistivity distribution revealed by the 3-D inversion showed a good agreement with well results especially in mapping the temperature distribution both vertically and horizontally. Generally, the resistivity distribution consists of a conductive zone (1–10 ohm-m) at the shallow part overlying a reservoir zone with a rather higher resistivity range (20–60 ohm-m). The conductive zone (<10 ohm-m) is correlated with Base of Conductor (BOC) of the wells that indicated by the presence of the argillic mineral. Meanwhile, the resistivity value around 15-20 ohm-m is correlated with Top of Reservoir of the production or injection well which is characterized by the presence of a convective temperature. In addition, from the results of resistivity mapping there is a very good correlation also in determining of reservoir boundary which is characterized by the presence of reverse temperature from the well. These results can be used as a guidance for better development strategy and drilling prognosis for the next drilling campaign especially in the area which limited number of wells.

***Keywords**: Geothermal, 3-D Inversion, Magnetotelluric (MT), Patuha, Well*

ABSTRAK

Lapangan Panas Bumi Patuha terletak di Jawa Barat, Indonesia dan saat ini dikelola oleh PT Geo Dipa Energi (Persero) yang mulai beroperasi sejak September 2014 dengan kapasitas terpasang pembangkit 1x60 MW. Sampai saat ini, lapangan Panas Bumi Patuha Unit I sudah beroperasi selama hampir 7 tahun. Secara umum, kondisi sumur-sumur produksi saat ini sudah mengalami *natural decline,* sehingga terjadi pengurangan kapasitas produksi terhadap produksi awal. Hal ini menyebabkan suplai uap ke Power Plant Unit I menjadi tidak optimal, sehingga dibutuhkan sumur *make-up*. Selain itu, untuk mendukung penambahan kapasitas produksi listrik dari energi panas Bumi di Indonesia, Lapangan Panas Bumi Patuha juga merencanakan untuk melakukan pengembangan lapangan Unit 2 dan 3. Namun, dalam menentukan lokasi pengeboran sumur produksi baik untuk *make-up* maupun rencana pengembangan, masih memiliki resiko cukup tinggi, khususnya di area pengembangan yang sumur-sumur produksi dan injeksinya terkonsentrasi di area timur WKP Patuha. Data geofisika khususnya Magnetotellurik (MT) memiliki peranan yang sangat penting mengingat keterbatasan data dan jumlah sumur yang ada, belum melingkupi keseluruhan prospek area Patuha. Untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dan melihat korelasi antara model MT dengan hasil pengeboran sumur, dilakukan penambahan survei MT dan TDEM dengan jumlah 100 titik yang tersebar di bagian timur dan barat area Patuha. Mengingat kompleksitas kondisi bawah permukaan di daerah ini, pemodelan dengan inversi 3-D MT akan menjadi pendekatan yang paling representatif untuk mendelineasi sistem panas-buminya. Hasil dari struktur resistivitas bawah permukaan yang didapatkan dari hasil inversi 3-D MT, menunjukkan korelasi yang baik dengan data sumur terutama dalam memetakan distribusi temperature, baik secara vertikal maupun horizontal. Secara umum, resistivitas bawah permukaan terdiri dari lapisan penudung (< 10 ohm-m) di bagian atas yang menutupi zona reservoir dengan nilai resistivitas yang sedikit lebih tinggi (20–60 ohm-m). Zona konduktif (< 10 ohm-m) berkorelasi dengan *Base of Conductor* (BOC) sumur yang ditunjukkan dengan kehadiran mineral argilik. Zona nilai resistivitas sekitar 15-20 ohm-m, berkorelasi dengan *Top of Reservoir* (TOR) sumur produksi atau sumur injeksi yang ditandai dengan adanya temperatur konvektif. Selain daripada itu, pada hasil pemetaan resistivitas 3-D MT terdapat korelasi yang sangat baik juga dalam penentuan batas reservoir yang ditandai dengan keberadaan *reverse temperature* dari sumur. Hasil tersebut diharapkan dapat menjadi acuan dalam memberikan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi untuk menentukan target dan prognosis sumur pemboran terutama di area yang jumlah sumurnya masih terbatas.

Kata kunci: Inversi 3-D, Magnetotellurik (MT), Patuha, Panas Bumi, Sumur

INTRODUCTION

Patuha is a steam dominated geothermal field which hosts relatively shallow reservoir with reservoir temperature is around 217-238°C. The Patuha Geothermal Field is situated in West Java Province, Indonesia, about 50 kilometers southwest of Bandung. There are the Wayang Windu, Darajat and Kamojang geothermal fields on the eastern side which are steam dominated fields on well. The Patuha geothermal field is located in a mountainous region extending from west-northwest to east-southeast. In this mountainous region, mountains of which elevations are over 2000 m above the sea level align from northwest to southeast; Mt. Kendeng, Mt. Masigit, Mt. Patuha, Mt. Urug, Mt. Waringin and so on. Patuha Concession Area is around 350 km^2, exclude Cibuni Concession Area which is inside the concession area (Elfina, 2017). Drilling was started by Patuha Power Limited (PPL) with a slim hole campaign in 1996 consist of 17 wells. The field development continued by drilling of big diameter wells until 1998 including of 14 wells.

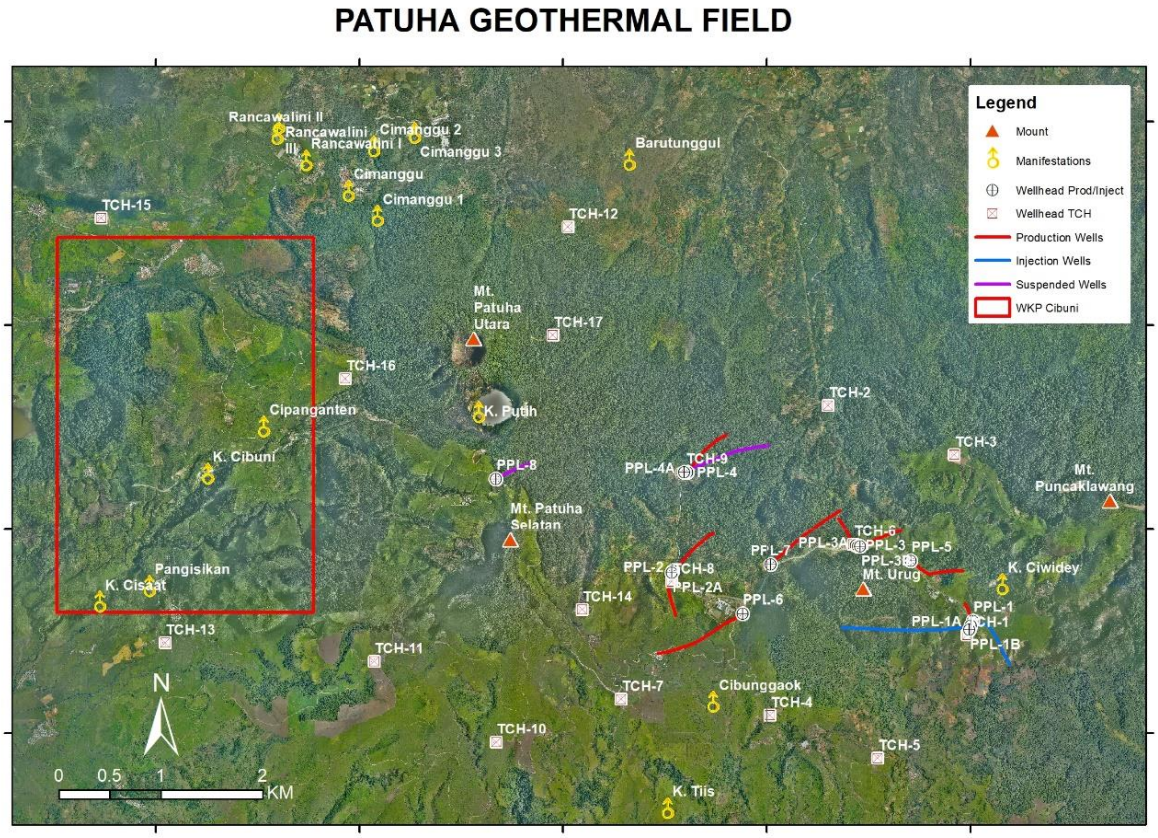


Figure 1. Concession Area of Patuha Geothermal Field

All existing production and injection wells area are located in the eastern part of the field (see Figure 1). Patuha Geothermal Power Plant was started commercial operation on September 22th 2014. MT survey was conducted firstly by Geosystem and PT Tri Bawana Utama (TBU) who did MT acquisition with 35 stations in 1995. Then, in 1997, Geosystem and TBU carried out another MT survey with 85 stations. A TDEM survey was conducted with 255 stations to be able to apply static shift correction to the MT data (Elfina, 2017). After handover process between PPL and PT Geo Dipa Energi (Persero), PT Geo Dipa Energi (Persero) only obtain MT, Gravity, and TDEM surveys report in print form, while raw data of those surveys was not available. In 2013, Elnusa did digitizing and reprocessing MT data because the limitations of MT data from the previous survey.

Several previous research have been performed to delineate geothermal system in Patuha by MT data. Pratama et al. (2015) did a combination of 2-D MT inversion and 2-D forward gravity data to represent the conceptual model based on geophysical data, while Elfina (2017) did updated the conceptual model of the Patuha geothermal field used well data with combined by 3G data. In this study, the latest MT data was used to improve quality of data from the previous MT data in 1997-1998. In 2020, PT Geo Dipa Energi (Persero) were conducted geophysical data of 100 stations MT-TDEM with a station spacing of about 500 meters in the northwest and 1000 meters in the southeast part (existing production and injection area) of Putih Crater.

Moreover, in order to get comprehensive analysis about the geothermal system in the Patuha Geothermal Field and it is correlation with the drilling data (well) result, the 3-D inversion modeling was conducted in this study. MT method was chosen because it is the most powerful

geophysical method to delineate geothermal system model based on resistivity distribution. Subsurface resistivity conditions in the real earth might be very complex. It could vary in all directions, vertically and laterally. So, the modeling using 1-D and 2-D MT inversion approach is not sufficient to represent the real subsurface condition (Daud, 2019). Possible misleading in applying 2-D inversions caused by 3-D subsurface conditions has been studied by demonstrating synthetic data (Siripunvaraporn et al., 2005) as well as real data (Simpson and Bahr, 2005; Cumming and Mackie, 2010).

DATA AND METHODOLOGY

MT data were acquisition using a Phoenix instruments and processed with the frequency about 320 Hz to 0.0001 Hz. It was conducted at 100 stations MT-TDEM (see Figure 2) with a station spacing about 500 meters in the northwest and 1000 meters in the southeast part (existing production and injection area) of Putih Crater with length of acquisition around 12 hours. Providing suitable subsurface resistivity model from MT data is about conducting all the steps in the workflow of MT technology properly Daud, 2020). It was started from provide good survey design and make sure all the instruments and operation procedure are applied properly.

Data processing workflow is beginning with time-series inspection MT data. The next steps are transforming the time-domain data to frequency domain as well as calculating the impedance tensor. The output of the process is apparent resistivity and phase vs frequency curve. The resulted curves usually display a quite low quality at the beginning. Therefore, data selection (cross power selection) should be further conducted (Daud, 2020). Careful selection is recommended rather than auto-processing (automatically processed by software) (Daud et al. 2017). This process takes much time, however could significantly improve the data quality.

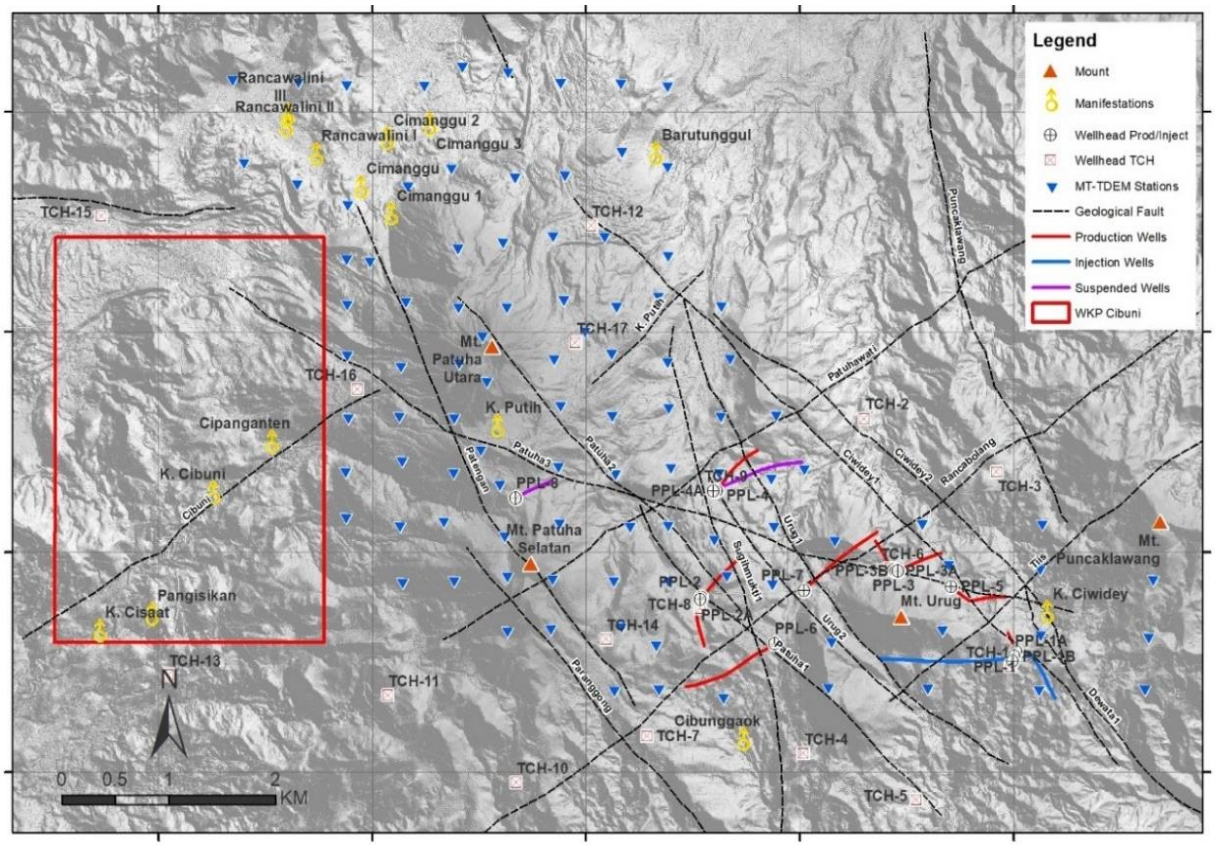


Figure 2. Distribution of MT-TDEM stations with blue solid triangle

The cross power selection was processed in a frequency range of 320 - 0.0001 Hz to get the optimal trend of MT curve. Generally, the quality of MT data after cross power selection has a smooth trend with and without small error bar as seen in Figure 3. It could increase the confidence level as an input data for further modeling. Static shift correction should be conducted before performing data modeling/inversion.

Arnason (2015) and Siripunvaraporn et al. (2005) suggested to conduct static shift correction even before conducting 3-D inversion. Time-domain Electromagnetic (TDEM) data is usually used to conduct the static shift correction. The last step is selecting Modeling/Inversion Scheme. The 3-D MT inversion was performed using a code by Siripunvaraporn that utilizes a data-space variant of the Occam approach (Siripunvaraporn et al., 2005). The 3-D inversion was running with parameters: Full components of impedance tensor, total number of model blocks was 63,360 (48×60×22 blocks) with block size (x,y,z) 200x200x10 meter and padding factor 1.5x1.5x1.5. Initial resistivity model 100 ohm-m homogeneous with an error floor set at 5% also was performed to obtain a good fit between measured and observed data.The complexity of geothermal area in the subsurface, choosing 3-D inversion scheme would be better to overcome such complex 3-D structure.

GEOLOGICAL SETTING AND GEOTHERMAL MANIFESTATIONS

Patuha geothermal field lies within quaternary volcanic zone which is originally formed by the subduction in the south of Java Island. Interaction between Indo Australian plate with Eurasian plate produce java trench which extend from Sumatra Island to the east of Nusa Tenggara, where is the Indo-Australian plate moved to the north beneath the Eurasian plate (Hamilton, 1979). The volcanic axis presumably reflects a deeply penetrating, west to northwest trending structural zone. This may be part of a major structural feature which extends for over 40 kilometers, as indicated by the similar orientation of the mountain range containing the Patuha field (Layman and Soemarinda, 2003). The surface lithology in this area is dominated by the lava flows and andesitic lahar deposits from Patuha volcano and Kendeng mountain (Koesmono et al., 1996).

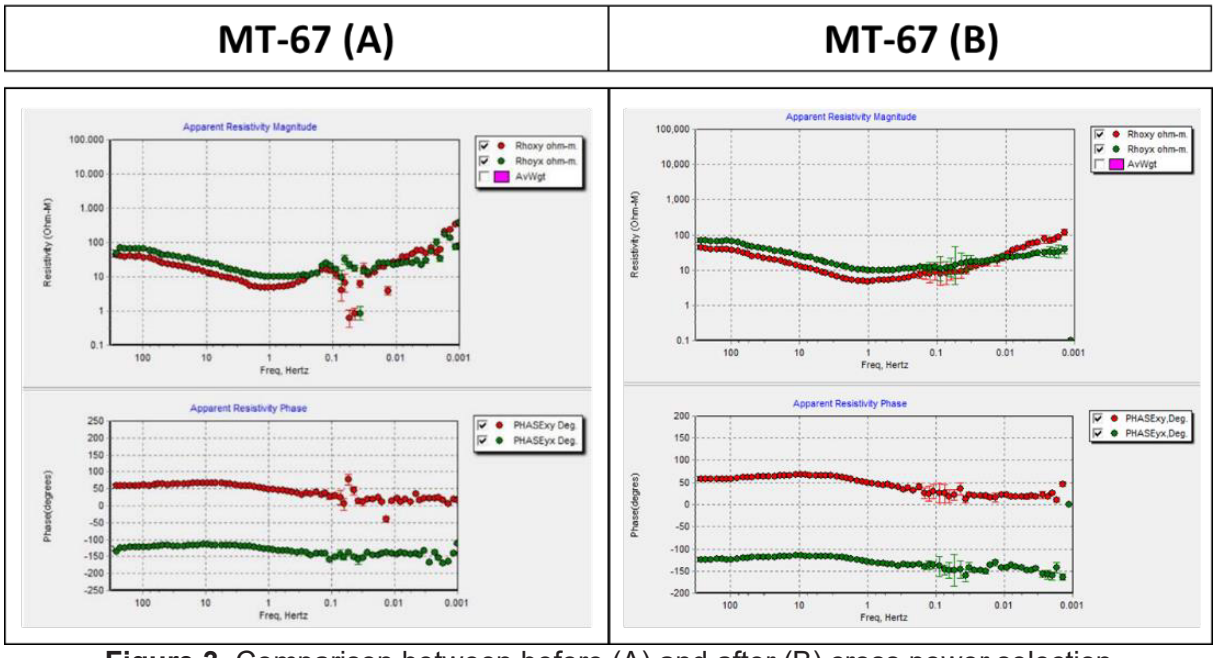


Figure 3. Comparison between before (A) and after (B) cross power selection

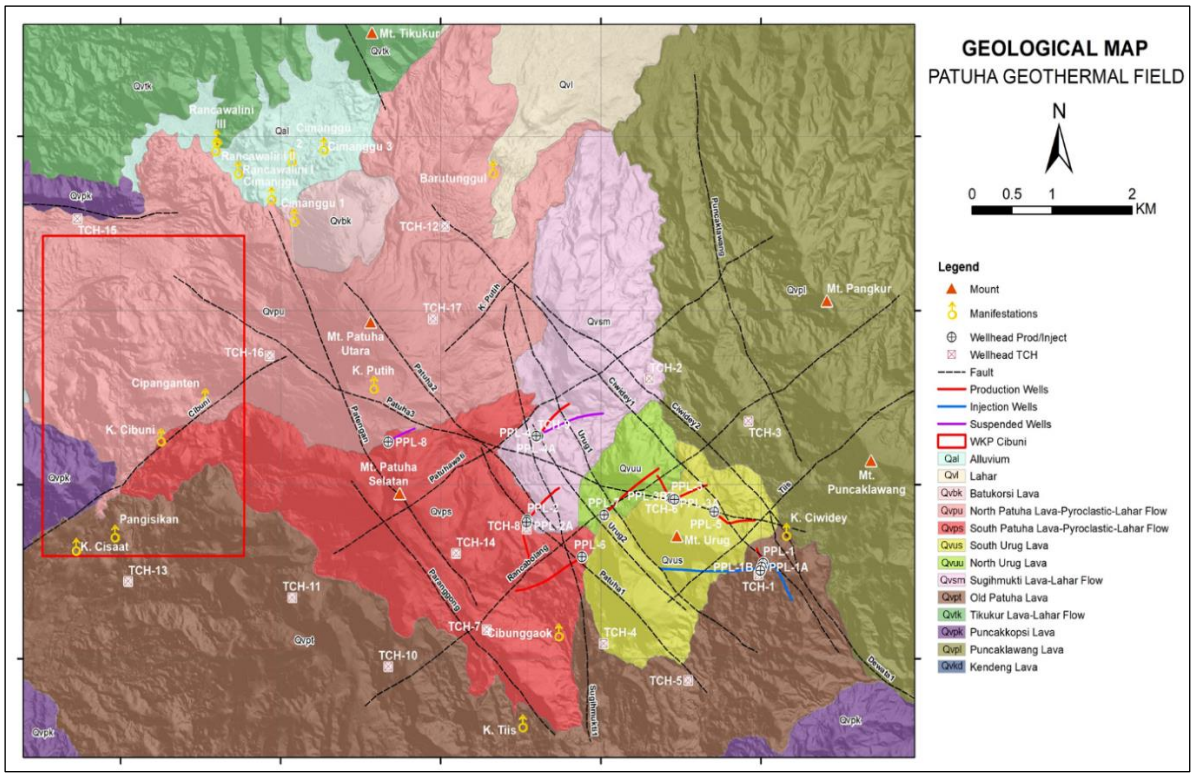


Figure 4. Geological map of Patuha Geothermal Field

Generally, detailed field geology survey identified the volcanic products which constructed the Patuha field are related to Andesite-Basalt and Andesite-Dacite composition in the form of Lava, Breccia, Tuff, and other Pyroclastic types from several complex volcanic activities. There are many thermal manifestations seen on the surface such as fumaroles found in Ciwidey, Cibuni, and solfatara found in Putih Crater, hot springs found in the northern, eastern, western part of the field, warm springs found in northern, western, southern of the field (Figure 4). Kawah Putih are categorized as sulfate-chloride water type with extremely lower pH between 0.5 and 1.

RESULTS AND DISCUSSIONS

RESULTS

Well Data

The reservoir temperature in Patuha is around 217-238°C as indicated by wells. The top of reservoir (TOR) depth is interpreted from the initial state of Pressure and Temperature supported with other data such as location of Feed zones and losses. The result for the TOR depth is shown on Table 1. Table 1 shows the shallow TOR is seen around Ciwidey Crater (near PPL-01) and Putih Crater (near TCH-17 indicated with high temperature) with Range of TOR elevation around 1300 -1000 masl. Subsequently, the deeper gradient or TOR depth is directed to the thermal spring in the North, South West, South and East that indicate the flow trend from the center of the field. There are two wells that have reverse temperature at deep depths, namely PPL-1A (injection well) and PPL-06 (production well). The existence of the reverse temperature can indicate the reservoir boundary in the Patuha Geothermal field (see Figure 5). Figure 5 also shows the distribution of Temperature in Patuha at 1000 masl. The solid line on the temperature contour is delineated by the well data. The dashed line on the temperature contour is generated automatic interpolation by software because limited number of existing wells that cover the entire Patuha prospect area. This can be one of the risk factors in the development plan area in Patuha.

Table 1. List of TOR depth based on review from initial PT well data

Well	Status	TD (masl)	Max Temp (degC)	TOR (masl)	Notes
PPL-01	Production	958	217	1198	-
PPL-1A	Injection	-325	203	1271	PPL-1A has reversal Temperature (175°C)
PPL-1B	Injection	324	172	1329	-
PPL-02	Production	16	238	1230	-
PPL-2A	Production	368	232	1191	-
PPL-03	Production	496	226	1150	-
PPL-3A	Production	1071	228	1234	-
PPL-3B	Production	905	226	1200	-
PPL-04	Production	-116	235 (?)	773	Data quality of PPL-4 is poor
PPL-4A	Suspend	647	-	-	-
PPL-05	Production	452	224	1334	-
PPL-06	Production	-349	222	1238	PPL-06 has reversal Temperature (190°C)
PPL-07	Production	554	227	1089	-
PPL-08	Suspend	1325	-	-	-
TCH-17	Idle	1289	218	1250	Possible TOR

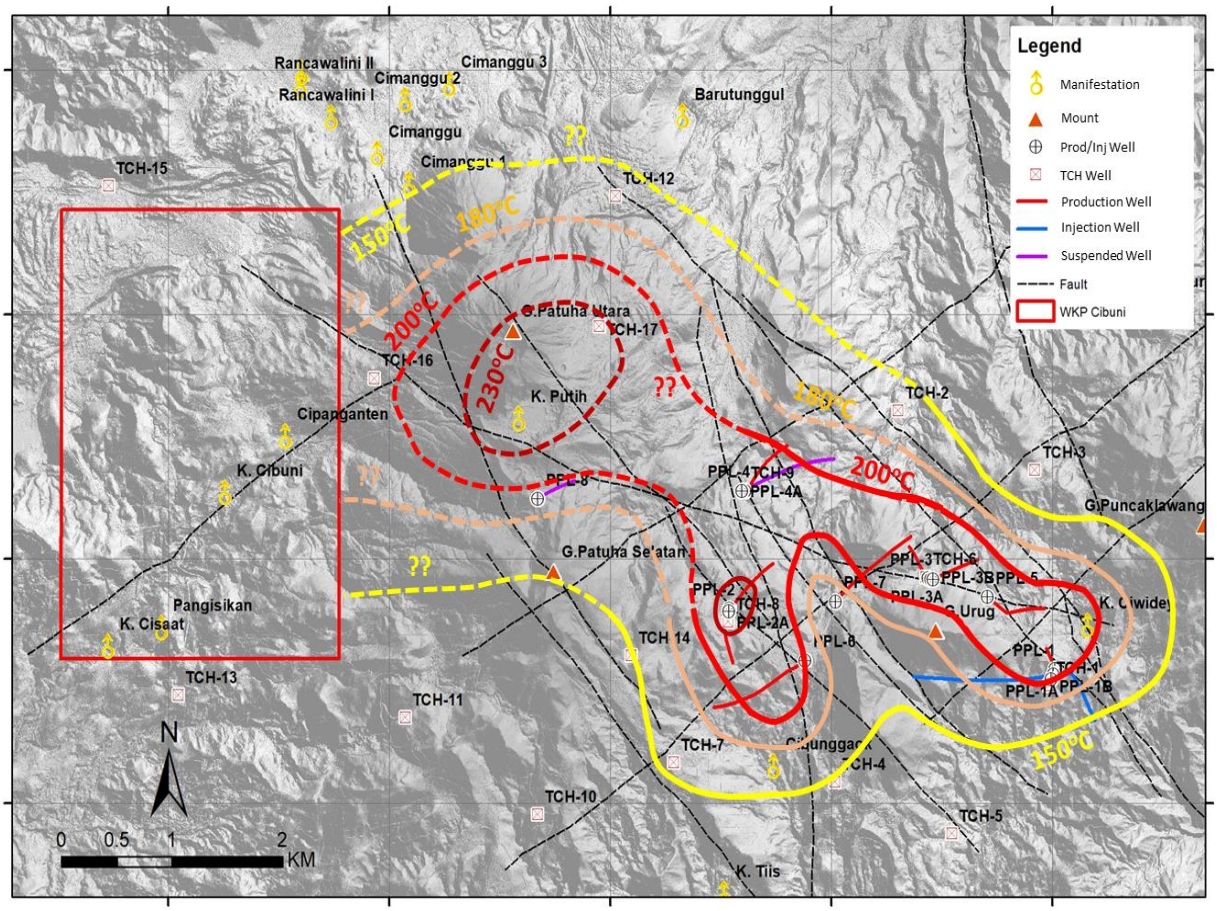


Figure 5. Distribution of Temperature (°C) in Patuha at 1000 masl. The solid line on the temperature contour is delineated by the well data. The dashed line on the temperature contour is generated automatic interpolation by software

MT Data

A. Resistivity Cross-Section

The 3-D MT inversion model was running out using a code by Siripunvaraporn that utilizes a data-space variant of the Occam approach (Siripunvaraporn et al., 2005). Static shift correction (with TDEM data) was done before 3-D inversion started to remove static effect. The imaging of geothermal system can be seen in the 3-D MT inversion results. Two vertical cross-sections of MT Line 1 and Line 2 are shown in Figure 6 and 7. The cross-section of Line 1 extends from the Mt. North Patuha (Near Putih Crater), some of production wells (PPL-4, PPL-7, PPL-3, PPL-5, PPL-1) and also Ciwidey Crater (NW-SE direction). The cross-section of Line 2 cuts across Mt. South Patuha towards some of production wells (PPL-2, PPL-7, PPL-3, PPL-5, PPL-1) and also Ciwidey Crater (W-E direction). Generally, the cross-sections show low resistivity layer in the shallow part and high resistivity in the deeper part. A low resistivity layer indicated as cap rock with the resistivity value between 1 and 10 ohm-m overlies a rather higher resistivity layer. The thickness of the cap rock varies from thinner around 500 m to thicker about 2500 m. The rather higher resistivity layer shows resistivity values ranging about 15 to 60 ohm-m which is indicated as the reservoir of the Patuha geothermal system. In deeper part, the highest resistivity layer (> 100 ohm-m) which is indicated as a possible heat source/hot rock of the Patuha geothermal system. The shallowest BOC (Base of Conductor) layer (< 10 ohm-m) is found in the eastern part beneath the Ciwidey Crater at the elevation of about 1250 masl. On the other hand, the low resistivity layer gets thickened towards to western area until the deepest of about -1000 masl. The doming of resistive layer occurs below the Putih Crater and Mt North Patuha which might indicate an upflow zone. The high temperature solfatara occurs in this location. Besides that, the updome-shape also seen beneath Mt. South Patuha but there are no surface feature represents the direct discharge of the deep reservoir around this area as seen in Figure 7.

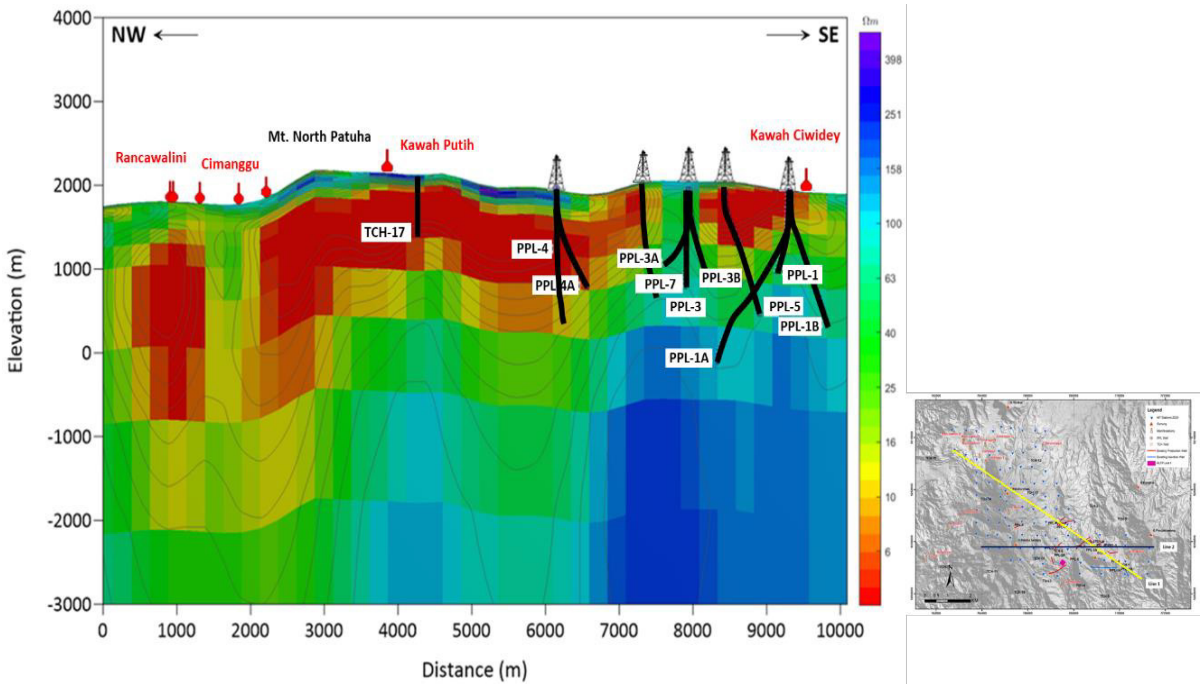


Figure 6. Resistivity section of Line 1 with yellow solid line

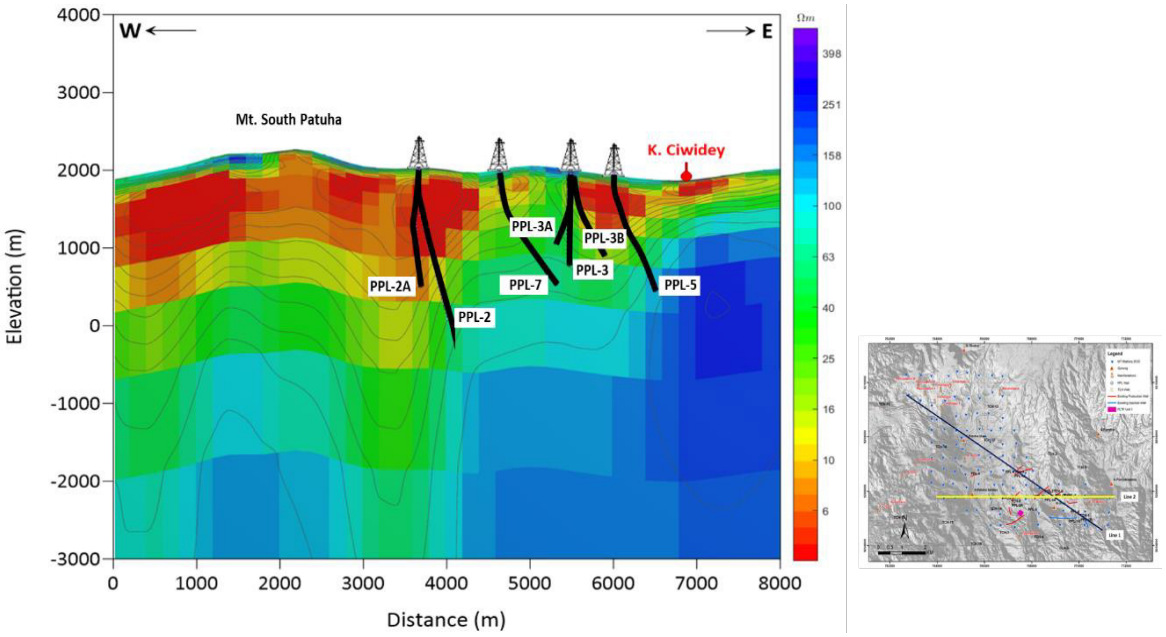


Figure 7. Resistivity section of Line 2 with yellow solid line

B. Resistivity Distribution

The map of resistivity distribution at elevations: 1750, 1250, 750, 250, -1000 and -2000 meters are showed in Figure 8. At 1750 meters elevation, the low resistivity anomaly with resistivity of about 1 to 10 ohm-m, starting to emerge mostly in Patuha Concession Area. The low resistivity anomaly that appears in this area can be interpreted as altered rock. The rather higher resistivity layer (15 to 60 ohm-m) begins to occur at 1250 m elevation especially in the eastern part. Therefore, this elevation is estimated as the shallow top of reservoir (TOR) in the Patuha geothermal system compare than in western part. The highest resistivity zone in deeper part which indicates a possible hot rock/heat source of Patuha geothermal system extends around Mt. North Urug (near Ciwidey Crater), Mt. South Patuha and Mt. North Patuha (near Putih Crater).

DISCUSSIONS

The indication of high temperature system can be identified from the mineral presences that associated with temperature. The minerals that could be used to indicate the reservoir temperature are epidote and base of argillic or top of prophylitic. The geometry and depth are only used for guidance due to the epidote is more represent the liquid condition but the base of argillic may represent more to the current steam dominated condition. Figure 9 and Figure 10 shows a cross-section Line 1 and Line 2 that combine the 3-D inversion result of MT and drilling data (argillic-epidote zone and temperature profile from the wells). The presence of argillic zones that indicated as clay cap (with orange color in trajectory of well) have very good correlation with low resistivity value < 10 ohm-m. The base of argillic layer in the well has a trend going deeper from the eastern to western part. The continuous epidote zones (with green color in trajectory of well) also have very good correlation with moderate resistivity zone 15-60 ohm-m that indicate as reservoir zone. Generally, the resistivity distribution in MT model are almost correlated to delineate clay cap and reservoir zone in well data. However, this trend only used for guidance and the depth need to be compared with other data such as Top of Reservoir (TOR) from wells data since the mineral may indicate a relic condition.

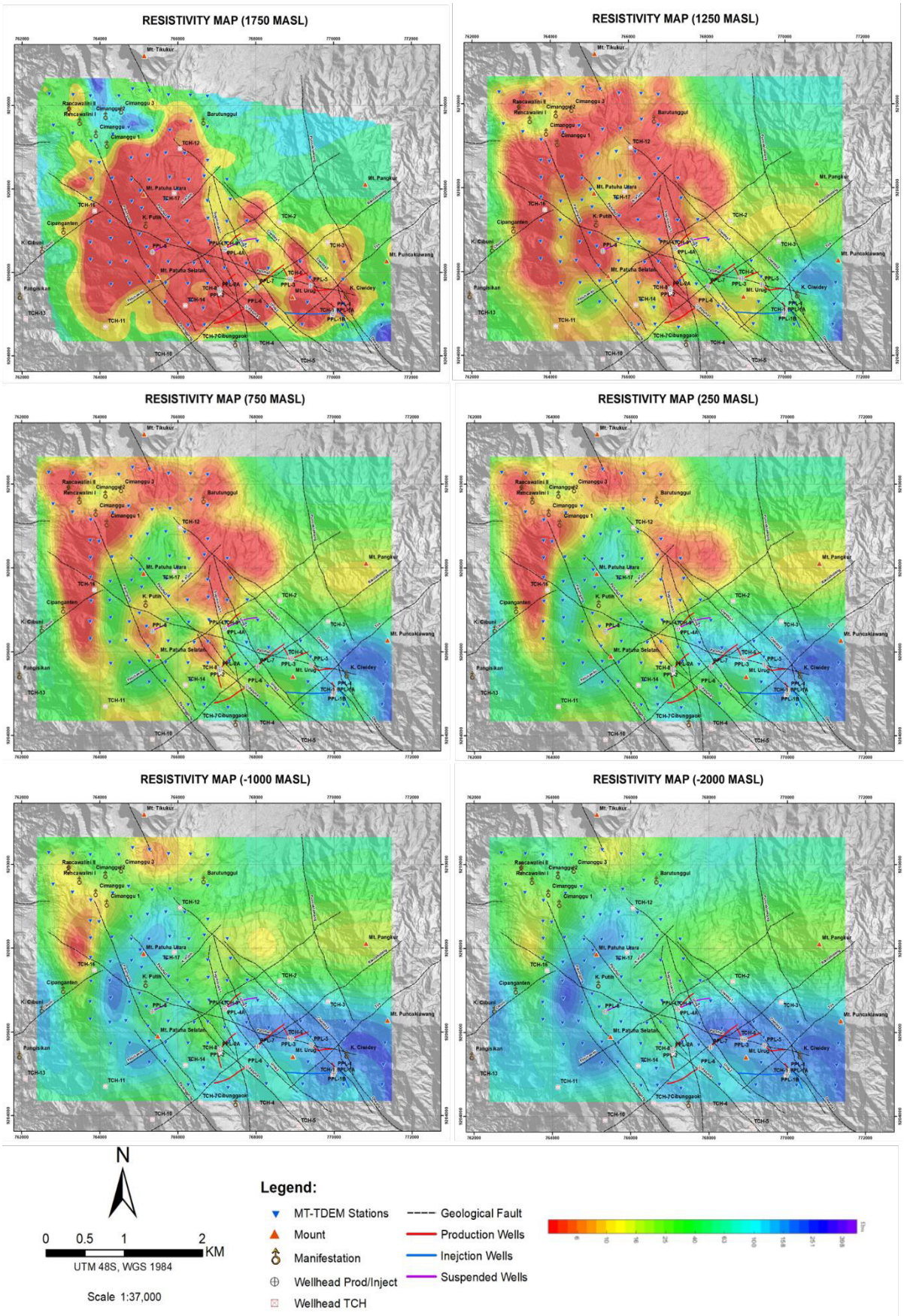


Figure 8. 3-D MT resistivity map distribution (in ohm-m) from 1750 to −2000 m elevation

Furthermore, the 3-D inversion model of MT data showed a good correlation also with well results especially in mapping the temperature distribution both vertically and horizontally. The initial of convective temperature in Patuha that indicated as reservoir temperature is about 217-238°C. The resistivity value around 15-20 ohm-m is correlated with Top of Reservoir of the production or injection well which is characterized by the presence of a convective temperature. The temperature of the well has same pattern with the distribution of Base of Conductor (BOC, < 10 ohm-m) as seen in Figure 9 and Figure 10. The solid line on the temperature contour is delineated by the well and 3-D MT and the dashed line on the temperature contour is guidance by BOC distribution map. The BOC from 3-D MT data is correlated with temperature around 200°C. In addition, high resistivity values >100 ohm-meters were also found in the area around the PPL-7 and PPL-3 wells that possibility correlated with the intrusion of diorite that found in the analysis of the cutting samples of those wells.

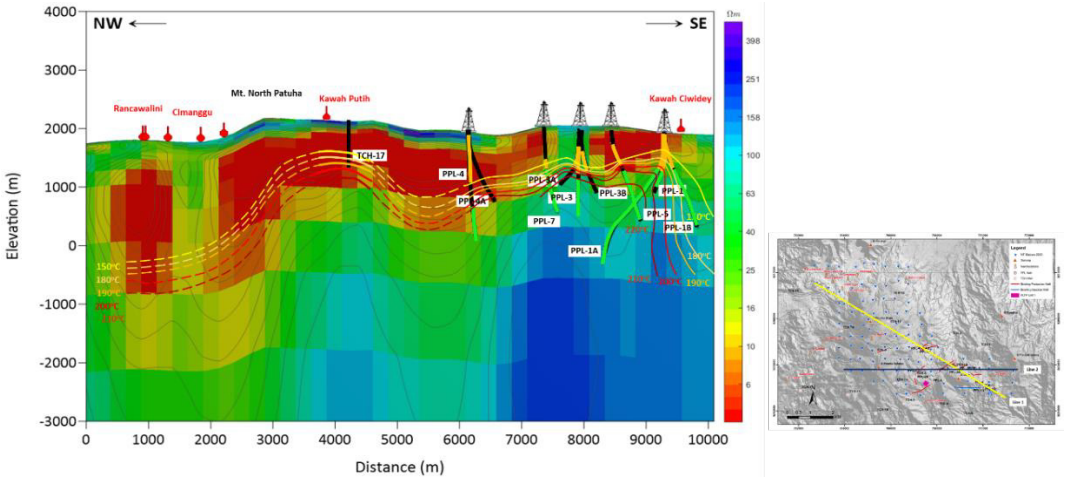


Figure 9. Resistivity section of Line 1 with temperature of well and mineral presence. Argillic zones with orange color in trajectory of well and continuous epidote zones with green color in trajectory of well

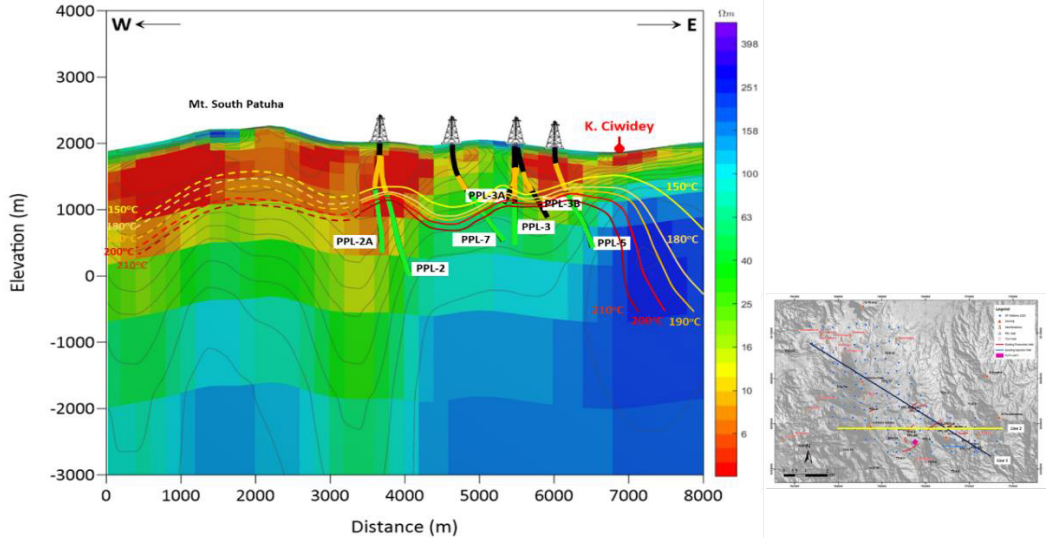


Figure 10. Resistivity section of Line 2 with temperature of well and mineral presence. Argillic zones with orange color in trajectory of well and continuous epidote zones with green color in trajectory of well

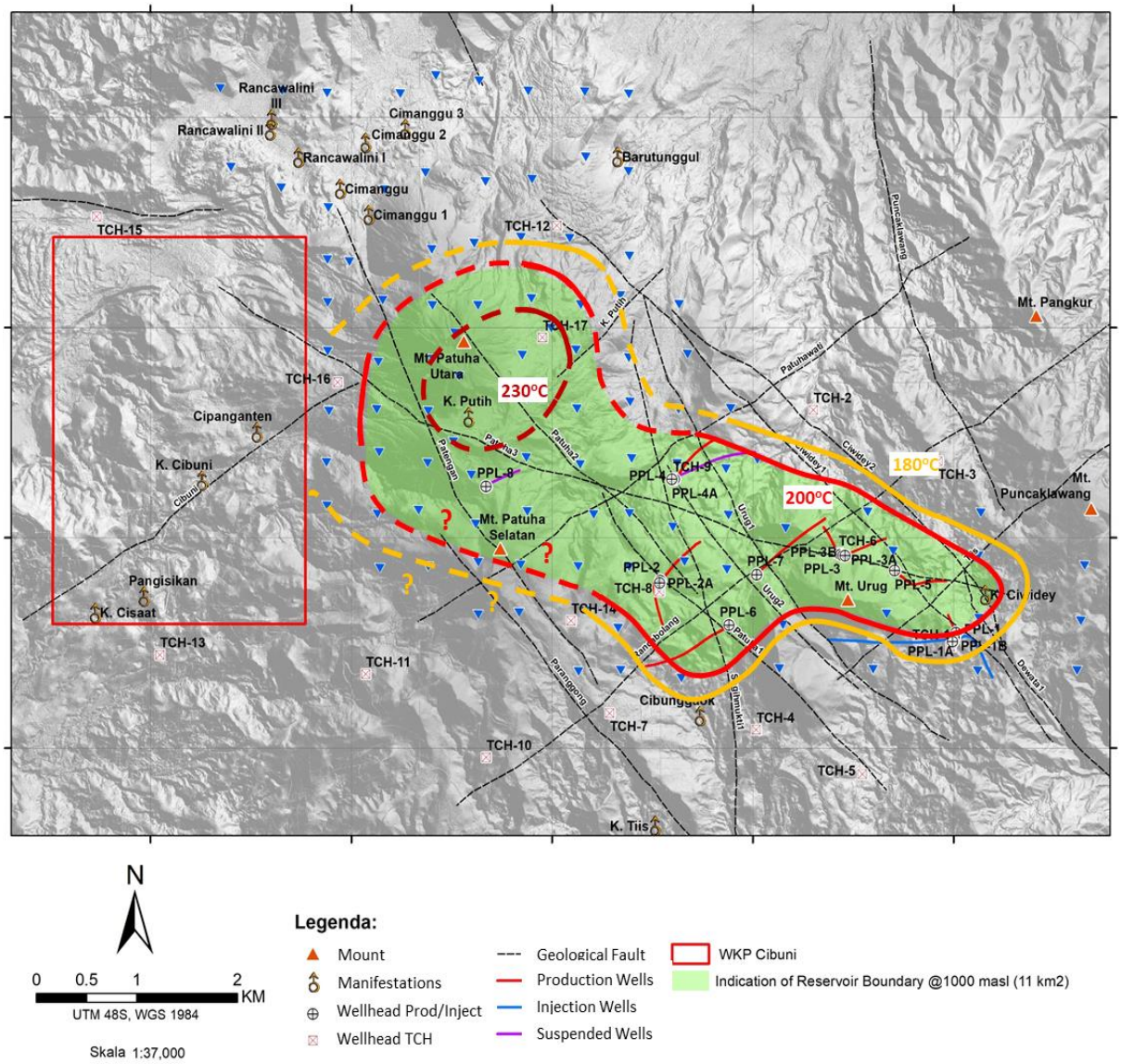


Figure 11. Distribution of Temperature (°C) in Patuha at 1000 masl after corrected with 3-D MT. The solid line on the temperature contour is delineated by the well and 3-D MT. The dashed line on the temperature contour is guidance by low resistivity distribution map

On the MT resistivity distribution map at elevations of 1750 m elevations (see Figure 8), it can be clear seen that the distribution of low resistivity anomaly (<10 ohm-m) that indicated as clay cap spreads to almost the entire of Patuha geothermal field area except in the area of total depth (TD) trajectory of the wells PPL-1B, PPL-1A and PPL-06. The distribution of low resistivity anomaly (<10 ohm-m) can indicate also as the boundary reservoir area in the Patuha Geothermal field. The PPL-1B has a well temperature that is not high enough compared to other wells, which is around 175°C. Consequently, PPL-1B is not commercial for production well and it is used for injection well. In addition, from the results of resistivity mapping there is a very good correlation also in determining of reservoir boundary which is characterized by the presence of reverse temperature from the well. There are two wells that have reverse temperature at deep depths, namely PPL-1A (injection well) and PPL-06 (production well) that can be seen in Figure 11.

If we compare Figure 5 and Figure 11, the distribution of Temperature in Patuha at

1000 masl has a significant difference, especially in areas that have a limited number of wells in the northwest area. Figure 11 shows a distribution of Temperature in Patuha at 1000 masl after corrected with 3-D MT results. The solid line on the temperature contour is delineated by the well and 3-D MT and the dashed line on the temperature contour is guidance by low resistivity distribution map. The guidance is carried out considering that MT data has a good correlation with well temperature in the existing wells for resistivity value <10 ohm-meter is correlated with temperature around 200°C.

In addition, from this result also obtained the estimated area of the reservoir boundary at 1000 masl is about 11 km^2. The reservoir boundary in the northwest and north of the Putih crater, it is obtained from the indication of clay cap thickening in the deeper part. Meanwhile, in the southern part of Mount South Patuha, there is no indication of clay cap thickening so this area still opening and has an option as a geothermal reservoir expansion in Patuha that can be confirmed by adding some MT stations in that area.

CONCLUSIONS

The 3-D MT inversion model shows a good agreement with drilling (well) results to delineate geothermal system in Patuha Geothermal Field. An obvious subsurface resistivity structure compares to drilling results can be seen from correlation with low resistivity value <10 ohm-m with the presence of argillic zones that indicated as clay cap. In addition, high resistivity values >100 ohm-meters were found in the area around the PPL-7 and PPL-3 wells are correlated with the intrusion of diorite that found in the analysis of the cutting samples of those wells. The 3-D inversion showed a good agreement also with well results especially in mapping the temperature distribution both vertically and horizontally. The resistivity value around 15-20 ohm-m is correlated with Top of Reservoir of the production or injection well which is characterized by the presence of a convective temperature. Furthermore, reservoir boundary which is characterized by the presence of reverse temperature and low temperature from the well also can be detect by MT 3-D inversion model. The resistivity distribution map from 3-D MT results are also used to correct especially in areas that have a limited number of wells in the northwest area. The good correlation results between MT and drilling data can be used as a guidance for better development strategy in the northwest area and drilling prognosis for the next drilling campaign.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to give special thanks to my company PT Geo Dipa Energi (Persero) especially in Resource and Facility Division for supporting the study and allowing us to access the data. Great appreciation also to PT NewQuest Geotechnology for their help and supports in providing MT data modeling software.

REFERENCES

Arnason, K., 2015. The static shift problem in MT soundings. Geothermics 39, 13-34.

Cumming, W., & Mackie, R. 2010. Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History. Proceedings of World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia.

Daud Y., Darma, S., Nuqramadha, W. A., Pratama, S. A., Fahmi, F.: Applying Innovations in MT Technology for Reducing Geothermal Exploration Risks, Proceedings of 39th New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua, New Zealand (2017).

Daud Y., Nuqramadha, W. A., Fahmi, F., Sesesega, R. S., Fitrianita, Pratama, S. A., Munandar, A. 2019. Resistivity Characterization of the Arjuno-Welirang Volcanic Geothermal System (Indonesia) through 3-D Magnetotelluric Inverse Modeling, Journal of Asian Earth Sciences. 174. 10.1016/j.jseaes.2019.01.033.

Daud, Y., Nuqramadha, W. A., Fahmi, F., Ismail, M.L. 2020. Optimizing MT Imaging Technology for Reducing Geothermal Drilling Risks, Proceedings World Geothermal Congress 2020, Reykjavik, Iceland.

Elfina. 2017. Updated Conceptual Model of the Patuha Geothermal Field, Indonesia. UNU-GTP, Iceland, report.

Hamilton, W. 1979. Tectonics of the Indoensian region. USGS Professional Paper, 1078.

Koesmono, M., Kusmana, and Suwarna, N. 1996. Geological map of the Sindangbarang and Bandarwaru quadrangles, Java (2nd ed.). Geological Research and Development Centre, Indonesia.

Layman, E.B., dan Soemarinda, S. 2003. The Patuha vapor-dominated resource West-Java, Indonesia. Proceedings, 28th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering 2003, Stanford, California.

Pratama, S.A., Daud, Y., Fahmi, F., dan Darusman, C.A. 2015. Integrated Analysis of Magnetotelluric and Gravity Data for Delineating Reservoir Zone at Patuha Geothermal Field, West Java, Proceedings of Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2015, JCC, Indonesia.

Simpson, F. & Bahr, K. 2005. Practical Magnetotelluric, Cambridge University Press.

Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., and Uyeshima, M. 2005. Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method, Physics of The Earth and Planetary Interiors - Phys earth planet interiors. 150. 3-14. 10.1016/j.pepi.2004.08.023.

Diterima	: 29 Juli 2021
Direvisi	: 7 Desember 2021
Disetujui	: 31 Mei 2022

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 pertama Buletin Sumber Daya Geologi tahun 2022. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya, antara lain Prof. Dr. Ir. Binarko Santoso, M.Sc, Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA, Dr. Eng, Ir. Agus Didit Haryanto, M.T, Ir. Sabtanto Joko Suprapto, M.T, Ir. Bambang Pardiarto, Ir. Teuku Ishlah, Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi dan Ir. Asep Suryana.

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.17 Nomor.1, Tahun 2022. 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 17 Nomor 1 Tahun 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Arifudin Idrus
Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
Email: arifidrus@ugm.ac.id

Chevy Iskandar Yunus Daud
Geothermal Exploration Magister Program, Graduate Study Program of Physical Sciences, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Indonesia, Kampus Depok 16424, Indonesia
PT Geo Dipa Energi (Persero), Aldevco Octagon Building 2nd Floor, South Jakarta
Email: chevy.iskandar@yahoo.com

Herfien Samalehu
Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral, Pemerintah Daerah Provinsi Maluku
Email: ferhin2001@yahoo.com

Muhammad Abdurachman Ibrahim
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: abdurachman.ibrahim@esdm.go.id

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

Rheva Dwiky Adhitya
Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Email: rheva.dwiky.a@mail.ugm.ac.id

Ronaldo Irzon
Pusat Survei Geologi, Badan Geologi
Email: ronaldoirzon18@gmail.com

Sigit Arso Wibisono
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: sigit.wibisono@esdm.go.id

Wahyu Sasongko
Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Email: wahyu_sas@ugm.ac.id

Yunus Daud
Geothermal Exploration Magister Program, Graduate Study Program of Physical Sciences, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Indonesia, Kampus Depok 16424, Indonesia
Email: ydaud@sci.ui.ac.id

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 1 Tahun 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

3-D Inversion 51, 53, 55, 58, 59, 61, 63
Alterasi argilik 41, 44, 46
Batubara 9, 12, 13, 15-26
Bauksit 1-3, 5, 7-13
Biaya lingkungan 27-29, 31-33, 35, 37-39
Cleat 15-21, 23-25
Disseminated 41, 46, 47, 49
Endapan nikel laterit 13, 27-29, 31, 33, 35, 37, 39
Ferit 1, 3, 5, 7-11, 13
Fracture-related mineralization 41, 44, 49
Geokimia bijih 41, 42, 47
Geothermal 51-56, 58, 59, 62-64
Kadar batas optimum 27, 28, 32-39
Karakteristik 1, 2, 13, 15-17, 19-25, 28, 41, 42, 44, 46, 49, 50
Kuala Kuayan 15-17, 25, 26
Lingga 1-3, 5, 6, 9, 10, 12
Litotipe 15-23, 25
Magnetotelluric (MT) 51, 53, 57, 59, 61, 63, 64
Mineralisasi sinabar 41, 44, 46, 47
Model valuasi ekonomi 27, 31
Patuha 51-53, 55-59, 61-64
Pelapukan 1-4, 6-10, 12, 28, 44, 47
Well 51-54, 56, 57, 59, 61-63

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Mei 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Ronaldo Irzon
(Pusat Survei Geologi, Badan Geologi)

PEMBENTUKAN BAUKSIT DAN FERIT PADA PROFIL PELAPUKAN DI KABUPATEN LINGGA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2022 Vol. 17 No. 1 Hal. 1 - 14

Pelapukan dapat menjadi penyebab pembentukan mineral ekonomis seperti bauksit, ferit, nikel, mangan, dan unsur tanah jarang tipe ion-adsorpsi. Wilayah Kabupaten Lingga berada di sekitar garis Khatulistiwa sehingga beriklim tropis yang rentan terhadap pelapukan. Daerah ini juga terdapat unit-unit batuan yang berumur Paleozoikum dan dekat dengan Sutur Bentong Raub sehingga pelapukan intensif telah lama terjadi. Studi ini bertujuan untuk mengulas karakteristik geokimia hasil pelapukan batuan dan pembentukan deposit mineral terkait pelapukan di Kabupaten Lingga. Seluruh sampel yang dipelajari telah lapuk dengan mengacu pada parameter LOI, CIA, dan IOL. Diagram segitiga SiO2-Fe2O3T-Al2O3 menunjukkan bahwa ferit maupun bauksit terbentuk pada empat lokasi secara keseluruhan. Kadar Al2O3 tertinggi pada bauksit mencapai 60% sedangkan Fe2O3T tertinggi pada ferit adalah 69%. Rasio La/Y menunjukkan bahwa pelapukan terjadi pada lingkungan basa, sedangkan rasio Al/Ti menjadi dasar kesimpulan bahwa sampel berasal dari batuan felsik. Meskipun UTJ pada profil pelapukan lebih mudah diekstrak daripada dalam batuan beku, kadarnya dalam studi ini kurang menarik untuk dieksploitasi lebih lanjut karena jumlahnya yang berada pada rentang konsentrasi rendah hingga sedang. Studi berikutnya dapat dilakukan dengan mengambil lebih banyak sampel untuk penentuan daerah target eksplorasi.

Kata kunci: bauksit, ferit, Lingga, pelapukan

Muhammad Abdurachman Ibrahim dan Sigit Arso Wibisono
(Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

KARAKTERISTIK LITOTIPE DAN HUBUNGANNYA TERHADAP CLEAT BATUBARA DI DAERAH KUALA KUAYAN, KOTAWARINGIN TIMUR, KALIMANTAN TENGAH

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2022 Vol. 17 No. 1 Hal. 15 - 26

Karakteristik batubara dapat dilihat dari litotipe dan cleat. Objek yang diteliti adalah batubara Formasi Dahor yang memiliki peringkat rendah dengan mengetahui litotipe, cleat dan kilap batubara. Litotipe batubara merupakan asosiasi maseral dalam bentuk pita-pita tipis. Cleat merupakan rekahan yang terdapat pada batubara. Kilap merupakan kenampakan batubara secara megaskopis. Penelitian ini mengambil sampel batubara di daerah Kuala Kuayan, Kotawaringin Timur, Kalimantan Tengah. Data yang diteliti merupakan sampel batubara dari tiga lokasi pengeboran. Analisis dilakukan dengan melihat kilap dan cleat secara megaskopis terhadap lapisan batubara dan terhadap kedalaman batubara. Karakteristik litotipe mempunyai kecenderungan semakin dalam kedalaman lapisan batubara, maka kilapnya semakin baik. Karakteristik litotipe memiliki klasifikasi banded coal/clarain. Karakteristik cleat memperlihatkan frekuensi cleat akan cenderung lebih banyak, jika persentase kilap terangnya besar. Litotipe cukup berpengaruh terhadap frekuensi cleat.

Kata kunci: batubara, karakteristik, litotipe, cleat, Kuala Kuayan

Wahyu Sasongko dan Rheva Dwiky Adhitya
(Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada)

OPTIMASI VALUASI EKONOMI ENDAPAN NIKEL LATERIT MEMPERHITUNGKAN BIAYA LINGKUNGAN

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2022 Vol. 17 No. 1 Hal. 27 - 39

Optimasi valuasi ekonomi mineral bertujuan untuk menentukan nilai sekarang bersih maksimum suatu proyek selama umur tambang. Model optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pengembangan dari model Lane (1988) dan Sasongko (2013) dengan memperhitungkan biaya lingkungan serta mengacu rerangka aliran kas. Metode penelitian ini meliputi tahapan sebagai berikut: (1) pemodelan dan estimasi sumber daya, (2) pemodelan valuasi ekonomi mineral, (3) penentuan solusi model, dan (4) valuasi ekonomi mineral. Pemodelan sumberdaya dalam bentuk model blok ukuran 25 m x 25 m x 1 m. Estimasi kadar blok menggunakan metode interpolasi inverse distance weighting (IDW). Pemodelan optimasi valuasi ekonomi dalam penelitian ini adalah pemodelan dalam rerangka aliran kas dengan mempertimbangkan biaya lingkungan dan kebijakan pemerintah seperti pajak, royalti, dan depresiasi. Optimasi cut-off grade adalah suatu usaha untuk menentukan kadar optimum yang akan menghasilkan keuntungan atau nilai sekarang bersih (net present value, NPV) maksimum. Solusi model dalam hal ini meliputi optimasi cut-off grade untuk optimasi profit dan optimasi NPV. Solusi model untuk menentukan kadar batas optimum tergantung pada batasan kapasitas penambangan, konsentrasi, dan pemurnian. Penentuan solusi model optimasi kadar batas menggunakan metode analitik. Pada studi kasus, estimasi sumberdaya terukur sejumlah US$4.253.566 ton bijih nikel. Pada laju penambangan konstan pada kadar batas optimum 0,95 %, maka umur tambang 4,85 tahun dengan NPV US$811.248.447. Optimasi valuasi ekonomi dengan indikator NPV, umur tambang 4,44 tahun dan dihasilkan NPV maksimum sebesar US$841,596.460. Nilai cut-off grade berbeda-beda di setiap tahun penambangan, yaitu tahun ke-1 kadar 0,99%; tahun ke-2 kadar 0,99%; tahun ke-3 kadar 0,98%; tahun ke-4 kadar 0,97%; tahun ke-5 kadar 0,95%. Optimasi valuasi ekonomi NPV memiliki nilai lebih besar dan waktu yang lebih pendek, dibandingkan dengan optimasi keuntungan (profit).

Kata kunci: Endapan nikel laterit, model valuasi ekonomi, kadar batas optimum, biaya lingkungan

Herfien Samalehu[1], Arifudin Idrus[2], dan Nugroho Imam Setiawan[2]
([1]Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral, Pemerintah Daerah Provinsi Maluku, [2]Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta)

MINERALISASI ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA KECAMATAN HUAMUAL, KABUPATEN SERAM BAGIAN BARAT, MALUKU

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Mei 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2022 Vol. 17 No. 1 Hal. 41 – 50

Wilayah Iha – Luhu terletak di bagian barat Pulau Seram, Provinsi Maluku yang berada pada elevasi 9 s.d. 341 meter diatas permukaan laut serta menempati batuan metamof Kompleks Taunusa. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kontrol geologi, karakteristik mineralisasi serta geokimia bijih endapan sinabar di Iha - Luhu. Metode penelitian dimulai dengan kajian studi pustaka, kegiatan investigasi dilapangan (fieldwork) untuk pengambilan sampel, pemetaan geologi, alterasi dan mineralisasi serta analisis laboratorium yang meliputi sayatan poles, geokimia bijih (FA/AAS dan ICP-AES, XRF) dan elemental mapping (Micro-XRF).

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik endapan sinabar di Iha – Luhu terbentuk dalam dua jenis urat (fracture-related mineralization) dan diseminasi (disseminated) dalam host batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit yang dikontrol oleh sesar - sesar berarah utara barat laut - selatan menenggara dan timur laut - barat daya. Mineralisasi terdiri dari sinabar (±metasinabar), arsenopirit, stibnit, sfalerit, hematit, minor pirit±pirhotit dengan gangue terdiri dari kuarsa, illit, smektit dan kaolinit. Bijih sinabar mengandung kelimpahan Zn, Sb, Fe, As, menunjukan kehadiran logam mulia (Au) serta kandungan merkuri (Hg) mencapai 72,4%.

Kata kunci: Mineralisasi sinabar, geokimia bijih, fracture-related mineralization, disseminated, alterasi argilik

Chevy Iskandar[1,2] and Yunus Daud[1]
([1]Geothermal Exploration Magister Program, Graduate Study Program of Physical Sciences, Department of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Indonesia, Kampus Depok 16424, Indonesia [2]PT Geo Dipa Energi (Persero), Aldevco Octagon Building 2nd Floor, South Jakarta)

CORRELATION BETWEEN 3-D MAGNETOTELLURIC INVERSION MODEL WITH DRILLING DATA IN PATUHA GEOTHERMAL FIELD

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2022 Vol. 17 No. 1 Hal. 51 - 64

The Patuha geothermal field is located in West Java Province, Indonesia and developed by state owned company PT Geo Dipa Energi (Persero). The Commercial Operation Date (COD) for Patuha was in September 2014 with plant capacity of 1x60 MW. Until now, Patuha Unit I geothermal field has been running for almost 7 years. The current production wells have experienced a natural decline, which is showed by a reduction in production capacity to the initial production. This causes the steam supply to the Power Plant Unit I to be not optimal, so a make-up well program is needed. Furthermore, to support the addition of electricity production capacity from geothermal energy in Indonesia, the development of the Patuha Geothermal Field is planned to be carried out for the next Power Plant Unit's expansion (Unit 2 and Unit 3). Nevertheless, determining the location for both make-up and development drilling might still pose high risks. This is especially because the development area (where production and injection wells are located) is only concentrated in the eastern area of the contract area. Geophysical data especially Magnetotelluric (MT) has an indispensable role considering the limited data and the limited number of existing wells that cover the entire Patuha prospect area. To understanding the subsurface feature and see the correlation between MT model with well results in Patuha Geothermal Field, MT and TDEM survey were conducted in the eastern and western parts of Patuha area with total 100 stations. Considering the complexity of the subsurface condition in volcanic area, 3-D inversion of the MT data will be the most representative approach to investigate geothermal system in Patuha Geothermal Field. An obvious subsurface resistivity distribution revealed by the 3-D inversion showed a good agreement with well results especially in mapping the temperature distribution both vertically and horizontally. Generally, the resistivity distribution consists of a conductive zone (1–10 ohm-m) at the shallow part overlying a reservoir zone with a rather higher resistivity range (20–60 ohm-m). The conductive zone (<10 ohm-m) is correlated with Base of Conductor (BOC) of the wells that indicated by the presence of the argillic mineral. Meanwhile, the resistivity value around 15-20 ohm-m is correlated with Top of Reservoir of the production or injection well which is characterized by the presence of a convective temperature. In addition, from the results of resistivity mapping there is a very good correlation also in determining of reservoir boundary which is characterized by the presence of reverse temperature from the well. These results can be used as a guidance for better development strategy and drilling prognosis for the next drilling campaign especially in the area which limited number of wells.

Kata kunci: Geothermal, 3-D Inversion, Magnetotelluric (MT), Patuha, Well



Lapisan Bijih Besi, Kecamatan Watulimo, Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2022)



Malasit di Sungai Nanggung, Kecamatan Watulimo, Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2022)



Perlapisan Batugamping Tersilisifikasi di Pantai Karangpegat, Kecamatan Watulimo, Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2022)



Urat Kuarsa Manganese Teroksidasi Kuat di Bukit Kumbokarno, Kecamatan Watulimo, Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2022)



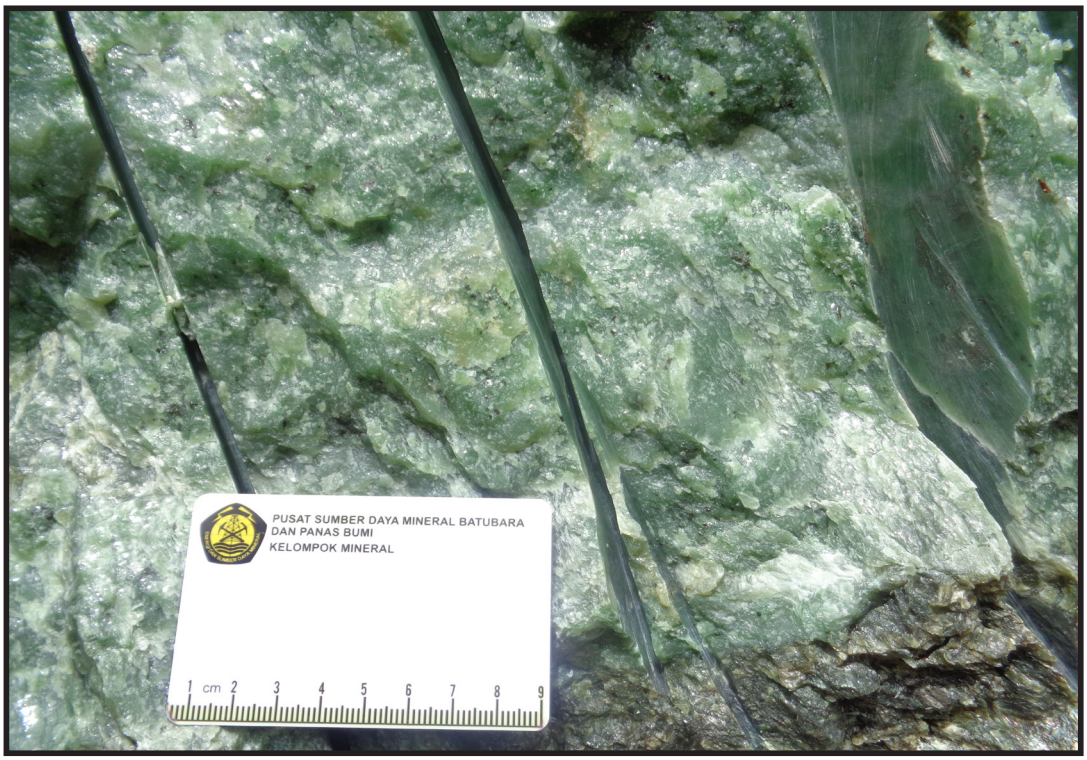
Fragmen-fragmen Penyusunan Aluvial di sekitar Sungai Alue Gantung, Desa Pante Ara, Kecamatan Beutong, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2022)



Breksi sesar di daerah Desa Blang Neuang, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2022)



Singkapan Batumulia di Desa Pante Ara, Kecamatan Beutong, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2022)



Singkapan Nephrite di Desa Pante Ara, Kecamatan Beutong, Kabupaten Nagan Raya, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2022)



Singkapan Perlapisan Mangan dengan Hematit, Desa Labuhan Kuris,
Kecamatan Lape, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Singkapan Mangan Diantara Batuan Dasitik, Desa Maronge, Kecamatan Maronge,
Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Void Bekas Tambang, Kabupaten Barito Utara, Provinsi Kalimantan Tengah
(Soleh Basuki Rahmat, 2021)



Eksplorasi Batubara Tambang PT KCM Kabupaten Tapin, Provinsi Kalimantan Selatan
(Soleh Basuki Rahmat, 2021)



Pengambilan Sampel Batubara untuk Uji Batubara Metalurgi
Kabupaten Barito Utara, Provinsi Kalimantan Tengah
(Muhammad Rizki Ramdhani, 2021)



Kegiatan Pengeboran Slim Hole CKK-01, Cisolok-Cisukarame, Kabupaten Sukabumi,
Provinsi Jawa Barat (Dudi Hermawan, 2021)



Morfologi Danau Segara Anak, Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka, 2021)



Singkapan Aliran Lava Andesit, Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka, 2021)



Sulfur di Sekitar Fumarol Woloputi, Daerah Panas Bumi Nage, Kabupaten Ngada, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Robertus Simarmata, 2021)



Pengukuran Titik Gravity di Kaki Gunung Rinjani, Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka, 2021)



Zona Alterasi di Sekitar Mata Air Panas Balla, Daerah Panas Bumi Bittuang Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan (Widya Asoka, 2021)



Morfologi Gunung Rinjani, Daerah Panas Bumi Sembalun, Kabupaten Lombok Timur, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka, 2021)

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 : http://psdg.geologi.esdm.go.id
OJS: http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id
Email: buletinpsdg@gmail.com

ISSN 1907-5367
9 771907 536770

eISSN 2580-1023
9 772580 102009