

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Badan Geologi

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Interpretasi struktur tahanan jenis dari data MT
di daerah panas bumi Wapsalit (Iqbal Takodama, dkk.)

Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 21/E/KPT/2018

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	Dra. Ella Dewi Laraswati Candra, S.T Eko Suryanto, S.Kom Resmi Novianti, S.T Rijal Ahmad Taufik, S.T Ernawati, A.Md
Editorial Board	Dedi Budiman, S.H 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. Edi Suhanto, S.Si., M.T Indra Sukmayana, S.T
Peer-Reviewer	Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T Dr. Ir. Susilohadi Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D Prof. Dr. Ir. Binarko Santoso Dr. Adang Saputra, S.T., S.Si., M.Si Dr. Eng. Suryantini, S.T., M.Sc Euis Tintin Yuningsih, S.T., M.T., Ph.D Dr. Nana Suwarna Prof. Dr. Ir. Ildrem Syafri, DEA. Dr. Ir. Bambang Priadi Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T

Alamat sekretariat dan pengiriman naskah

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Bagian Tata Usaha
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

Menutup edisi Tahun 2018, Buletin Sumber Daya Geologi Volume.13, Nomor 3 menghadirkan 5 artikel yang didominasi oleh kajian tentang potensi panas bumi di Indonesia sedangkan 1 artikel berupa kajian unsur dalam batuan ultramafik.

Kajian tentang potensi panas bumi hadir dalam empat artikel yang berbeda. Artikel pertama menyajikan pemanfaatan hasil analisis metode magnetotelurik untuk mengetahui sistem panas bumi suatu daerah prospek. Artikel kedua menyajikan pemanfaatan metode analisis petrografi dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui himpunan mineral alterasi di daerah Gunung Rendingan, Provinsi Lampung yang diperoleh dari analisis conto batuan di permukaan dan serbuk bor dari beberapa lubang pengeboran. Artikel selanjutnya berupa kajian vulkanostratigrafi yang dijadikan salah satu dasar untuk mengevaluasi prospek daerah panas bumi Gunung Lawu. Sedangkan artikel terakhir yang berkaitan dengan potensi panas bumi yaitu studi kasus tentang evaluasi cadangan mungkin pada dua lapangan panas bumi vulkanik yang didominasi oleh air dan di lapangan panas bumi yang didominasi oleh uap. Artikel yang sedikit berbeda yaitu ulasan kelimpahan unsur major dan minor pada batuan ultramafik berdasarkan perbedaan zona laterit di Pulau Pakal, Halmahera Timur.

Hadirnya kelima artikel dalam edisi terakhir ini melengkapi lima belas artikel yang telah diunggah dan dicetak dalam Buletin Sumber Daya Geologi volume ke.13 Tahun 2018. Selain itu terdapat beberapa artikel yang masih dalam proses penelaahan oleh para Reviewer.

Pada kesempatan ini, Dewan Redaksi menyampaikan terimakasih dan penghargaan kepada para Penulis, Editor dan Mitra Bestari atas partisipasinya dalam menghadirkan tiga edisi Buletin selama tahun 2018. Ucapan terima kasih pun disampaikan kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi dan pihak manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi sehingga selalu hadir diantara para pembaca. Semoga kehadiran Buletin ini dapat menambah wawasan dan pengetahuan untuk para pembaca dalam bidang ilmu kebumihan.

Salam hangat,

Dewan Redaksi

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

- 141 - 154 **IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAERAH WAPSALIT BERDASARKAN STRUKTUR TAHANAN JENIS DATA MAGNETOTELLURIK**
IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL SYSTEM IN WAPSALIT AREA BASED ON MAGNETOTELLURIC RESISTIVITY STRUCTURE
Oleh : Iqbal Takodama, Ahmad Zarkasyi, Mochammad Nur Hadi, dan Ratna Dewi
- 155 - 175 **KETERKAITAN KELIMPAHAN UNSUR MAJOR DAN MINOR DENGAN ZONASI LATERIT NIKEL BLOK HZ (HARZBURGIT) DAN DN (DUNIT) DAERAH PULAU PAKAL, HALMAHERA TIMUR**
RELATION OF MAJOR AND MINOR ELEMENTS ENRICHMENT WITH NICKEL LATERITE ZONATION IN HARZBURGITE (HZ) AND DUNIT (DN) BLOCKS AT PAKAL ISLAND, EAST HALMAHERA
Oleh : Fiandri I. Rinawan, Mega F. Rosana, Mohammad Nur Heriawan, dan Euis T. Yuningsih
- 177 - 198 **ALTERASI HIDROTERMAL GUNUNG RENDINGAN BERDASARKAN ANALISIS PETROGRAFI DAN X-RAY DIFFRACTION (XRD)**
HYDROTHERMAL ALTERATION IN MOUNT RENDINGAN BASED ON PETROGRAPHY AND X-RAY DIFFRACTION (XRD) ANALYSIS
Oleh : Dewi Gentana, Nana Sulaksana, Emi Sukiyah, dan Euis T. Yuningsih
- 199 - 213 **KEPROSPEKAN PANAS BUMI GUNUNG LAWU BERDASARKAN KAJIAN VULKANOSTRATIGRAFI**
GEOTHERMAL PROSPECT OF MOUNT LAWU BASED ON VOLCANOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS
Oleh : Dudi Hermawan dan Lano Adhitya Permana
- 215 - 225 **EVALUASI CADANGAN MUNGKIN UNTUK SISTEM PANAS BUMI VULKANIK DENGAN METODE VOLUMETRIK: STUDI AREA KAMOJANG DAN LAHENDONG**
EVALUATION OF GEOTHERMAL POSSIBLE RESERVES FOR VOLCANIC GEOTHERMAL SYSTEM USING VOLUMETRIC METHOD: AREA OF STUDY IN KAMOJANG AND LAHENDONG
Oleh : Lia Putriyana

ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi

IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAERAH WAPSALIT BERDASARKAN STRUKTUR TAHANAN JENIS DATA MAGNETOTELLURIK

IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL SYSTEM IN WAPSALIT AREA BASED ON MAGNETOTELLURIC RESISTIVITY STRUCTURE

Iqbal Takodama, Ahmad Zarkasyi, Mochammad Nur Hadi, dan Ratna Dewi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
iqbal.takodama@esdm.go.id

ABSTRAK

Daerah panas bumi Wapsalit berada di Pulau Buru, Maluku, Indonesia yang secara geologi berada pada lingkungan non-vulkanik. Berdasarkan penyelidikan terdahulu, daerah ini memiliki prospek panas bumi di sekitar area manifestasi panas bumi yang dikontrol oleh perpotongan dua sesar. Proses inversi 2-Dimensi dari data magnetotellurik (MT) dilakukan untuk menggambarkan sebaran tahanan jenis batuan bawah permukaan. Proses inversi ini menggunakan algoritma *Active Constraint Balancing* (ACB) yang memanfaatkan prinsip *spatially variable regularization parameter*. Lapisan konduktif yang berfungsi sebagai lapisan penutup berupa batuan metamorf berubah muncul di dekat permukaan hingga kedalaman 1000 – 1250 meter. Lapisan ini semakin meninggi seiring dengan kedalaman yang mengindikasikan zona reservoir. Zona tahanan jenis tinggi (resistif) dengan bentuk kubah muncul pada bagian bawah yang diinterpretasikan sebagai batuan intrusif muda.

Kata kunci: Wapsalit, metode magnetotellurik, inversi 2-D, *Active Constraint Balancing*, tahanan jenis, sistem panas bumi

ABSTRACT

Wapsalit geothermal area is non-volcanic geothermal system and located in Buru Island, Maluku, Indonesia. Based on previous investigations, the promising zone is located around surface manifestation which is controlled by an intersection of two faults. The 2-D inversion of magnetotelluric (MT) data has been carried out to image the 2-D model of electrical resistivity distribution. Active Constraint Balancing (ACB) algorithm was used in inversion process by using the spatially variable regularization parameter. Altered metamorphic rock acted as cap rock of the geothermal system is shown in resistivity model by conductive layer on the top layer from near surface until 1,000 – 1,250 m depth. This conductive layer is followed by medium to high resistivity zone, which may indicate the reservoir zone. High resistivity zone with dome shape is located at the bottom layer which is interpreted as young intrusive volcanic rock.

Keywords: *Wapsalit, magnetotelluric method, 2-D inversion, Active Constraint Balancing, resistivity, geothermal system*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara yang dilewati oleh cincin api (*Ring of Fire*), dan mempunyai lebih dari 120 gunungapi aktif. Keberadaan gunungapi aktif ini tidak hanya memberikan bencana, namun juga memberikan keuntungan berupa

pemanfaatan sumber daya alamnya. Panas bumi merupakan salah satu keuntungan dari keberadaan gunungapi. Namun demikian, gunungapi bukan merupakan satu-satunya sumber dari panas bumi, tetapi juga dari *hot dry rock* dan *hot sedimentary aquifer* (Goldstein dkk., 2009) (King & Miller, 2010).

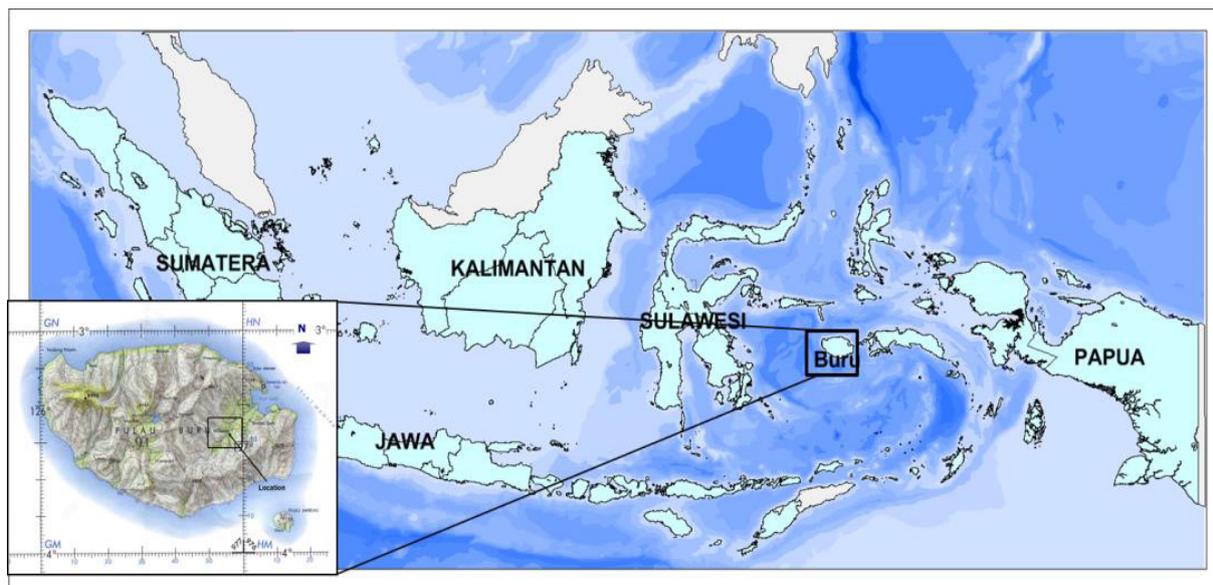
Dengan sejumlah 342 lokasi panas bumi dan masih terus bertambah dengan penelitian lebih lanjut, Indonesia mempunyai potensi panas bumi yang sangat besar, walaupun belum sepenuhnya dimanfaatkan. Oleh karena itu, untuk memaksimalkan potensi panas bumi, penelitian harus dilakukan dari permukaan hingga bawah permukaan. Eksplorasi geofisika menggunakan metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode yang sangat efektif untuk mendapatkan informasi distribusi tahanan jenis bawah permukaan. Informasi tahanan jenis bawah permukaan ini dapat mengidentifikasi sistem panas bumi seperti *reservoir*, *caprock*, dan juga struktur yang berkembang. Studi kasus mengenai metode MT yang digunakan: untuk eksplorasi panas bumi telah banyak dilakukan (Uchida dkk., 2011), (Buonasorte dkk., 2013), (Kholid dkk., 2015), (Niasari dkk., 2015) and (Zarkasyi & Takodama, 2016).

Daerah panas bumi Wapsalit terletak di Pulau Buru, Provinsi Maluku (Gambar 1), Indonesia bagian timur, yang mempunyai banyak manifestasi panas bumi berupa fumarol, tanah panas dan mataair panas dengan temperatur 100°C (Hadi dan

Sulaeman, 2010). Sistem panas bumi Wapsalit berupa sistem panas bumi non-vulkanik dengan area prospek yang terletak di sekitar manifestasi permukaan. Tubuh batuan intrusi/vulkanik di bawah manifestasi permukaan yang tidak tersingkap di permukaan diperkirakan sebagai sumber panas yang memanaskan fluida reservoir. Keberadaan tubuh batuan intrusi di bawah zona prospek ditunjukkan oleh adanya anomali tinggi dari data gaya berat (Rezky and Zarkasyi, 2010).

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi sistem panas bumi daerah Wapsalit berdasarkan distribusi tahanan jenis. Tahanan jenis merupakan salah satu sifat fisis batuan yang dapat digunakan dalam mendeliniasi zona prospek panas bumi.

Makalah ini menyajikan langkah-langkah pengolahan, pemodelan, dan analisis data MT untuk eksplorasi panas bumi di daerah Wapsalit. Pada penelitian ini, algoritma *Active Constraint Balancing* (ACB) digunakan dalam proses inversi 2-D dari data MT dan program *opensource* MT2DInvMatlab digunakan dalam melakukan proses *inversi* 2-D (Lee dkk., 2009).



Gambar 1. Lokasi daerah panas bumi Wapsalit

TATAAN GEOLOGI

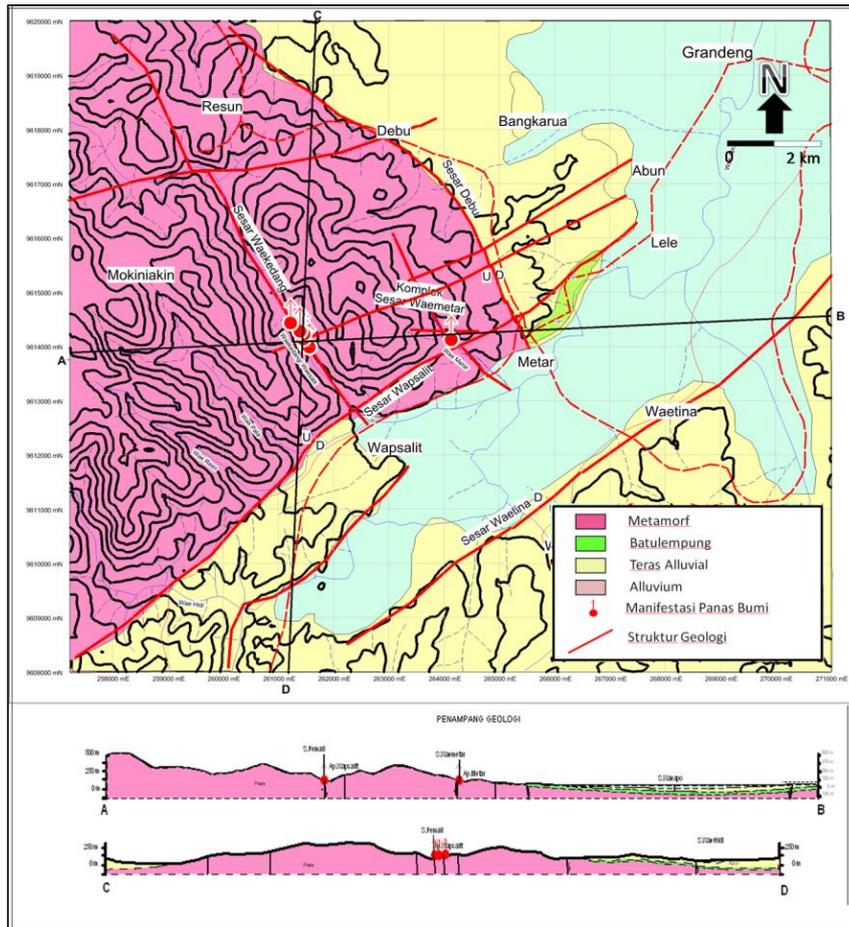
Pulau Buru terletak di bagian barat dari Kepulauan Maluku (Gambar 1). Pulau Buru terbentuk dari fasies non-vulkanik PraTersier pada busur luar Tanimbar-Kai-Seram. Sesar mendatar Sorong yang berasosiasi aktif dengan pergerakan lempeng Indo-Australia ke arah utara mempengaruhi tataan geologi di Pulau Buru. Daerah Wapsalit terletak di tengah dari bagian selatan Pulau Buru dan terbentuk dari proses pengendapan dan metamorfisma di daerah topografi sedang (Hadi & Sulaeman, 2010)

Susunan litologi daerah Wapsalit dari yang termuda hingga tertua terdiri atas: batuan metamorf, batuan sedimen, teras aluvial dan aluvium, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Batuan metamorf Pra-Tersier dikelompokkan sebagai batuan dengan derajat ubahan rendah, seperti: batusabak, filit, dan kuarsit. Sekis hijau dan arkos ditemukan di bagian barat dari manifestasi permukaan. Batuan sedimen berumur Pleistosen ditemukan bersama batulempung dan batupasir kasar sebagai ketidakselarasan dengan arah jurus dan kemiringan sekitar $N275^{\circ}E/15^{\circ}$ – $N310^{\circ}E/10^{\circ}$. Ketebalan batulempung berkisar antara 20 hingga 150 cm dan batupasir berkisar antara 30 – 50 cm. Teras alluvial berumur Pleistosen didominasi oleh hancuran batuan konglomerat yang fragmennya terdiri atas batuan metamorf seperti filit, sekis, batusabak, kuarsit, pasir, dan lempung. Aluvium juga muncul di sekitar dataran sungai Wae Apo.

Struktur geologi yang berkembang di daerah ini berupa sesar yang muncul di daerah panas bumi Wapsalit. Sesar

Wapsalit berarah barat daya – timur laut terletak di bagian tengah daerah penelitian. Di bagian selatan terdapat sesar mendatar mengangan Waetina yang berarah barat daya – timur laut dan beberapa sesar kecil dengan arah yang sama di area ini. Sesar Waekedang berarah barat laut – tenggara yang membentuk Sungai Pemali juga muncul di area ini. Sesar ini diduga sebagai pengontrol kemunculan manifestasi panas bumi ke permukaan. Sesar normal Debu berarah barat laut – tenggara muncul di sebelah timur sesar Waekedang. Sesar Waemetar muncul di antara sesar Waekedang dan Debu dengan arah yang sama.

Manifestasi panas bumi di daerah Wapsalit muncul sebagai mata air panas, tanah panas, steam vent, endapan (deposit) belerang dan garam, serta batuan alterasi (Hadi dan Sulaeman, 2010). Sebagian besar manifestasi permukaan berada di sekitar Sungai Wapsalit/Pemali dan Waemetar (Gambar 3). Mata air panas Wapsalit 1 sampai dengan 3 mempunyai temperatur yang berkisar dari $98^{\circ}C$ hingga $102^{\circ}C$ dengan pH asam, kecuali pada mata air panas Wapsalit 3 yang mempunyai pH netral. Berjarak dua kilometer ke arah timur, terdapat mataair panas Metar yang terletak di Sungai Waemetar dengan temperatur $63^{\circ}C$ hingga $98^{\circ}C$ dan pH netral. Tanah panas dengan temperatur $85^{\circ}C$ hingga $98^{\circ}C$, gas belerang, silika sinter dan batuan ubahan muncul di sekitar Sungai Pemali. Perkiraan temperatur bawah permukaan dengan menggunakan geothermometer SiO_2 (conductive-cooling) rata-rata berkisar antara $224-247^{\circ}C$ dan termasuk kedalam entalpi tinggi (Hadi & Sulaeman, 2010).



Gambar 2. Peta geologi daerah panas bumi Wapsalit (dimodifikasi dari Hadi & Sulaeman, 2010)



Gambar 3. Manifestasi panas bumi daerah panas bumi Wapsalit (Sesuai arah jarum jam dari foto kiri atas; mataair panas Wapsalit 1, mataair panas Wapsalit 2, mataair panas Wapsalit 3 dan batuan alterasi) (Hadi & Sulaeman, 2010)

Batuan ubahan, teramati di sekitar manifestasi permukaan dengan berbagai warna, dari putih hingga hitam kecoklatan. Perbedaan warna ini menunjukkan tingginya intensitas kontak batuan induk dengan fluida hidrotermal. Mineral alterasi yang ditemukan menunjukkan tipe alterasi argilik hingga argilik lanjut. Tipe argilik ditunjukkan dengan keberadaan halosit, dickit dan kaolin, sedangkan tipe argilik lanjut ditunjukkan dengan kaolin, dickit, alunit, opal dan mika seperti muskovit (Hadi dan Sulaeman, 2010).

Proses pembentukan sistem panas bumi Wapsalit berbeda dengan sistem panas bumi lainnya yang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik. Sistem panas bumi Wapsalit berasosiasi dengan tubuh intrusi/vulkanik yang tidak tersingkap ke permukaan. Fluida bawah permukaan bergerak ke atas melalui rekahan-rekahan yang terbentuk dari aktivitas tektonik. Fluida ini dipanaskan oleh tubuh intrusi yang berlaku sebagai sumber panas di sistem panas bumi Wapsalit.

**METODE MAGNETOTELLURIK
TEORI DASAR**

Metode MT merupakan salah satu metode geofisika yang dapat menggambarkan sifat elektrik (distribusi tahanan jenis) bawah permukaan yang memanfaatkan variasi medan elektromagnetik alami sebagai sumbernya. Rentang frekuensi dari medan elektromagnetik alami berkisar antara 10⁻⁴ Hz hingga 10⁴ Hz (Chave & Jones, 2012). Frekuensi tinggi, lebih dari 1 Hz, dihasilkan dari aktivitas petir, sedangkan untuk frekuensi rendah, kurang dari 1 Hz dihasilkan dari interaksi *solar wind* dan medan magnet bumi.

Dari persamaan Maxwell, medan listrik (*E*) dan medan magnet (*H*) tegak lurus terhadap satu sama lain. Perbandingan antara medan magnet dan listrik menghasilkan impedansi (*Z*) yang berkorelasi dengan tahanan jenis listrik (ρ) bumi (Chave & Weidelt, 2012)

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = -\frac{E_y}{H_x}, \tag{1}$$

Di mana *x* dan *y* masing-masing berarah utara dan timur.

Penurunan dari persamaan Maxwell ini kemudian akan menghasilkan nilai tahanan jenis semu (ρ_a) dan fase ($\varphi(\omega)$) yang tergantung pada frekuensi (Chave & Weidelt, 2012).

$$\rho_a(\omega) = \frac{|Z|^2}{\omega\mu_0}, \tag{2}$$

$$\varphi(\omega) = \tan^{-1} \frac{Im[Z]}{Re[Z]}, \tag{3}$$

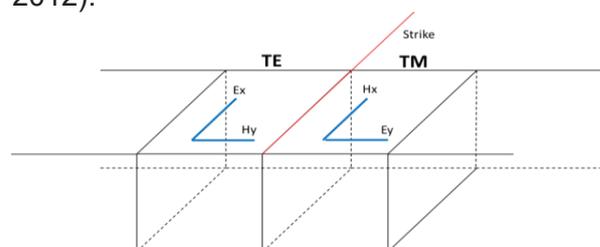
Di mana $\rho_a(\omega)$ adalah tahanan jenis semu (Ωm), $\varphi(\omega)$ adalah sudut fase, dengan $\omega = 2\pi f$, dan μ_0 adalah permeabilitas magnet.

Model bumi 2-Dimensi

Dalam kasus model bumi 2-D, tensor impedansi *Z* dapat ditulis sebagai:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}. \tag{4}$$

Dalam kasus ini, komponen Z_{xy} tidak sama dengan Z_{yx} . Medan elektromagnetik total dapat dipisahkan menjadi dua modus yang independen, yaitu modus *transverse electric* (TE) dan *transverse magnetic* (TM). Pada modus TE, arus telurik merambat sepanjang struktur sedangkan pada modus TM, arus tellurik mengalir tegak lurus struktur (Chave & Weidelt, 2012).



Gambar 4. Model 2-D dengan jurus searah sumbu *x*.

Jika arah jurus serah dengan sumbu-x seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4, maka E_x searah dengan arah jurus untuk Z_{TE} (modus TE), sedangkan E_y tegak lurus dengan arah jurus untuk Z_{TM} (modus TM).

Inversi

Proses pemodelan inversi data MT diperlukan dalam rangka menggambarkan distribusi nilai tahanan jenis bawah permukaan. Pemodelan inversi ini sering pula disebut sebagai *data fitting* karena dalam prosesnya dicari parameter model yang menghasilkan respons yang *fit* dengan data pengamatan. Model yang dihasilkan dari proses pemodelan inversi bersifat tidak unik. Ketidak-unikan (*non-uniqueness*) solusi pemodelan geofisika adalah akibat dari paling tidak tiga hal utama, yaitu: sifat fisika fenomena yang ditinjau, adanya kesalahan atau bising (*noise*) pada data dan kekurangan data dalam membatasi atau mendefinisikan (menjadi *constrain*) solusi (Grandis, 2009).

Dalam MT2DInvMatlab, *smoothness-constrained least-squares inversion* diadopsi untuk menyelesaikan masalah regularisasi inversi (Lee dkk., 2009). Linearisasi dari persamaan dalam *forward modeling* dan beberapa manipulasi menghasilkan persamaan:

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T \Delta \mathbf{d} , \quad (5)$$

Di mana $\Delta \mathbf{d}$ merupakan vektor *error* antara data hasil kalkulasi dengan observasi, $\Delta \mathbf{m}$ merupakan perubahan model yang didapatkan, \mathbf{J} merupakan matriks Jacobian atau matriks sensitivitas pada *forward modeling* pada operator \mathbf{A} , \mathbf{C} merupakan operator kehalusan Laplacian (orde kedua), dan λ merupakan parameter regularisasi (*Lagrange multiplier*) atau *trade-off* antara model *constraint* dan data *misfit* (Lee dkk., 2009).

Penentuan parameter regularisasi dapat menjadi hal yang kritis dalam mendapatkan resolusi dan stabilitas. *Lagrange multiplier* yang besar akan membuat konstrain atau regularisasi yang lebih besar, namun resolusi yang buruk.

Sebaliknya, *Lagrange multiplier* yang kecil akan membuat solusi menjadi tidak stabil. Algoritma *Active Constraint Balancing* (ACB) menggunakan *Lagrange multiplier* yang diatur secara optimal oleh *spread function* SP_i pada parameter model ke-i. Nilai λ bervariasi berdasarkan resolusi dari setiap blok inversi. Matriks resolusi parameter \mathbf{R} dapat didapatkan pada proses inversi dengan mengalikan *pseudo-inverse* \mathbf{J}^g dengan matriks Jacobian \mathbf{J} (Lee dkk., 2009).

$$\mathbf{R} = \mathbf{J}^{-g} \mathbf{J} , \quad (6)$$

$$\mathbf{J}^{-g} = (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda^2 \mathbf{C}^T \mathbf{C})^{-1} \mathbf{J}^T . \quad (7)$$

Spread function SP_i pada parameter model ke-l dapat dituliskan dengan:

$$SP_i = \sum_{j=1}^M \{w_{ij}(1 - S_{ij})R_{ij}\}^2 , \quad (8)$$

Di mana M merupakan jumlah iterasi, w_{ij} adalah faktor pembobotan dari matriks resolusi \mathbf{R} , dan S_{ij} merupakan matriks yang digabungkan pada regularisasi (Yi dkk., 2003). Parameter regularisasi $\lambda(x,y)$ diatur dalam interpretasi *log-linear* diatur dalam:

$$\log(\lambda_i) = \log(\lambda_{min}) + \frac{\log(\lambda_{max}) - \log(\lambda_{min})}{\log(SP_{max}) - \log(SP_{min})} \times \{ \log(SP_i) - \log(SP_{min}) \} . \quad (9)$$

Nilai parameter regularisasi pada model model ke-i dengan λ_{min} dan λ_{max} diatur melalui kondisi yang ditentukan sebelumnya.

MT2DInvMatlab menghitung nilai rata-rata tahanan jenis semu secara otomatis dan menggunakannya sebagai nilai awal dari inversi pada tiap model. Blok inversi vertikal didapatkan dengan mengatur tiga parameter, yaitu: *Max Domain Factor*, *Block Inc Factor*, dan *Surface-Block Thickness*. Ketebalan lapisan paling atas didefinisikan sebagai *Surface-Block Thickness* dan kemudian akan bertambah sesuai dengan nilai *BlockInc Factor*,

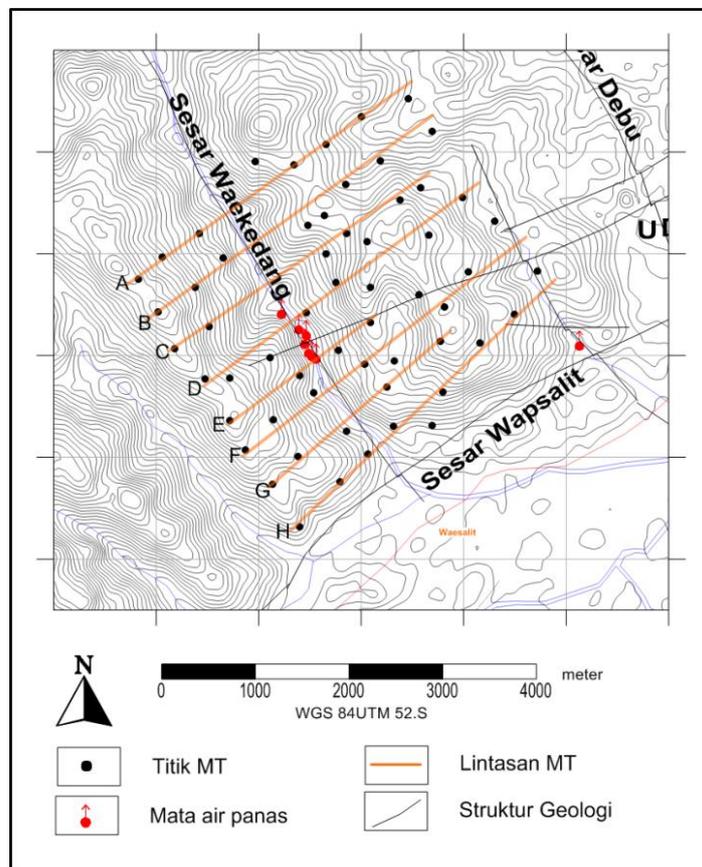
hingga mencapai *skin depth* maksimum dikalikan dengan *Max Domain Factor*. Nilai maksimum dan minimum dari *skin depth* diestimasi dari frekuensi maksimum dan minimum, serta nilai rata-rata logaritmik dari nilai tahanan jenis semunya. Secara horizontal, satu blok dapat disisipkan di antara dua titik MT dan sebuah titik MT diletakkan di tengah blok. Ukuran blok horizontal tergantung pada jarak antar titik MT (Lee dkk., 2009).

Setelah beberapa proses percobaan inversi untuk semua lintasan dengan menggunakan parameter yang berbeda-beda, didapatkan parameter inversi yang sesuai dengan kondisi geologi daerah Wapsalit yang ditunjukkan dalam tabel 1. Dalam tabel tersebut, ditampilkan juga *misfit error* dan *model constraint error* yang dihasilkan dalam proses inversi. Model awal dari setiap lintasan bervariasi tergantung dari nilai rata-rata logaritmik tahanan jenis semu dari setiap lintasan. Rentang frekuensi yang digunakan

berkisar dari 0,01 hingga 320 Hz, rentang nilai parameter regularisasi diatur dari 4 hingga 10. Nilai *Max Domain Factor*, *Block Inc Factor*, dan *Surface-BlockThickness*, masing-masing bernilai 0,05; 1,2 dan 30, digunakan untuk semua lintasan. Untuk memenuhi tujuan dari penelitian ini, kedalaman untuk setiap lintasan hanya ditampilkan sampai dengan kedalaman 3.500 m.

HASIL

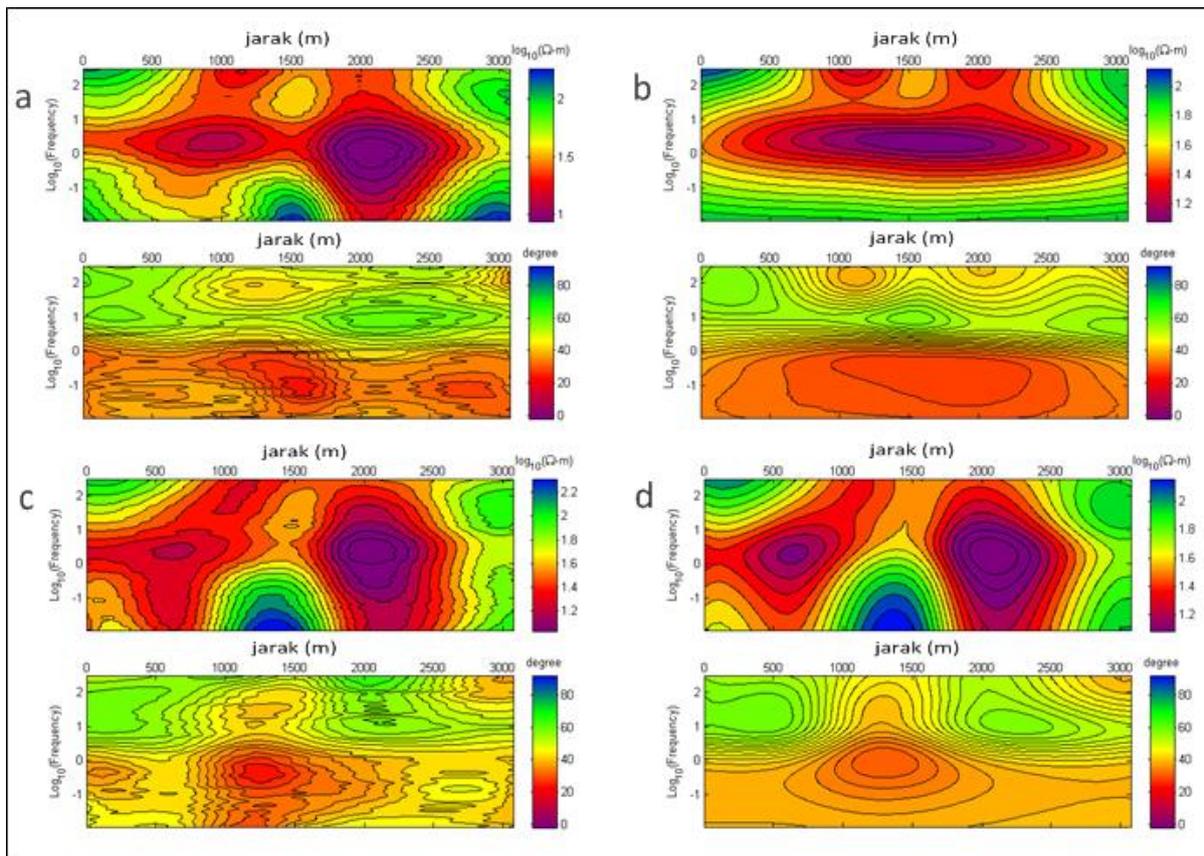
Pengukuran MT di daerah Wapsalit mencakup 58 titik yang terbagi dalam delapan lintasan berarah barat daya – timur laut (lintasan A-H) seperti pada Gambar 5. Jarak antar titik pengukuran berkisar antara 500 – 1.000 m. Arah lintasan pengukuran dibuat tegak lurus dengan arah struktur geologi utama yang berarah barat laut – tenggara. Manifestasi permukaan terletak di sekitar lintasan D dan E dan dikontrol oleh perpotongan dua struktur geologi.



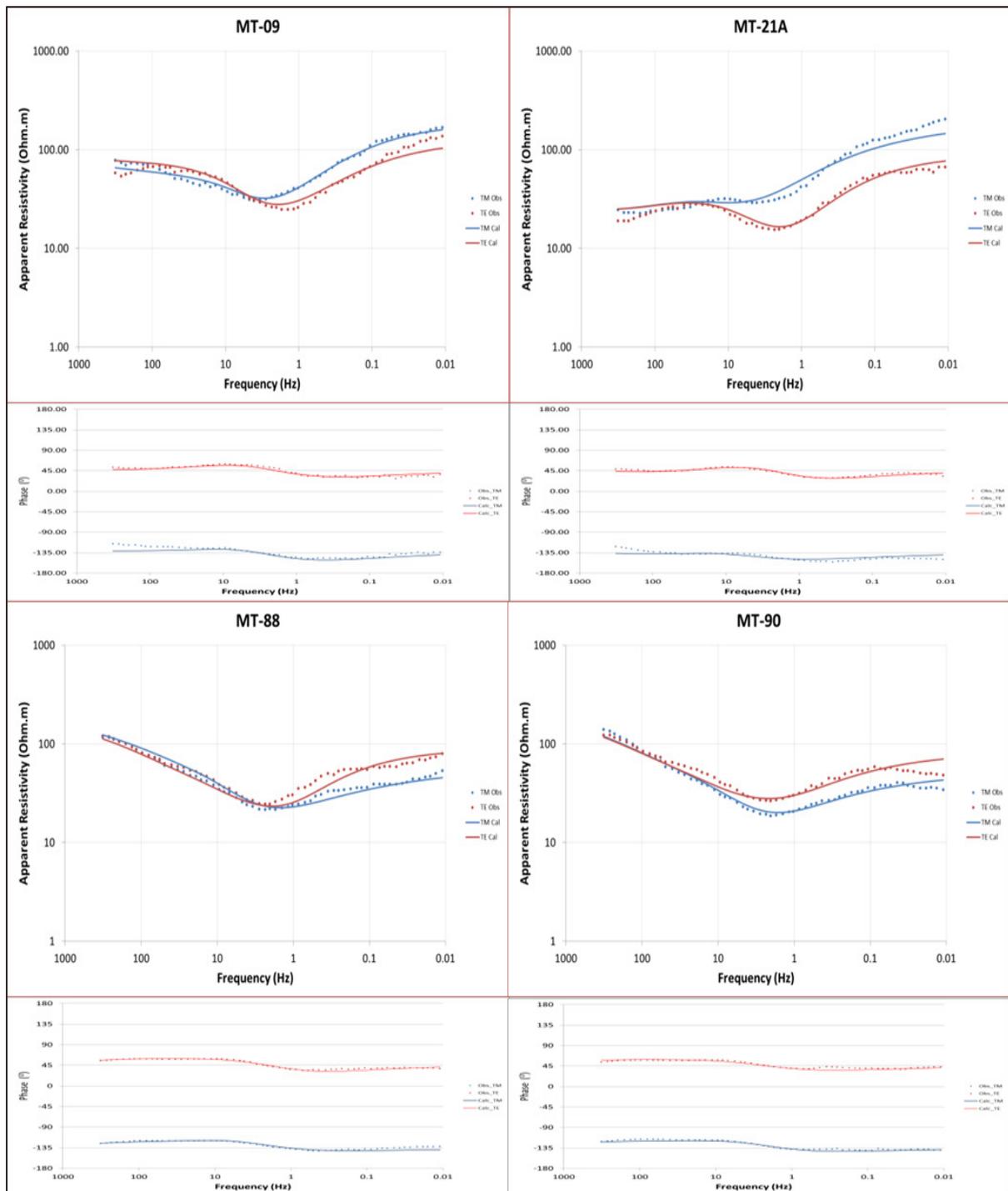
Gambar 5. Distribusi titik ukur MT di daerah panas bumi Wapsalit

Dari Gambar 5, manifestasi permukaan (mata air panas, fumarol, tanah panas dan zona alterasi) terletak di tengah lintasan D dan E. Daerah ini diperkirakan sebagai zona prospek dari daerah panas bumi Wapsalit berdasarkan penelitian sebelumnya (Zarkasyi & Takodama, 2016). Gambar 6 menunjukkan *pseudo-section* dari data hasil pengukuran dan model dari lintasan D untuk inversi TE dan TM. Kurva *sounding* dari data MT-09, MT-

21A, MT-88 dan MT-90 ditunjukkan pada gambar 7. Secara umum, model tahanan jenis semu dan fase untuk setiap modulus TE dan TM cukup bersesuaian dengan data pengukuran. Namun, modulus TM lebih sesuai responnya dari pada modulus TE. Hal ini dikarenakan adanya ketidakteraturan dekat permukaan dan efek topografi.



Gambar 6. Perbandingan data observasi dengan respon model pada modulus TE (a dan b) dan TM (c dan d) pada inversi gabungan modulus TE dan TM pada lintasan D. Gambar atas menunjukkan tahanan jenis semu dan gambar bawah menunjukkan fase.



Gambar 7. Kurva misfit pada sebagian data MT pada modus TE dan TM. Garis putus-putus berwarna merah dan biru menggambarkan data observasi modus TE dan TM, sedangkan garis penuh berwarna merah dan biru menunjukkan respon model dari modus TE dan TM.

Tabel 1. Parameter inversi pada semua lintasan

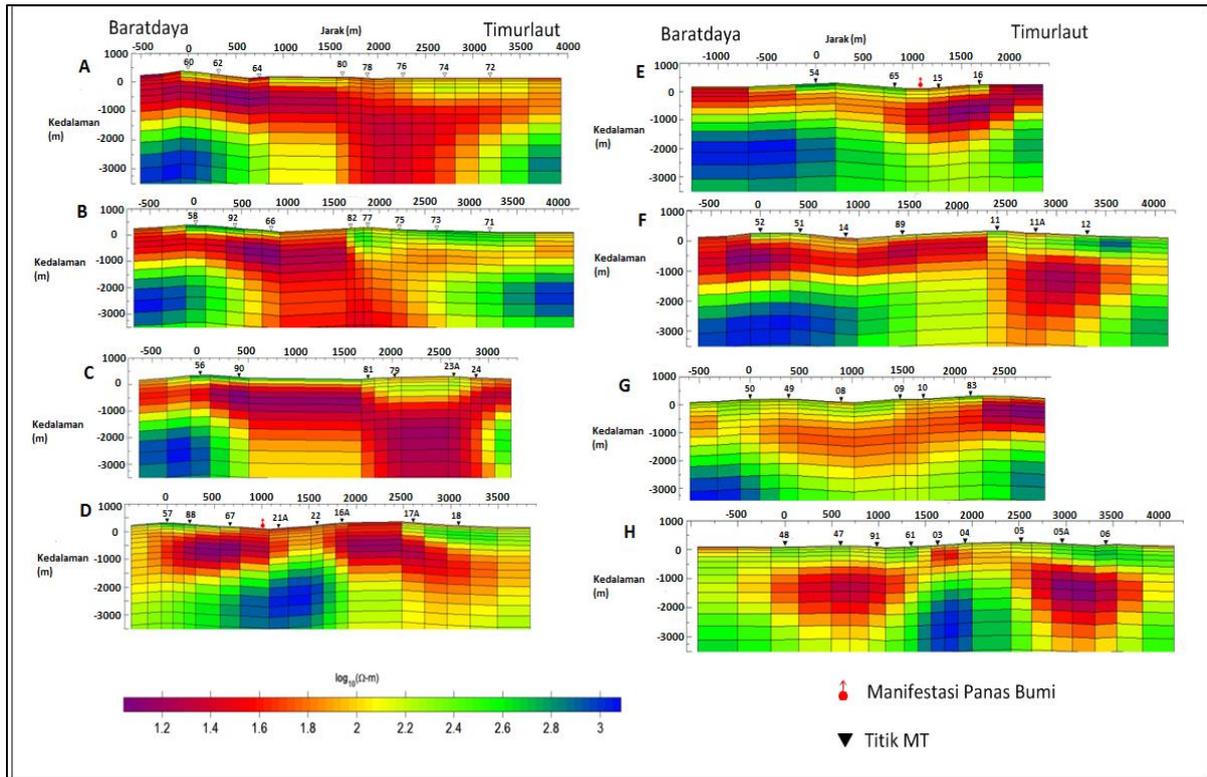
Lintasan	Iterasi	Model Awal (Ωm)	Jumlah Blok	Misfit error	Model constraint error
Lintasan-A	5	75,94	342	0,2078	0,0163
Lintasan-B	5	58,14	304	0,1550	0,0111
Lintasan-C	5	50,62	225	0,1212	0,0091
Lintasan-D	5	40,58	361	0,2066	0,0160
Lintasan-E	5	30,80	154	0,1810	0,0141
Lintasan-F	5	45,79	289	0,1971	0,0164
Lintasan-G	5	61,75	255	0,1976	0,0215
Lintasan-H	5	67,44	336	0,1705	0,0146

Gambar 8 menunjukkan model tahanan jenis hasil inversi dari data MT di daerah Wapsalit. Tiga lintasan di bagian utara (Lintasan A, B dan C) mempunyai pola tahanan jenis bawah permukaan yang mirip dimana zona konduktif berada di bagian barat daya hingga tengah lintasan dengan ketebalan mencapai 1.000 m di bagian tengah. Zona resistif dengan nilai tahanan jenis lebih dari 750 Ohm.m terletak di barat daya lintasan dari kedalaman 2.000 m

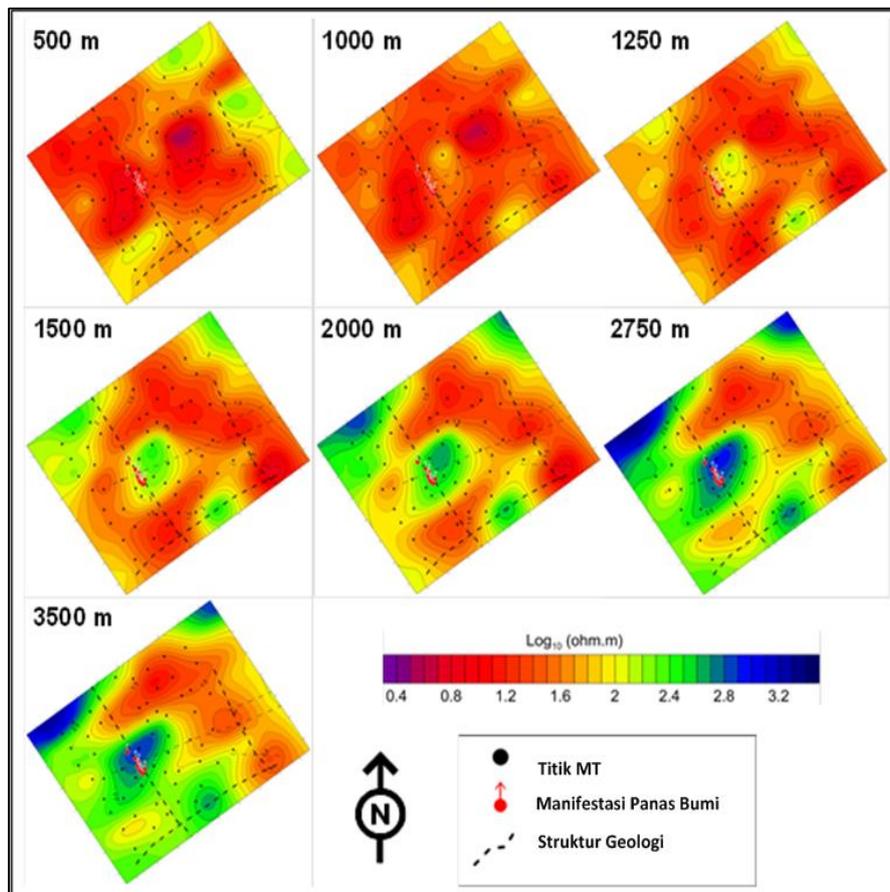
Zona konduktif dengan nilai tahanan jenis kurang dari 40 Ohm.m juga muncul di lintasan D dan E dengan kedalaman 500 hingga 1.000 m dari permukaan dan memanjang sepanjang lintasan. Zona resistif muncul di tengah lintasan D di bagian bawah, dan di bagian barat daya lintasan E. Struktur tahanan jenis di lintasan yang lainnya mempunyai sebaran yang mirip, dimana zona konduktif berada di dekat permukaan dengan ketebalan yang bervariasi. Sedangkan zona resistif terletak di bagian bawah di bagian barat daya dan timur laut dari lintasan F dan G, serta di bagian tengah lintasan H.

Gambar 9 menunjukkan distribusi lateral tahanan jenis bawah permukaan hasil inversi dari kedalaman 500 hingga 3.500 m. Zona konduktif mendominasi di hampir semua bagian di dekat permukaan hingga kedalaman 1.000 m. Pada kedalaman 1.250 m, zona konduktif masih mendominasi, namun di bagian barat laut, timur laut, selatan dan sekitar manifestasi permukaan menjadi lebih resistif. Zona konduktif tersebut menjadi zona resistif yang ditunjukkan oleh warna hijau pada kedalaman 1.500 m.

Di lapisan bawah, nilai tahanan jenis bertambah di hampir seluruh area. Warna biru yang menunjukkan zona resistif muncul di bagian barat laut dan timur laut. Di daerah manifestasi permukaan, nilai tahanan jenis sedang muncul di lapisan atas dan menjadi semakin resistif seiring dengan bertambahnya kedalaman. Di bagian utara dan timur, zona konduktif masih muncul hingga bagian yang lebih dalam. Di bagian selatan, zona konduktif masih muncul hingga kedalaman 2.000 m, namun menjadi lebih resistif di kedalaman juga.



Gambar 6. Model tahanan jenis hasil inversi 2-D di daerah panas bumi



Gambar 7. Distribusi tahanan jenis lateral per kedalaman di daerah panas bumi Wapsalit

DISKUSI

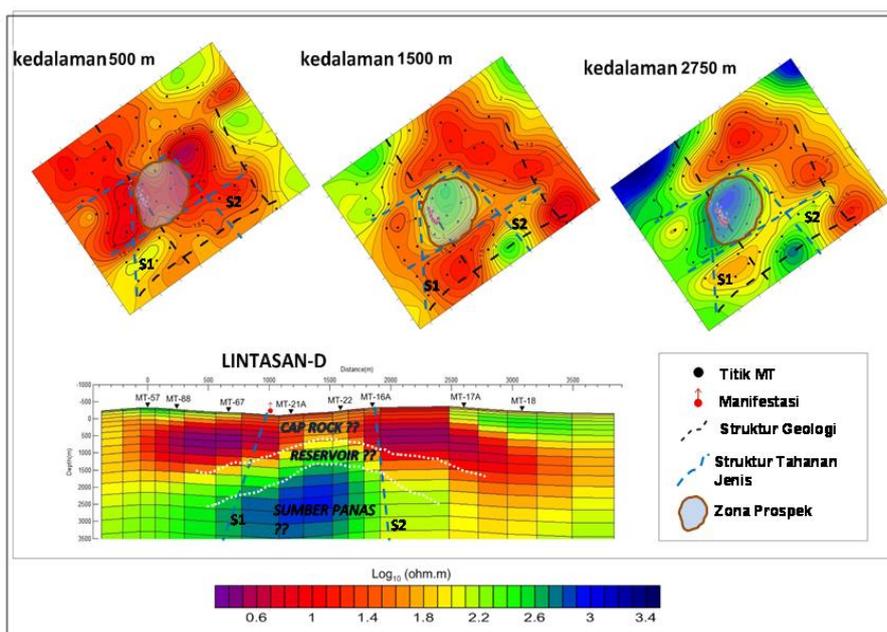
Berdasarkan hasil survei MT ini diduga bahwa zona prospek daerah Wapsalit terletak di sekitar manifestasi permukaan. Manifestasi permukaan yang berupa mataair panas, tanah panas, fumarol, dan batuan alterasi dikontrol oleh perpotongan dari sesar Waekedang (barat laut – tenggara) dan kompleks sesar Metar (barat daya – timur laut).

Berdasarkan sebaran tahanan jenis, zona konduktif berada di bagian tengah area (sekitar manifestasi panas bumi) yang tersebar mulai dari permukaan. Pada kedalaman 500 meter zona konduktif ini masih tersebar dominan terutama dibagian tengah area dan dibagian baratlaut. Pada bagian tengahnya ini diduga berasosiasi dengan batuan metamorf yang teralterasi dan bersifat impermeabel (Hadi & Sulaeman, 2010). Lapisan konduktif (<40 Ohm.m) ini diinterpretasikan sebagai batuan penudung dari sistem panas bumi Wapsalit dengan ketebalan 1.000 hingga 1.250 m (Gambar 10).

Pada kedalaman 1.500 m, sebaran nilai tahanan jenis dibagian tengah ini mengalami peningkatan (lebih resistif

dibandingkan lapisan di atasnya). Zona ini memiliki rentang nilai tahanan jenis antara 50 hingga 300 Ohm.m. Zona ini diinterpretasikan sebagai zona reservoir dari sistem panas bumi. Umumnya nilai tahanan jenis di reservoir lebih tinggi dibandingkan dengan nilai tahanan jenis batuan penudung. Kontras tahanan jenis yang muncul pada bagian barat dari zona ini pada kedalaman 1.500 m diperkirakan berasosiasi dengan sesar Waekedang. Kontras tahanan jenis juga muncul dibagian utara, timur dan selatan dari zona tersebut. Keempat kontras ini membentuk batasan bagi zona prospek panas bumi di daerah Wapsalit.

Nilai tahanan jenis tinggi lebih dari 1.000 Ohm.m muncul di lapisan bawah dari zona prospek dengan bentuk menyerupai kubah. Nilai tahanan jenis tinggi ini berhubungan dengan anomali gaya berat tinggi (Rezky dan Zarkasyi, 2010) dan diperkirakan sebagai intrusi batuan vulkanik muda yang berlaku sebagai sumber panas dari sistem panas bumi Wapsalit (lihat profil penampang pada Gambar 10). Pada kedalaman 2750 m dibagian zona prospeknya semakin resistif yang diduga merupakan tubuh dari batuan intrusif batuan vulkanik muda.



Gambar 8. Interpretasi struktur tahanan jenis dari data MT di daerah panas bumi Wapsalit.

KESIMPULAN

Distribusi nilai tahanan jenis dapat digunakan untuk mendelineasi zona prospek panas bumi. Zona prospek panas bumi Wapsalit terletak di sekitar manifestasi permukaan dan memanjang ke bagian timur. Batuan metamorf teralterasi tersingkap di permukaan dan ditunjukkan sebagai lapisan konduktif hingga kedalaman 1.000 sampai 1.250 m. Lapisan ini diinterpretasikan sebagai batuan penudung dari sistem panas bumi Wapsalit.

Zona reservoir dengan perkiraan temperatur sebesar 240°C terletak di bawah batuan penudung dan ditunjukkan sebagai lapisan tahanan jenis menengah dengan rentang nilai 50 – 300 Ohm.m. Puncak dari zona reservoir ini diperkirakan berada pada kedalaman 1.500 m. Zona resistif di lapisan paling bawah diperkirakan sebagai bagian dari batuan panas yang berperan sebagai sumber panas yang berada jauh pada kedalaman di bawah zona prospek sistem panas bumi Wapsalit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang telah memberikan izin dalam mengolah data MT ini. Penulis pertama juga mengucapkan terima kasih kepada Prof. Hideki Mizunaga dari Kyushu University atas bimbingannya mengenai topik ini.

DAFTAR ACUAN

- Buonasorte, G., Caranova, R., Fiordelisi, A., & Ungarelli, C. (2013). MT as a tool for Geothermal exploration : a case study from Southern Tuscany. *European Geothermal Congress*. Pisa: EGC.
- Chave, A. D., & Jones, A. G. (2012). *The Magnetotelluric Method Theory and Practice*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chave, A. D., & Weidelt, P. (2012). The Theoretical Basis for Electromagnetic Induction. In A. D. Chave, & A. G. Jones, *The Magnetotelluric Method* (pp. 19-44). Cambridge: Cambridge University Press.
- Goldstein, B., Hill, A., Long, A., Budd, A., Holgate, F., & Malavazos, M. (2009). Hot Rock Geothermal Energy Plays in Australia. *Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, California.
- Grandis, H. (2009). *Pengantar Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: HAGI.
- Hadi, M. N., & Sulaeman, B. (2010). Surface Manifestation in Wapsalit Geothermal Area, Buru Island, Indonesia. *Proceeding World Geothermal Congress 2010*. Bali.
- Kholid, M., Widodo, S., & Rezky, Y. (2015). 2D Inversion of Magnetotelluric Data from Wapsalit Geothermal Field, Indonesia. *World Geothermal Congress*. Melbourne.
- King, R., & Miller, M. (2010). Multiuse "Triple Play" Hot Sedimentary Aquifer (HSA) Potential of Victoria, Australia. *World Geothermal Congress*. Bali.
- Lee, S. K., Kim, H. J., Song, Y., & Lee, C. K. (2009). MT2DInvMatlab--A program in MATLAB and FORTRAN for two-dimensional magnetotelluric inversion. *Computer & Geosciences* 35, 1722-1734.
- Niasari, S. W., Munoz, G., Kholid, M., Suhanto, E., & Ritter, O. (2015). 3D Inversion of Magnetotelluric Data from the Sipoholon Geothermal Field, Sumatera, Indonesia. *World Geothermal Congress*. Melbourne.
- Rezky, Y., & Zarkasyi, A. (2010). Indication of Intrusive Body in Wapsalit Geothermal Area, Buru Island, Indonesia. *World Geothermal Congress*. Bali.

Uchida, T., Takakura, S., Ueda, T., Adachi, M., Ozeki, H., Kamada, K., et al. (2011). 3D Magnetotelluric Survey at The Yanaizu-Nishiyama Geothermal Field, Northern Japan. *Proceedings of the 9th Asian Geothermal Symposium*. Ibusuki.

Zarkasyi, A., & Takodama, I. (2016). *Survei Magnetotellurik dan Time Domain Elektromagnetik Daerah Panas Bumi Wapsalit, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku*. Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.

Diterima	: 10 September 2018
Direvisi	: 27 September 2018
Disetujui	: 29 November 2018

KETERKAITAN KELIMPAHAN UNSUR *MAJOR* DAN *MINOR* DENGAN ZONASI LATERIT NIKEL BLOK HZ (HARZBURGIT) DAN DN (DUNIT) DAERAH PULAU PAKAL, HALMAHERA TIMUR

RELATION OF MAJOR AND MINOR ELEMENTS ENRICHMENT WITH NICKEL LATERITE ZONATION IN HARZBURGITE (HZ) AND DUNITE (DN) BLOCKS AT PAKAL ISLAND, EAST HALMAHERA

Fiandri I. Rinawan¹, Mega F. Rosana¹, Mohammad N. Heriawan², dan Euis T. Yuningsih¹

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

²Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, ITB
irfiandri@gmail.com

ABSTRAK

Keterkaitan kelimpahan unsur pada profil laterit nikel dilakukan berdasarkan hasil analisis kimia unsur *major* (Fe, SiO₂, MgO, dan Al₂O₃) dan *minor* (Ni, Co, MnO, dan Cr₂O₃) menggunakan analisis univariat dan multivariat. Profil berupa tanah atau hancuran batuan hasil lapukan litologi ultrabasa harzburgit (Blok HZ) dan dunit (Blok DN) berumur Kapur hingga Jura, terletak di daerah Pulau Pakal, Halmahera Timur. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui hubungan antar unsur kimia *major* dan *minor* terhadap nilai koefisien korelasi kuat hingga sangat kuat baik negatif maupun positif yang terdistribusi pada profil laterit nikel Blok HZ dan DN. Penelitian ini fokus pada identifikasi fisik mineralogi *bedrock* dan analisis kimia profil laterit nikel. Identifikasi fisik di Blok HZ melibatkan 436 conto berasal dari 19 pemboran, kedalaman 10 m hingga 40 m. Adapun identifikasi fisik di Blok DN melibatkan 650 conto berasal dari 16 pemboran, kedalaman 11 m hingga 57 m. Komposisi mineral di Blok HZ terdiri dari mineral oksida besi limonit, gutit, jarosit, dan oksida mangan (zona limonit); krisopras, garnierit, magnetit, hematit, serpentin-krisotil, dan stiktit (zona saprolit); olivin-forsterit, piroksen-ortopiroksen, dan kromit (zona *boulder/bedrock*). Sedangkan di Blok DN terdiri dari mineral oksida besi limonit, gutit, dan oksida mangan (zona limonit); krisopras, jarosit, garnierit, magnetit, hematit, mineral lempung montmorilonit, kuarsa, serpentin-krisotil, dan talk (zona saprolit), olivin-forsterit, piroksen-hastingsit, dan kromit (zona *boulder/bedrock*). Analisis statistik univariat menunjukkan distribusi data relatif tidak normal dengan koefisien variasi > 0,5. Pada analisis statistik multivariat mengindikasikan nilai koefisien korelasi positif maupun negatif pada zonasi laterit nikel berupa hubungan unsur yang sangat kuat ($\pm 0,80 - 1,00$) dengan jumlah korelasi dominan. Koefisien korelasi pada Blok HZ diantaranya mengindikasikan pasangan unsur yang berkorelasi sangat kuat yaitu: unsur *major-major* (Fe vs MgO, Fe vs SiO₂, SiO₂ vs MgO, dan MgO vs Al₂O₃), *minor-minor* (Co vs MnO) serta *major-minor* (Al₂O₃ vs Cr₂O₃, Fe vs Co, Fe vs MnO, dan SiO₂ vs Co). Sedangkan pada Blok DN pasangan unsur yang berkorelasi sangat kuat yaitu: unsur *major-major* (Fe vs MgO), *minor-minor* (Co vs MnO) dan *major-minor* (Fe vs Co, Fe vs Cr₂O₃, Fe vs MnO, MgO vs Co, dan MgO vs MnO). Hal ini berkaitan dengan posisi masing-masing korelasi distribusi unsur kimia *major* dan *minor* tersebut pada zona profil laterit nikel Limonit, Saprolit dan *Boulder/Bedrock*.

Kata kunci: Analisis korelasi, unsur *major-minor*, profil laterit nikel, ultrabasa, harzburgit, dunit

ABSTRACT

Relation of element enrichment in nickel laterite profiles was processed based on major elements (Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃) and minor elements (Ni, Co, MnO, Cr₂O₃) chemical analysis using univariate and multivariate analysis. Profiles such as soil or rock powder from weathered results of ultrabasic lithology of harzburgite (HZ Block) and dunite (DN Block), Cretaceous-

Jurassic ages located in Pakal Island, East Halmahera. The main purpose of this research is to analyze the major and minor elements association related to the strong to very strong correlation which distributed in nickel laterite profile in the block of HZ and DN. This research focused on the physical identification and chemical analysis of nickel laterite profile. In HZ block involved of 436 samples from 19 drillholes, 10 m to 40 m depths and in DN block involved 650 samples from 16 drillholes, 11 m to 57 m depths. Mineral composition result showed that in HZ block were: limonite iron oxide, goethite, jarosite, mangan oxide (limonite zone); chrysoprase, garnierite, magnetite, hematite, montmorillonite clay mineral, serpentine-chrysotile, stictite (saprolite zone); and olivine-forsterite, orthopyroxene, chromite (boulder/bedrock zone); and mineralogical composition in DN block were: limonite iron oxide, goethite, mangan-oxide, jarosite, (limonite zone); chrysoprase, garnierite, magnetite, hematite, clay-mineral, quartz, serpentine talc (saprolite zone); olivine-forsterite, pyroxene-hastingsite, and chromite (bedrock/boulder zone). Univariate statistical analysis showed that the data distribution were not normal with Coefficient of Variation (CoefVar) >0.5. In multivariate statistical analysis indicated the positive and negative correlation coefficients in nickel laterite zoning in the form of very strong elements relationships ($\pm 0.80-1.00$) with the number of dominant correlations. The correlation coefficients in HZ block indicated the strong correlation of elements pair i.e. major-major (Fe vs MgO, Fe vs SiO₂, SiO₂ vs MgO, MgO vs Al₂O₃), minor-minor (Co vs MnO) dan major-minor elements (Al₂O₃ vs Cr₂O₃, Fe vs Co, Fe vs MnO, SiO₂ vs Co). While in DN Block indicated the strong correlation of elements pair i.e. major-major (Fe vs MgO), minor-minor (Co vs MnO) dan major-minor elements (Fe vs Co, Fe vs Cr₂O₃, Fe vs MnO, MgO vs Co, MgO vs MnO). Those major-minor elements association correlation distribution were shown in each base position zone of nickel laterite such as limonite, saprolite and boulder/bedrock.

Keywords: correlation analysis, major-minor elements, nickel laterite profile, ultramafic, harzburgite, dunite

PENDAHULUAN

PT ANTAM Tbk., mempunyai prospek IUP eksplorasi komoditas laterit nikel yang berlokasi di daerah Pulau Pakal, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara. Daerah tersebut menempati kompleks batuan ultrabasa, dunit, piroksenit dan serpentin berumur Kapur hingga Jura, sebagai batuan dasar endapan sekunder laterit nikel. Batuan dasar ini merupakan bagian dari seri ofiolit kerak samudra (Ishiwatari, 1994). Seri ofiolit di daerah Halmahera sebagai segmen yang terangkat oleh proses geotektonik obduksi dan struktur sesar naik, yang kemudian lapuk dan tererosi hingga tersingkap batuan ultrabasa dunit dan peridotit (Harris, 2003).

Pada daerah Pakal tersebut di atas, telah dilakukan eksplorasi oleh Unit Geomin (2013) berupa pemetaan geologi, geofisika, dan pemboran dan analisis kimia

laterit nikel. Selain itu di Pulau Pakal telah dilakukan penyelidikan oleh peneliti terdahulu, diantaranya terkait hubungan geomorfologi dan profil laterit nikel oleh Syafrizal (2009) dan tentang kriteria terkait perhitungan sumber daya laterit nikel oleh Augusman (2009).

Variabilitas dan heterogenitas kondisi laterit nikel berkaitan dengan karakteristik keberadaan komposisi fisik, komposisi kimia, sifat fisik, sifat kimia, dan komposisi profil laterit nikel. Zonasi profil laterit nikel ini terdiri dari *boulder/bedrock*, *saprolit*, *limonit*, dan *top soil*. Masing-masing zonasi dicirikan oleh komposisi distribusi unsur kimia Ni, terutama pada zona *saprolit* yang mempunyai komposisi Ni yang tinggi ($\geq 2\%$).

Berkaitan dengan hal tersebut, maka dirancang studi geologi laterit nikel, dengan melakukan pemetaan geologi, pengambilan contoh pemboran pada profil

laterit nikel dari permukaan hingga batuan dasar dunit atau peridotit (harzburgit).

Analisis kimia dilakukan pada zonasi *top soil*, limonit, saprolit hingga *boulder/bedrock*. Masing-masing zonasi ini mempunyai komposisi kimia unsur *major*, dengan klasifikasi > 3% yaitu Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃ dan unsur *minor* dengan klasifikasi < 3%, yaitu Ni, Co, MnO, Cr₂O₃ (Ahmad, 2006).

Studi ini difokuskan pada identifikasi profil laterit nikel, berkaitan dengan data hasil deskripsi komposisi fisik conto pemboran laterit dan data hasil analisis kimia unsur *major* dan *minor* yang disajikan melalui analisis statistik univariat berupa statistik deskriptif, histogram dan plot probabilitas dan multivariat berupa analisis korelasi. Sedangkan tujuannya yaitu untuk mengetahui hubungan antar unsur *major* dan *minor* yang menempati dan terakumulasi pada conto profil laterit nikel *Top Soil*, Limonit, Saprolit dan *Boulder/Bedrock*.

Hal tersebut bertujuan untuk mengidentifikasi ciri karakteristik distribusi unsur kimia pada profil laterit nikel secara spesifik terhadap batuan dasar tersebut maupun hasil pelapukannya. Maka dalam penelitian ini, metode analisis multivariat digunakan untuk mengkaji hubungan antar unsur *major* dan *minor*. Metode ini secara kuantitatif dapat memfasilitasi pemahaman tentang interpretasi zonasi laterit nikel. Metode ini berguna untuk menentukan unsur-unsur yang saling berkorelasi kuat hingga sangat kuat antara unsur *major* dan *minor* sebagai unsur-unsur yang dapat menginterpretasikan kondisi zonasi laterit nikel. Adapun hasil analisis multivariat tersebut dikaitkan dengan hasil deskripsi conto pemboran untuk mendapatkan gambaran kesesuaian antara hasil analisis multivariat dengan deskripsi conto pemboran.

GEOLOGI REGIONAL DAN GEOLOGI DAERAH PENELITIAN

Daerah Halmahera Timur diapit oleh pola sesar naik berarah Utara-Selatan dan Barat Laut-Tenggara yang mengakibatkan seri ofiolit bagian bawah dapat tersingkap. Geologi regional Halmahera Timur meliputi Lengan Timurlaut, dan Lengan Tenggara. Morfologi mandala ini terdiri dari pegunungan berlereng terjal yang merupakan pencerminan dari batuan ultrabasa dan morfologi karst batugamping, sedangkan morfologi dengan perbukitan yang relatif rendah dan lereng yang landai mencerminkan batuan sedimen (Apandi dan Sudana, 1980). Batuan ultrabasa menempati pulau-pulau kecil di sebelah Timur Pulau Halmahera, salah satunya Pulau Pakal (Gambar 1). Stratigrafi regional daerah penelitian disusun oleh kompleks batuan ultrabasa (Ub) merupakan batuan tertua, diperkirakan berumur Kapur hingga Jura. Jenis litologi pada formasi ini terdiri dari serpentinit, piroksenit, dan dunit yang umumnya berwarna hitam, getas, kebanyakan terpecah, terbreksikan, setempat mengandung asbes dan garnierit.

Berdasarkan hasil penelitian Rinawan (2012), Pulau Pakal tersusun oleh batuan ultramafik Dunit dan Harzburgit terserpentinisasi. Satuan stratigrafi daerah penelitian terdiri dari satuan batuan dunit (Ycd), satuan batuan harzburgit (Ych), dan aluvium (Qa) (Gambar 2). Satuan batuan dunit (Ycd) menempati daerah Pulau Pakal berkisar seluas 30% di sekitar Selatan, Tenggara dan Timur Laut daerah penelitian. Satuan batuan harzburgit (Ych) menempati daerah Pulau Pakal berkisar seluas 60% di sekitar baratdaya-baratlaut-utara-timurlaut-tenggara daerah penelitian. Kedua satuan batuan tersebut berumur Kapur-Jura yang dibandingkan dengan stratigrafi regional kompleks batuan ultrabasa (Apandi dan Sudana, 1980).

Aluvium (Qa) menempati daerah pantai Pulau Pakal berkisar seluas 10% daerah penelitian. Aluvium ini dibandingkan dengan stratigrafi regional aluvium dan endapan pantai berumur Kuarter (Apani dan Sudana, 1980).

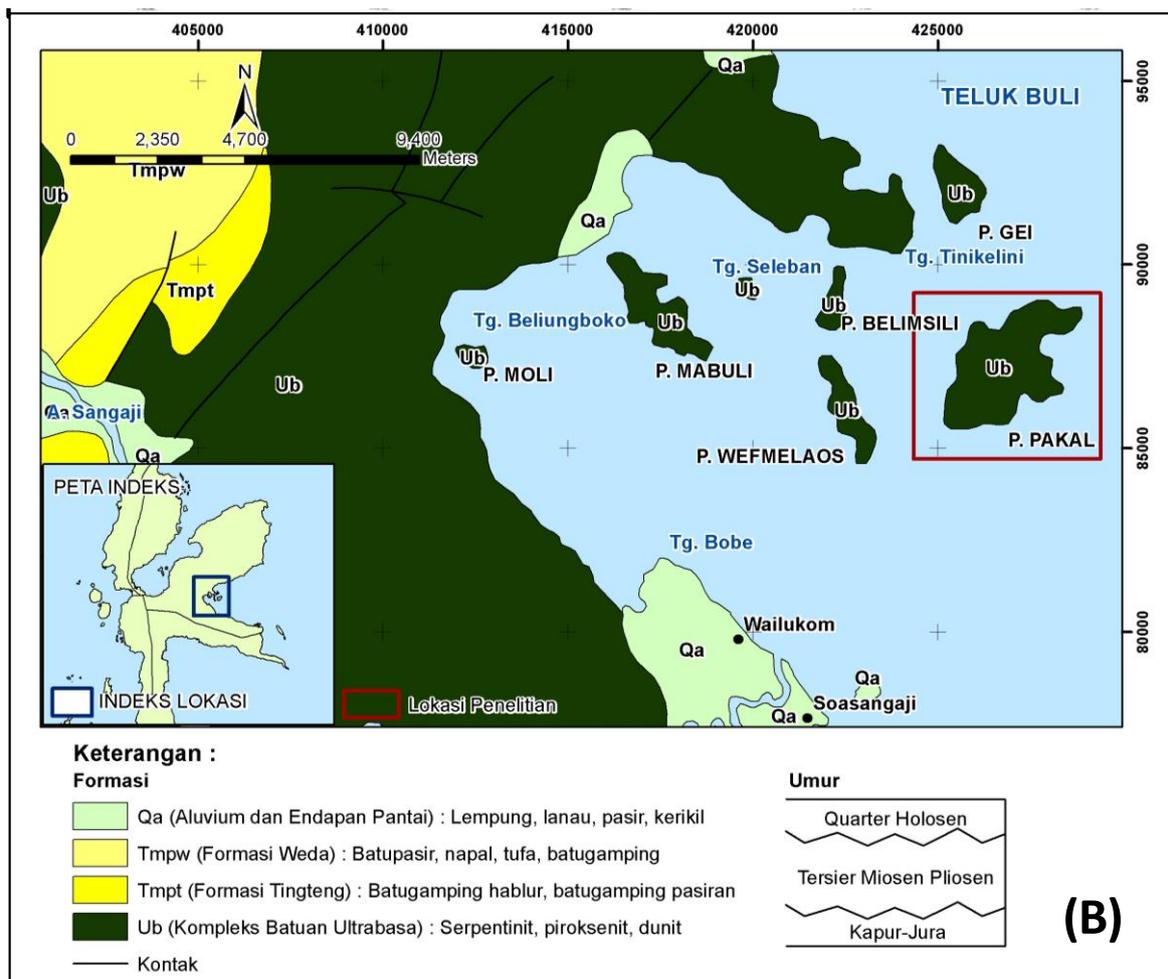
Struktur geologi Pulau Pakal terjadi terutama pada litologi satuan batuan dunit dan harzburgit yang dicirikan dengan indikasi struktur yang kuat dijumpai pada singkapan batuan tersebut berupa kekar dan retakan (Rinawan, 2012). Berdasarkan data yang diperoleh dari singkapan kekar dan retakan menunjukkan bahwa struktur diinterpretasikan sebagai sesar naik dengan arah umum tegasan adalah NE-SW.

Indikasi struktur baik pada batuan dunit maupun harzburgit berkaitan adanya kekar

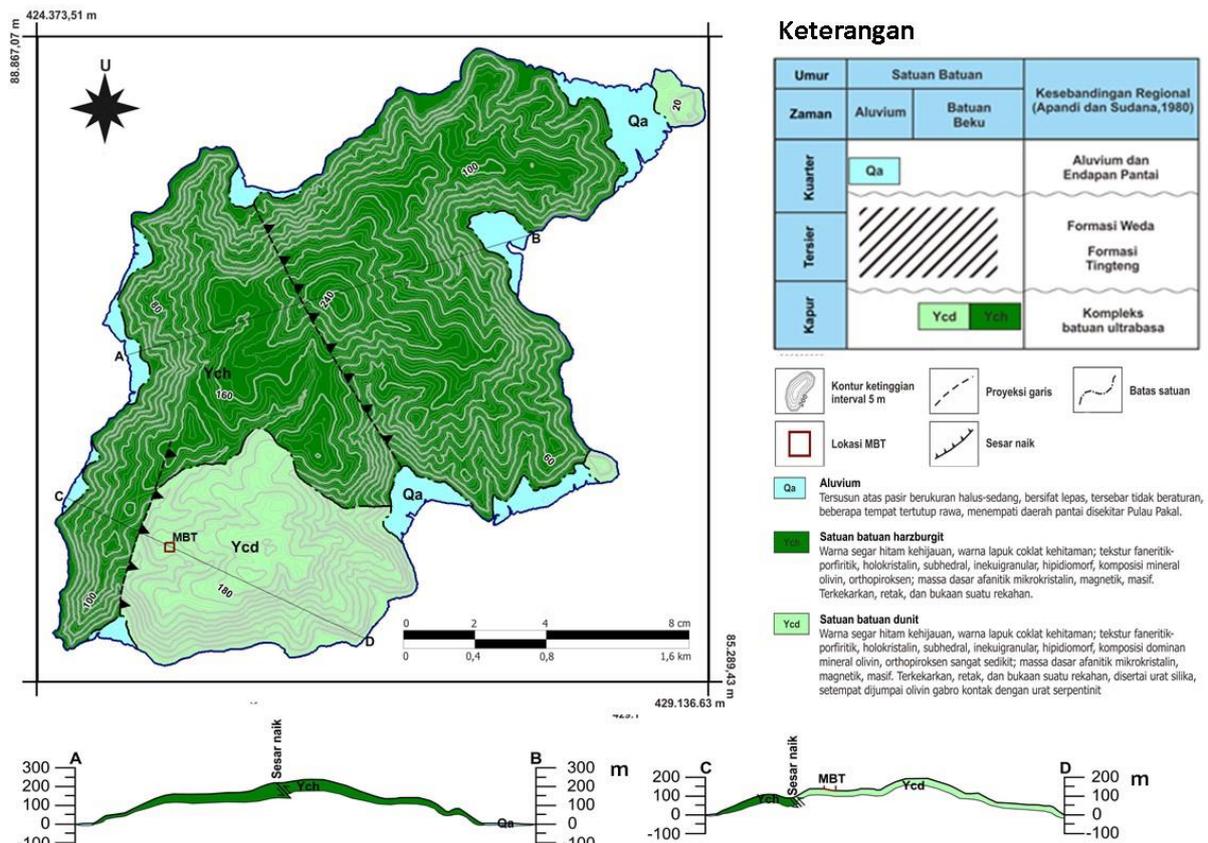
dan retakan yang diindikasikan sebagai kriteria persyaratan terbentuknya laterit nikel di daerah tropis (Ahmad, 2006). Melalui bidang-bidang sesar, kekar, dan retakan akan menyebabkan kemudahan perkolasi air sehingga terjadinya pelapukan batuan.

Satuan batuan dunit terangkat oleh struktur sesar naik memotong satuan batuan harzburgit dengan arah jurus struktur NNE-SSW terdapat pada bagian barat daya Pulau Pakal. Tersingkapnya satuan batuan dunit di permukaan dikarenakan batuan di atasnya tererosi.

Satuan batuan harzburgit terangkat oleh struktur sesar naik memotong satuan batuan harzburgit dengan arah jurus struktur NNW-SSE terdapat memanjang di bagian tengah Pulau Pakal.



Gambar 1. Geologi Regional Daerah Tanjung Buli dan sekitarnya (Apani dan Sudana, 1980, modifikasi)



Gambar 2. Peta Geologi Pulau Pakal (Rinawan, 2012)

METODOLOGI

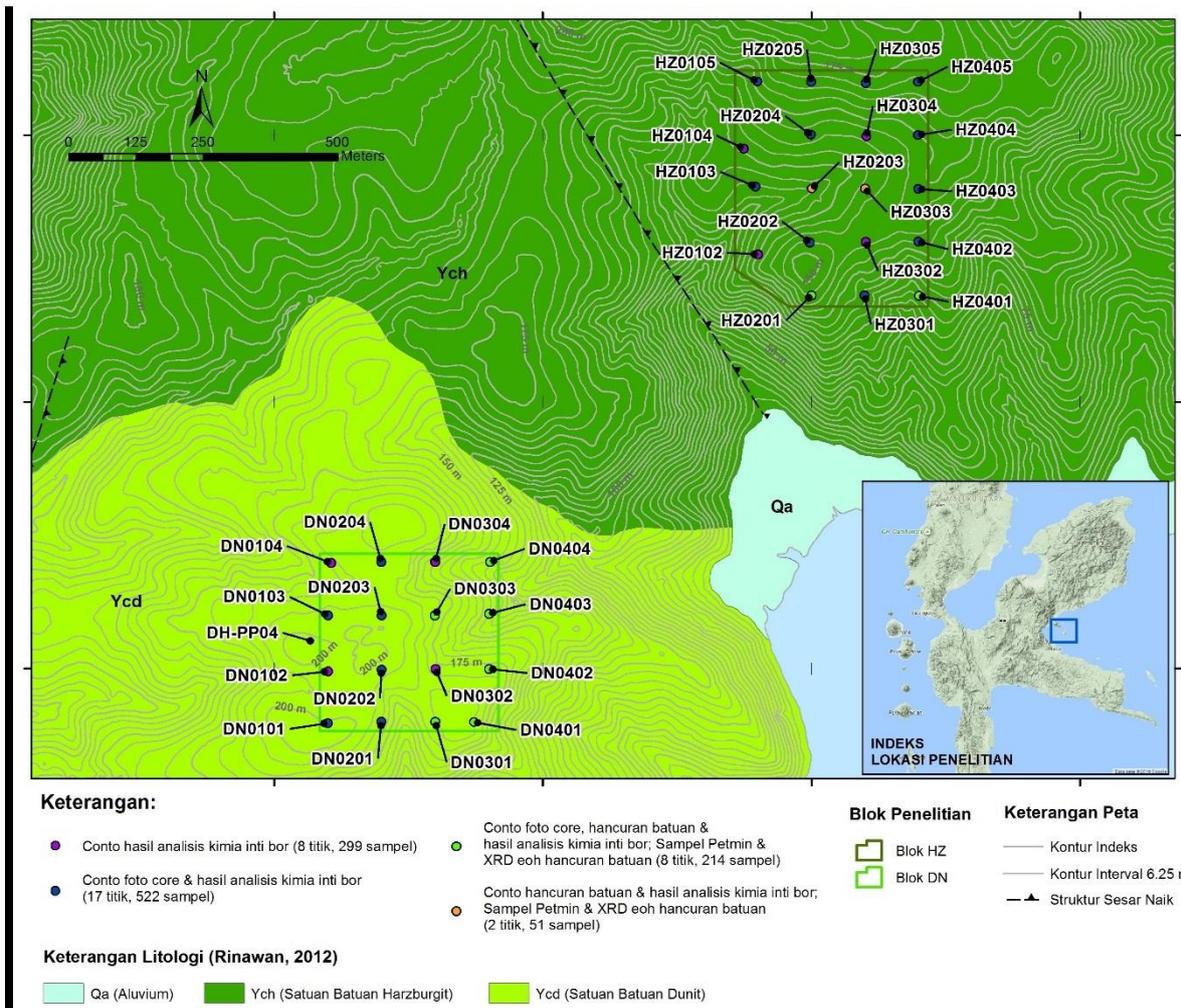
Conto tanah dan batuan per meter diambil dari pemboran profil laterit nikel pada 2 daerah yaitu (Gambar 3): Blok HZ luas ± 12 hektar, sebanyak 436 conto dari 19 bor, dengan kedalaman 10 m s.d. 41 m, dan Blok DN, luas ± 9 hektar, sebanyak 650 conto dari 16 bor, dengan kedalaman 11 m s.d. 57 m. Daerah blok HZ dan Blok DN, masing-masing menempati satuan batuan harzburgit dan satuan batuan dunit (Rinawan, 2012).

Identifikasi fisik conto terpilih dari inti pemboran dilakukan secara megaskopis, petrografi, mineragrafi, dan XRD.

Adapun 4 unsur *major* yaitu Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃ dan 4 unsur *minor* yaitu Ni, Co, MnO, Cr₂O₃ dianalisis dengan metode XRF. Hasil analisis kimia 8 unsur kimia tersebut, digunakan sebagai *database* kimia dalam melakukan statistik multivariat yaitu analisis korelasi unsur *major* dan *minor*.

Pengolahan data diawali dengan penggunaan metode statistik deskriptif untuk unsur *major* dan *minor* terhadap variabel: *mean*, *median*, *stDev*, koefisien variasi, nilai minimum, nilai maksimum, *skewness*, dan *kurtosis*. Selanjutnya digambarkan histogram setiap unsur kimia *major* dan *minor*, masing-masing untuk blok HZ dan DN secara keseluruhan maupun per zona laterit.

Selanjutnya digunakan metode statistik multivariat berupa analisis korelasi untuk menentukan hubungan antara dua variabel yang saling berkaitan satu sama lainnya. Adapun koefisien korelasi (r) digunakan sebagai satuan besaran: besar-kecilnya nilai hubungan antara dua variabel yang dinyatakan dalam satuan jumlah korelasi dengan kisaran nilai $-1 < r < +1$. Setiap nilai korelasi mempunyai tingkatan nilai hubungan (Sugiyono, 1999).



Gambar 3. Peta lokasi pengambilan conto laterit nikel Daerah Pulau Pakal

HASIL

Identifikasi Fisik

Identifikasi fisik berdasarkan metode megaskopik, serta ditunjang metode analisis petrografi, mineragrafi dan XRD dari conto batuan dasar terpilih Harzburgit (Blok HZ) dan Dunit (Blok DN). Berdasarkan hasil pemboran, pada Blok HZ terdapat 19 titik bor pada zona profil laterit nikel yang menunjukkan gradasi warna *top soil*, limonit, saprolit, *boulder/bedrock* (Gambar 5A):

- zona *top soil* terdapat pada kisaran kedalaman 0 s.d. 2 meter; berwarna kemerahan kecoklatan, mengandung bahan organik dan lempung.
- zona limonit terdapat pada kisaran kedalaman 1 s.d. 19 meter; berwarna kemerahan kecoklatan, ditandai soil bermineral lempung, silika, oksida besi

gutit-limonit-oksida mangan, jarosit, hematit-magnetit dan kromit).

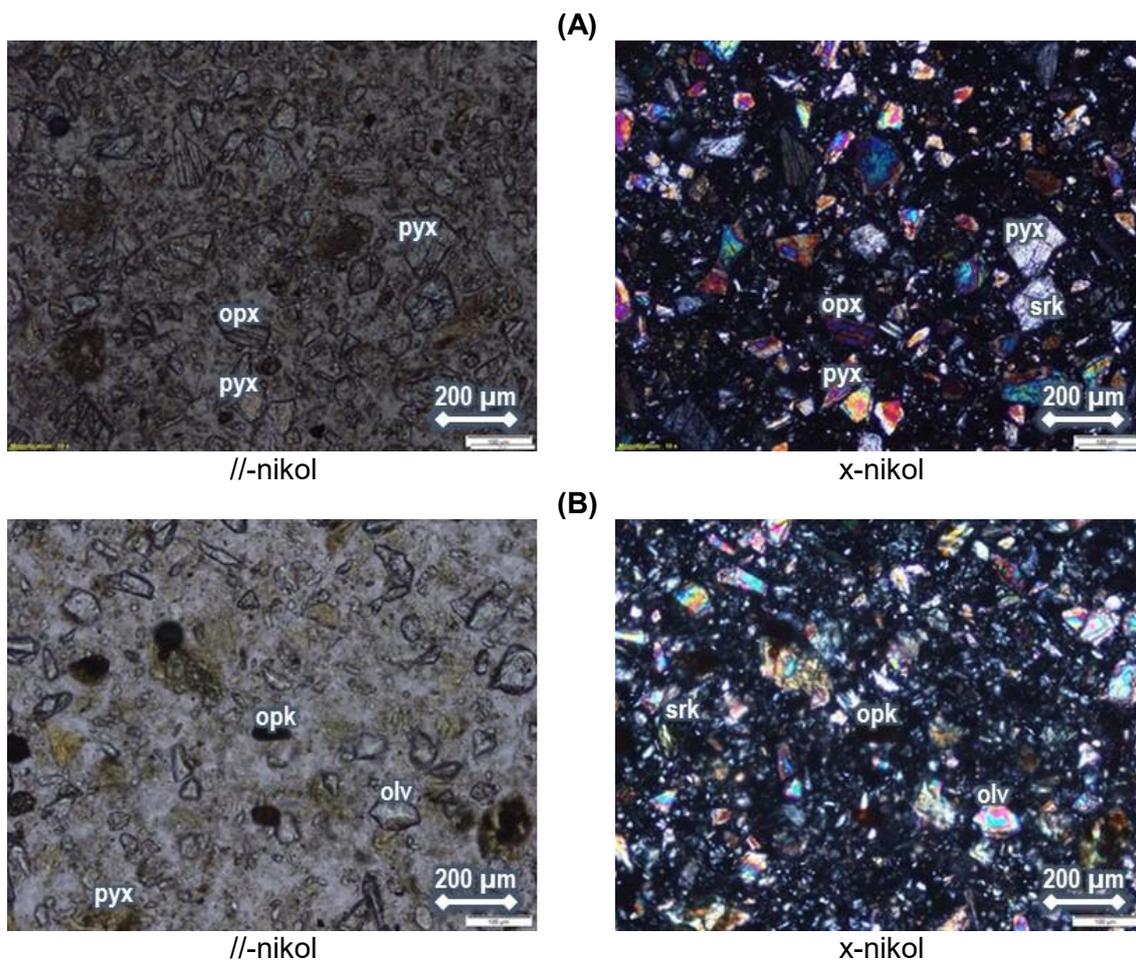
- zona saprolit terdapat pada kisaran kedalaman 11 s.d. 37 meter; berwarna kekuningan-kecoklatan ditandai lapukan batuan menjadi soil, berciri relik tekstur batuan asal, bermineral lempung, gutit, hematit, serpentin, krisopras, garnierit, olivin, piroksen.
- zona *boulder/bedrock* terdapat pada kisaran kedalaman 3 s.d. 6, 4 s.d. 6, 6 s.d. 9, 11 s.d. 11.65, 13 s.d. 13.5, 14 s.d. 16, 15.2 s.d. 16, 16,3 s.d. 19, 17 s.d. 18.5, 18 s.d. 22, 19.7 s.d. 20, 20.4 s.d. 21, 20.3 s.d. 22, 21 s.d. 24, 22 s.d. 26, 23 s.d. 25 meter; berkomposisi mineral oksida besi limonit, gutit, garnierit, jarosit, oksida mangan, krisopras, magnetit, hematit, serpentin-krisotil, stiktit, olivin-forsterit, piroksen-ortopiroksen dan kromit (Gambar 4A.).

Pada Blok DN dunit, terdapat 16 titik bor pada zona profil laterit nikel menunjukkan gradasi warna *top soil*, limonit, saprolit, *boulder/bedrock* (Gambar 5B):

- zona top soil terdapat pada kisaran kedalaman 0 s.d. 5 meter; berwarna kemerahan kecoklatan, mengandung bahan organik dan lempung.
- zona limonit terdapat pada kisaran kedalaman 3 s.d. 51 meter, berwarna kecoklatan, ditandai soil bermineral lempung montmorilonit, silika, oksida besi gutit-limonit-oksida mangan, jarosit, hematit-magnetit dan kromit.
- zona saprolit terdapat pada kisaran kedalaman 31 s.d. 57 meter; berwarna kekuningan-kecoklatan ditandai lapukan batuan menjadi soil, berciri relik tekstur

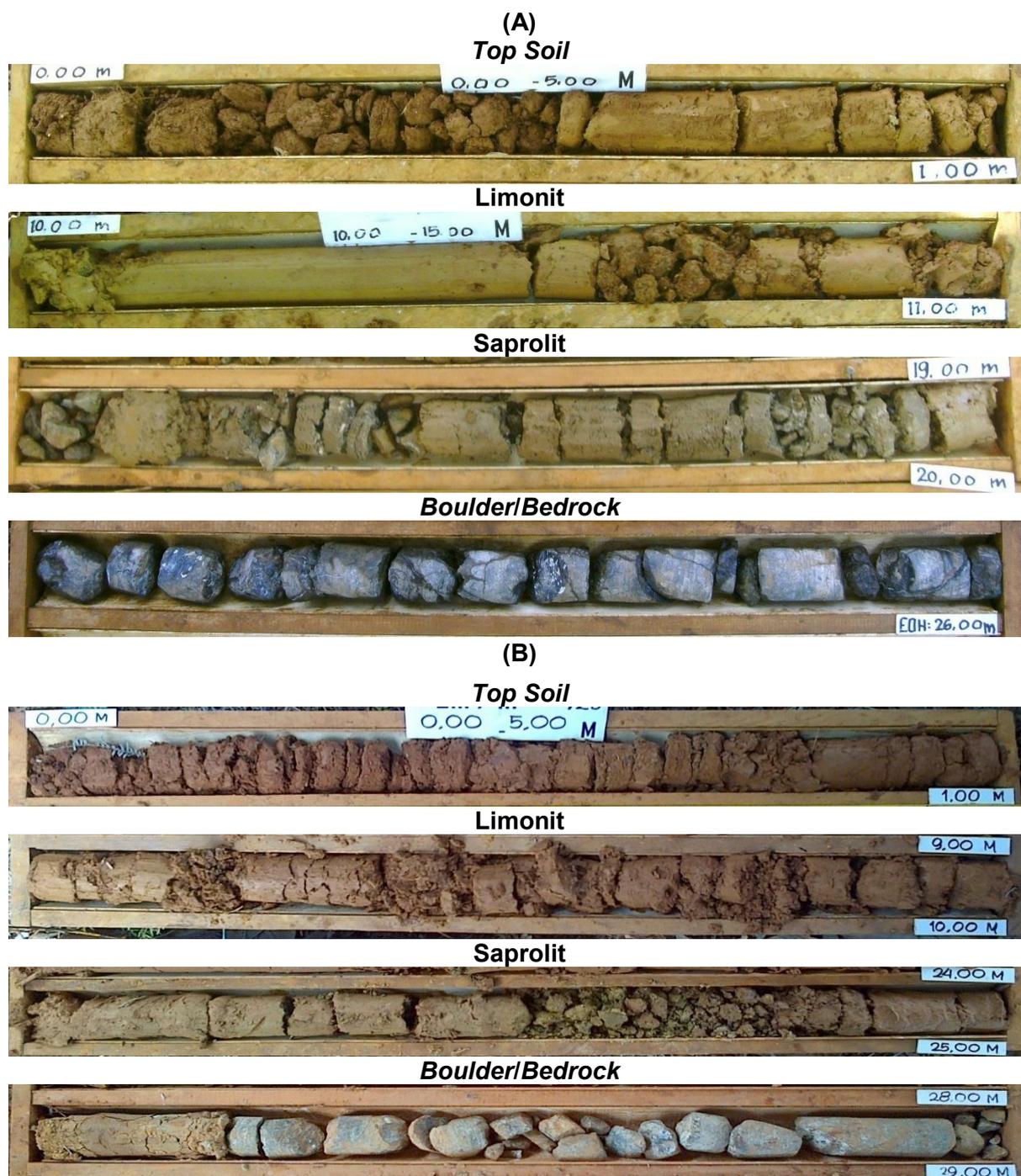
batuan asal, bermineral lempung, gutit, oksida mangan, hematit, serpentin-krisotil, krisopras, garnierit, olivin, dan piroksen.

- zona *boulder/bedrock* terdapat pada kisaran kedalaman 2.3 s.d. 3, 3.7 s.d. 5, 5 s.d. 5.3, 5.6 s.d. 11, 12 s.d. 13, 13.4 s.d. 16.65, 17 s.d. 17.45, 17 s.d. 21, 18.3 s.d. 19, 21.6 s.d. 25.6, 22 s.d. 27.6, 32.5 s.d. 33, 35.35 s.d. 38, 37 s.d. 40, 39 s.d. 40.6, 34.7 s.d. 35, 41.4 s.d. 43, 43 s.d. 49, 47 s.d. 47.4, 49.6 s.d. 50, 51 s.d. 51.8 meter, warna kelabu kekuningan-kelabu berkomposisi mineral silika, magnetit, hematit, serpentin-krisotil, stiktit, talk, olivin-forsterit, piroksen-ortopiroksen, hastingsit, dan kromit (Gambar 4B).



Keterangan : **Olv:** Olivin; **Pyx:** piroksen; **Opx:** orthopiroksen; **Srk:** serpentin krisotil; **Opk:** Opak kromit

Gambar 4. Foto mikroskopik sayatan tipis conto: A, lokasi HZ0204; B, lokasi DN0303



Gambar 5. Conto inti pemboran: A, lokasi HZ0204; B, lokasi DN0303

Hasil pengolahan data analisis kimia

Analisis kimia dengan metode XRF untuk 436 conto Blok HZ harzburgit dan 650 conto blok DN dunit menghasilkan 4 unsur *major* yaitu Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃ dan 4 unsur *minor* yaitu Ni, Co, MnO, Cr₂O₃.

Hasil analisis kimia tersebut digunakan dalam analisis statistik univariat (statistik deskriptif dan histogram) dan multivariat (analisis korelasi) untuk unsur *major* dan *minor* per zonasi laterit nikel. Masing-masing 4 unsur *major* dan *minor* dari Blok HZ dan DN tersebut di atas mempunyai nilai statistik deskriptif (*mean*, *median*, *stDev*, nilai minimum, nilai maksimum,

skewness, kurtosis dan koefisien variasi), dan histogram untuk mengetahui distribusi data. Serta untuk mengetahui normal atau tidaknya distribusi data, dapat diketahui dari koefisien variasi sebagai berikut.

- Analisis statistik deskriptif
Untuk keseluruhan zona laterit nikel, hasil statistik deskriptif menunjukkan nilai standar deviasi yang relatif sedang pada unsur *major* namun relatif kecil pada unsur *minor*. Tetapi dilihat dari distribusi data melalui *skewness* dan *kurtosis* menunjukkan nilai yang bervariasi. Berdasarkan nilai koefisien variasi (*CoefVar*), ketika nilainya > 0,5 maka data terdistribusi tidak normal sedangkan sebaliknya ($\leq 0,5$) maka data

terdistribusi normal (Tabel 1 dan Tabel 2.). Berdasarkan tabel tersebut, pada blok HZ, unsur-unsur yang terdistribusi tidak normal terdiri dari zona *top soil* (MgO, Co dan MnO), limonit (SiO₂, MgO, Co dan MnO) dan saprolit (Al₂O₃ dan Co). Sementara pada blok DN terdiri dari zona *top soil* (SiO₂, Al₂O₃, Ni, Co, MnO dan Cr₂O₃), limonit (SiO₂, MgO, Co dan MnO), saprolit (Cr₂O₃) dan *bedrock* (Al₂O₃, Co dan MnO). Maka untuk data yang terdistribusi normal pada Blok HZ secara umum terdiri dari unsur Fe, Ni dan Cr₂O₃. Untuk per zona terdapat *top soil* (SiO₂ dan Al₂O₃) dan saprolit (SiO₂, MgO dan MnO).

Tabel 1. Statistik deskriptif analisis kimia per zonasi laterit nikel Blok HZ

Zona	Variabel		Parameter									Distribusi
	Tipe Unsur	Unsur	N	Mean	Median	StDev	Minim um	Maximum	Skewness	Kurtosis	CoefVar	
Top Soil	Major	Fe	11	41,97	42,03	2,67	37,97	45,61	-0,12	-1,56	0,06	Normal
		SiO ₂	11	7,86	8,25	2,67	4,31	11,95	0,16	-1,20	0,34	Normal
		MgO	11	2,25	1,80	1,27	1,14	5,25	1,46	2,05	0,57	Tidak normal
	Minor	Al ₂ O ₃	11	10,30	10,77	3,22	2,84	15,30	-1,03	2,37	0,31	Normal
		Ni	11	1,22	1,19	0,32	0,66	1,67	-0,21	-0,79	0,26	Normal
		Co	11	0,15	0,10	0,11	0,05	0,39	1,23	0,52	0,75	Tidak normal
		MnO	11	0,75	0,44	0,62	0,21	2,00	1,09	-0,13	0,82	Tidak normal
Limonit	Major	Cr ₂ O ₃	11	2,87	2,94	0,39	2,33	3,66	0,52	0,17	0,14	Normal
		Fe	90	38,99	38,75	6,57	22,53	50,57	-0,23	-0,62	0,17	Normal
		SiO ₂	90	11,90	10,83	6,76	2,80	27,45	0,51	-0,80	0,57	Tidak normal
	Minor	MgO	90	3,86	2,40	3,45	1,03	17,04	1,90	3,60	0,89	Tidak normal
		Al ₂ O ₃	90	8,81	8,32	4,47	0,85	21,97	0,61	-0,10	0,51	Tidak normal
		Ni	90	1,42	1,28	0,58	0,49	2,92	0,80	-0,12	0,41	Normal
		Co	90	0,15	0,12	0,11	0,04	0,65	2,64	8,76	0,73	Tidak normal
Saprolit	Major	MnO	90	0,99	0,78	0,71	0,17	3,28	1,34	1,58	0,72	Tidak normal
		Cr ₂ O ₃	90	2,59	2,49	0,66	1,37	4,87	0,84	0,80	0,26	Normal
		Fe	188	13,47	12,01	4,95	6,90	29,08	1,11	0,47	0,37	Normal
	Minor	SiO ₂	188	38,49	38,75	5,78	22,87	62,22	0,25	1,59	0,15	Normal
		MgO	188	22,66	23,77	6,37	4,72	35,14	-0,75	0,11	0,28	Normal
		Al ₂ O ₃	188	2,11	1,85	1,20	0,29	7,15	1,29	2,27	0,57	Tidak normal
		Ni	188	1,71	1,53	0,79	0,60	4,04	0,54	-0,56	0,46	Normal
Boulder/ Bedrock	Major	Co	188	0,04	0,03	0,02	0,01	0,12	1,64	3,09	0,58	Tidak normal
		MnO	188	0,27	0,24	0,11	0,13	0,63	1,23	1,09	0,39	Normal
		Cr ₂ O ₃	188	0,83	0,71	0,33	0,40	1,81	1,20	0,84	0,40	Normal
	Minor	Fe	147	7,07	6,76	1,04	5,58	10,66	1,21	1,06	0,15	Normal
		SiO ₂	147	39,37	39,42	2,69	32,94	48,26	0,42	0,81	0,07	Normal
		MgO	147	33,53	33,81	3,23	23,74	40,82	-0,45	-0,11	0,10	Normal
		Al ₂ O ₃	147	1,02	1,07	0,40	0,23	2,54	-0,02	1,04	0,39	Normal
Minor	Ni	147	0,42	0,38	0,17	0,25	0,98	1,36	1,25	0,40	Normal	
	Co	147	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	1,68	2,07	0,40	Normal	
	MnO	147	0,14	0,13	0,03	0,07	0,36	2,60	14,77	0,24	Normal	
		Cr ₂ O ₃	147	0,45	0,45	0,07	0,28	0,70	0,37	0,81	0,15	Normal

Tabel 2. Statistik deskriptif analisis kimia per zonasi laterit nikel Blok DN

Zona	Variabel		Parameter									Distribusi
	Tipe Unsur	Unsur	N	Mean	Median	StDev	Minimum	Maximum	Skewness	Kurtosis	CoefVar	
Top Soil	Major	Fe	23	37,71	42,35	9,38	23,02	49,29	-0,56	-1,49	0,25	Normal
		SiO ₂	23	5,82	4,87	4,62	1,87	22,72	2,92	8,92	0,79	Tidak normal
		MgO	23	1,25	1,30	0,41	0,63	2,27	0,62	0,40	0,33	Normal
		Al ₂ O ₃	23	18,11	12,59	11,05	6,70	38,25	0,85	-0,93	0,61	Tidak normal
	Minor	Ni	23	0,81	0,90	0,45	0,12	1,67	-0,16	-0,91	0,56	Tidak normal
		Co	23	0,06	0,06	0,04	0,02	0,20	1,98	5,40	0,62	Tidak normal
		MnO	23	0,29	0,15	0,37	0,06	1,56	2,46	5,96	1,26	Tidak normal
		Cr ₂ O ₃	23	4,10	3,63	3,15	0,57	13,69	1,47	2,78	0,77	Tidak normal
Limonit	Major	Fe	37 1	42,79	43,57	5,92	20,26	53,79	-0,94	1,10	0,14	Normal
		SiO ₂	37 1	6,47	4,01	5,77	1,60	37,74	2,08	4,84	0,89	Tidak normal
		MgO	37 1	1,42	1,00	1,70	0,45	16,68	6,19	43,66	1,20	Tidak normal
		Al ₂ O ₃	37 1	9,12	8,91	3,80	1,64	34,81	2,11	9,51	0,42	Normal
	Minor	Ni	37 1	1,42	1,39	0,50	0,19	3,48	0,85	2,12	0,35	Normal
		Co	37 1	0,13	0,11	0,08	0,03	0,58	1,82	5,13	0,58	Tidak normal
		MnO	37 1	1,06	0,82	1,00	0,03	7,18	1,85	5,58	0,95	Tidak normal
		Cr ₂ O ₃	37 1	3,37	3,06	1,47	1,01	11,18	1,92	5,65	0,44	Normal
Saprolit	Major	Fe	16 3	15,40	14,38	5,03	7,14	31,16	0,92	0,38	0,33	Normal
		SiO ₂	16 3	34,20	33,81	5,96	19,89	49,07	-0,08	0,07	0,17	Normal
		MgO	16 3	19,35	19,46	6,09	2,62	33,12	-0,36	0,29	0,31	Normal
		Al ₂ O ₃	16 3	2,74	2,45	1,16	0,52	7,57	1,17	1,47	0,42	Normal
	Minor	Ni	16 3	2,10	1,93	0,86	0,69	4,20	0,56	-0,63	0,41	Normal
		Co	16 3	0,04	0,03	0,02	0,01	0,11	1,13	1,79	0,45	Normal
		MnO	16 3	0,35	0,29	0,20	0,12	1,49	2,60	9,30	0,56	Tidak normal
		Cr ₂ O ₃	16 3	0,97	0,84	0,39	0,43	2,61	1,32	1,62	0,40	Normal
Boulder / Bedrock	Major	Fe	93	7,77	7,13	2,01	5,43	15,48	1,76	3,02	0,26	Normal
		SiO ₂	93	38,35	37,10	5,33	28,70	63,36	2,07	6,15	0,14	Normal
		MgO	93	31,20	33,00	6,55	0,52	40,45	-1,59	4,05	0,21	Normal
		Al ₂ O ₃	93	1,32	1,22	0,81	0,20	4,99	2,12	6,82	0,62	Tidak normal
	Minor	Ni	93	0,45	0,39	0,18	0,24	1,03	1,00	0,40	0,40	Normal
		Co	93	0,01	0,01	0,01	0,01	0,10	5,96	45,35	0,78	Tidak normal
		MnO	93	0,15	0,13	0,10	0,07	1,02	6,89	58,02	0,69	Tidak normal
		Cr ₂ O ₃	93	0,51	0,48	0,12	0,29	1,00	1,52	3,78	0,23	Normal

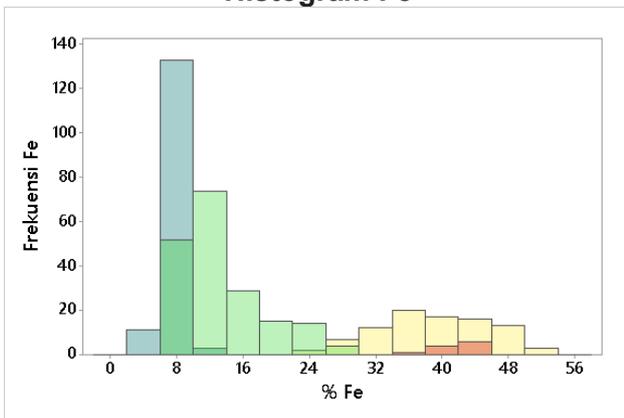
Sedangkan pada blok DN secara umum hanya unsur Fe. Untuk per zona terdapat *top soil* (MgO), limonit (Al_2O_3 , Ni dan Cr_2O_3), saprolit (SiO_2 , MgO Al_2O_3 , Ni, Co dan MnO) dan *boulder/bedrock* (SiO_2 , MgO, Ni dan Cr_2O_3).

▪ Analisis histogram

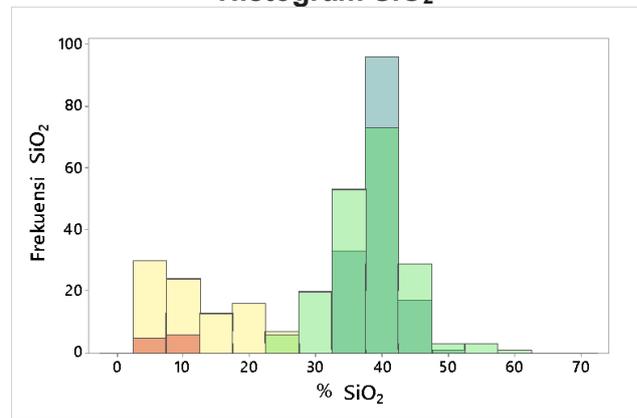
Histogram menginterpretasikan distribusi kecondongan/*skewness* serta kelengkungan/ kurtosis data. Pada bentuk *skewness*, data yang terdistribusi normal berbentuk simetris dan memiliki nilai kecondongan mendekati nol dengan nilai rata-rata/*mean*, median dan modus/*mode* memiliki nilai yang relatif mirip. Sementara data yang

condong ke kiri memiliki nilai kecondongan negatif dengan nilai rata-rata dan median di bawah nilai modus. Data yang condong ke kanan memiliki nilai kecondongan positif dengan nilai rata-rata dan median di atas nilai modus. Adapun berdasarkan *kurtosis*, nilai kelengkungan yang mendekati nol adalah lengkungan normal. Apabila nilai positif semakin tinggi maka semakin menajam lengkungannya. Apabila nilai negatif semakin tinggi maka semakin menumpul lengkungannya (Sinclair etc, 2004). Data hasil analisis kimia Blok HZ dan Blok DN direpresentasikan dalam bentuk histogram pada Gambar 6 dan Gambar 7.

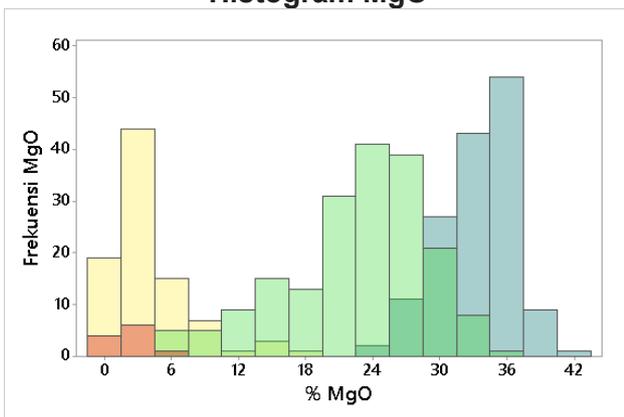
Histogram Fe



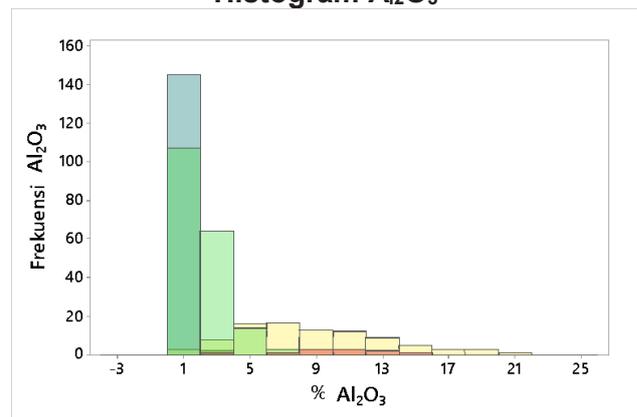
Histogram SiO_2



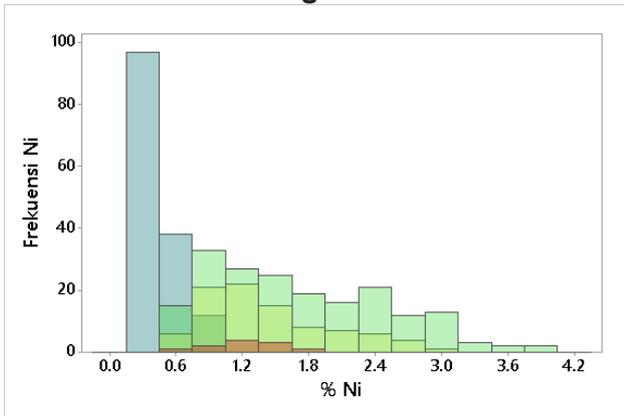
Histogram MgO



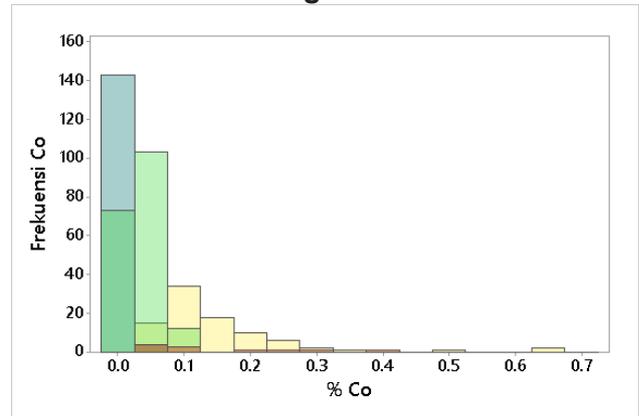
Histogram Al_2O_3



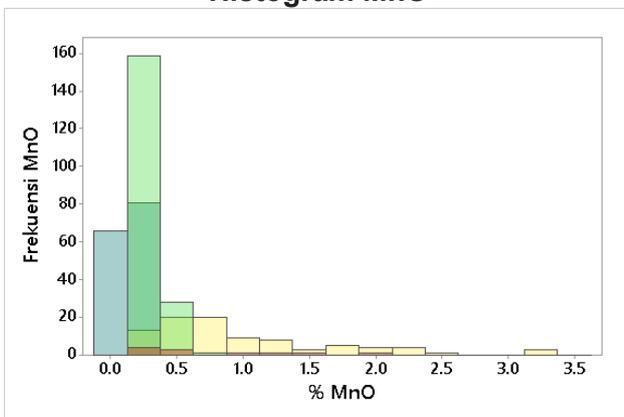
Histogram Ni



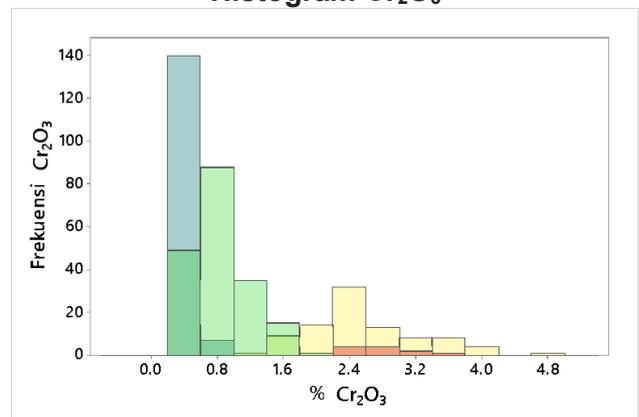
Histogram Co



Histogram MnO



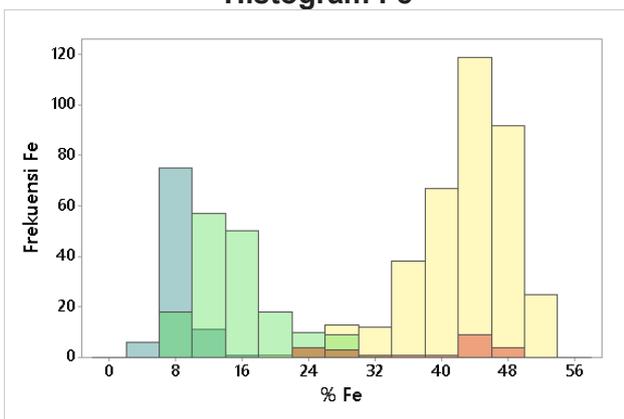
Histogram Cr₂O₃



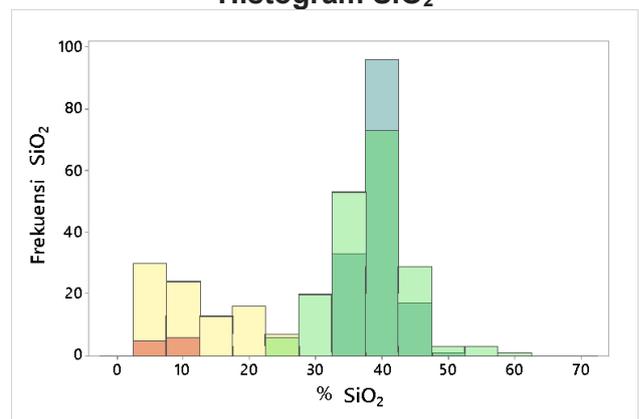
Keterangan : ■ Top Soil ■ Limonit ■ Saprolit ■ Boulder/Bedrock

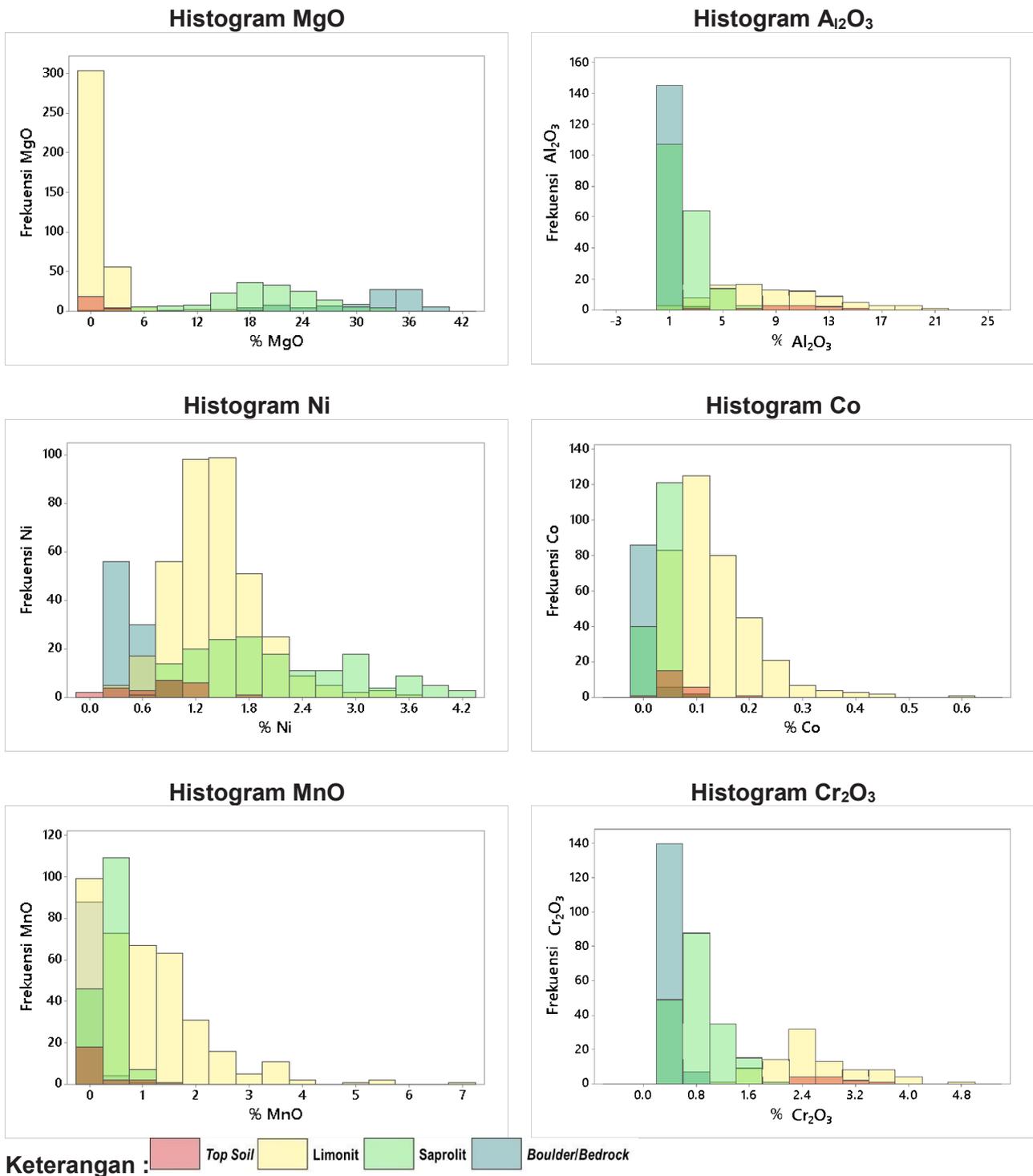
Gambar 6. Grafik histogram unsur *major* dan *minor* Blok HZ

Histogram Fe



Histogram SiO₂





Gambar 7. Grafik histogram unsur *major* dan *minor* Blok DN

Adapun analisis multivariat terhadap keseluruhan maupun masing-masing zona laterit nikel menerapkan korelasi unsur kimia *major* dan *minor*, berdasarkan koefisien korelasi dengan kisaran nilai $-1 < r < +1$ (Tabel 3). Berdasarkan klasifikasi

koefisien korelasi, tingkat korelasi kuat hingga sangat kuat pada angka korelasi negatif maupun positif pada unsur *major* dan *minor* digunakan untuk mengetahui unsur-unsur yang dapat berkontribusi sebagai penyusun zona laterit nikel.

Korelasi tersebut diklasifikasikan pada Tabel 4 untuk Blok HZ dan Tabel 5 untuk Blok DN.

Unsur-unsur berkorelasi kuat hingga sangat kuat tersebut dapat diasumsikan

memiliki hubungan asosiasi dan resistensi unsur yang sangat kuat dan dapat terlihat sehingga berkontribusi dalam penyusunan zonasi laterit nikel. Berikut korelasi unsur *major* dan *minor* Blok HZ dan DN.

Tabel 3. Tabel koefisien korelasi kandungan unsur *major* dan *minor* pada Blok HZ dan DN

Zona	Blok HZ									Blok DN								
	Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Ni	Co	MnO	Cr ₂ O ₃		Fe	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Ni	Co	MnO	Cr ₂ O ₃	
Semua Zona	Fe	1,00	-0,94	-0,94	0,79	0,30	0,74	0,72	0,95	Fe	1,00	-0,96	-0,93	0,55	0,03	0,62	0,37	0,70
	SiO ₂	-0,94	1,00	0,81	-0,79	-0,19	-0,70	-0,68	-0,91	SiO ₂	-0,96	1,00	0,87	-0,68	0,05	-0,61	-0,38	-0,72
	MgO	-0,94	0,81	1,00	-0,81	-0,43	-0,68	-0,66	-0,90	MgO	-0,93	0,87	1,00	-0,67	-0,16	-0,63	-0,42	-0,69
	Al ₂ O ₃	0,79	-0,79	-0,81	1,00	0,10	0,48	0,45	0,76	Al ₂ O ₃	0,55	-0,68	-0,67	1,00	-0,17	0,35	0,23	0,56
	Ni	0,30	-0,19	-0,43	0,10	1,00	0,28	0,24	0,32	Ni	0,03	0,05	-0,16	-0,17	1,00	0,15	0,19	-0,01
	Co	0,74	-0,70	-0,68	0,48	0,28	1,00	0,92	0,72	Co	0,62	-0,61	-0,63	0,35	0,15	1,00	0,89	0,41
	MnO	0,72	-0,68	-0,66	0,45	0,24	0,92	1,00	0,69	MnO	0,37	-0,38	-0,42	0,23	0,19	0,89	1,00	0,24
	Cr ₂ O ₃	0,95	-0,91	-0,90	0,76	0,32	0,72	0,69	1,00	Cr ₂ O ₃	0,70	-0,72	-0,69	0,56	-0,01	0,41	0,24	1,00
Top Soil	Fe	1,00	-0,82	0,21	-0,44	0,06	-0,33	-0,33	0,13	Fe	1,00	-0,27	0,38	-0,88	0,83	0,61	0,34	0,24
	SiO ₂	-0,82	1,00	0,33	-0,14	0,33	0,68	0,70	-0,38	SiO ₂	-0,27	1,00	0,08	-0,08	-0,09	-0,12	-0,05	-0,10
	MgO	0,21	0,33	1,00	-0,80	0,45	0,48	0,51	-0,60	MgO	0,38	0,08	1,00	-0,55	0,51	0,39	0,26	0,15
	Al ₂ O ₃	-0,44	-0,14	-0,80	1,00	-0,73	-0,57	-0,59	0,24	Al ₂ O ₃	-0,88	-0,08	-0,55	1,00	-0,91	-0,60	-0,37	-0,25
	Ni	0,06	0,33	0,45	-0,73	1,00	0,78	0,79	0,20	Ni	0,83	-0,09	0,51	-0,91	1,00	0,75	0,60	0,24
	Co	-0,33	0,68	0,48	-0,57	0,78	1,00	1,00	-0,16	Co	0,61	-0,12	0,39	-0,60	0,75	1,00	0,92	0,02
	MnO	-0,33	0,70	0,51	-0,59	0,79	1,00	1,00	-0,18	MnO	0,34	-0,05	0,26	-0,37	0,60	0,92	1,00	-0,10
	Cr ₂ O ₃	0,13	-0,38	-0,60	0,24	0,20	-0,16	-0,18	1,00	Cr ₂ O ₃	0,24	-0,10	0,15	-0,25	0,24	0,02	-0,10	1,00
Limonit	Fe	1,00	-0,93	-0,65	-0,07	-0,29	0,30	0,33	0,54	Fe	1,00	-0,81	-0,49	-0,33	-0,33	-0,06	-0,20	0,10
	SiO ₂	-0,93	1,00	0,72	-0,19	0,37	-0,27	-0,31	-0,56	SiO ₂	-0,81	1,00	0,50	-0,18	0,48	-0,02	0,07	-0,23
	MgO	-0,65	0,72	1,00	-0,49	0,56	-0,13	-0,16	-0,42	MgO	-0,49	0,50	1,00	-0,23	0,38	-0,12	-0,02	-0,13
	Al ₂ O ₃	-0,07	-0,19	-0,49	1,00	-0,68	-0,29	-0,31	-0,12	Al ₂ O ₃	-0,33	-0,18	-0,23	1,00	-0,41	-0,07	-0,02	0,21
	Ni	-0,29	0,37	0,56	-0,68	1,00	0,20	0,13	0,14	Ni	-0,33	0,48	0,38	-0,41	1,00	0,26	0,30	-0,10
	Co	0,30	-0,27	-0,13	-0,29	0,20	1,00	0,84	0,22	Co	-0,06	-0,02	-0,12	-0,07	0,26	1,00	0,89	-0,09
	MnO	0,33	-0,31	-0,16	-0,31	0,13	0,84	1,00	0,22	MnO	-0,20	0,07	-0,02	-0,02	0,30	0,89	1,00	-0,09
	Cr ₂ O ₃	0,54	-0,56	-0,42	-0,12	0,14	0,22	0,22	1,00	Cr ₂ O ₃	0,10	-0,23	-0,13	0,21	-0,10	-0,09	-0,09	1,00
Saprolit	Fe	1,00	-0,65	-0,86	0,74	0,35	0,88	0,94	0,88	Fe	1,00	-0,77	-0,85	0,89	0,34	0,92	0,66	0,92
	SiO ₂	-0,65	1,00	0,26	-0,39	-0,45	-0,64	-0,58	-0,64	SiO ₂	-0,77	1,00	0,41	-0,72	-0,29	-0,70	-0,39	-0,78
	MgO	-0,86	0,26	1,00	-0,79	-0,34	-0,70	-0,79	-0,78	MgO	-0,85	0,41	1,00	-0,78	-0,42	-0,79	-0,64	-0,75
	Al ₂ O ₃	0,74	-0,39	-0,79	1,00	0,24	0,59	0,72	0,79	Al ₂ O ₃	0,89	-0,72	-0,78	1,00	0,31	0,85	0,63	0,91
	Ni	0,35	-0,45	-0,34	0,24	1,00	0,43	0,28	0,44	Ni	0,34	-0,29	-0,42	0,31	1,00	0,30	0,24	0,34
	Co	0,88	-0,64	-0,70	0,59	0,43	1,00	0,87	0,81	Co	0,92	-0,70	-0,79	0,85	0,30	1,00	0,76	0,82
	MnO	0,94	-0,58	-0,79	0,72	0,28	0,87	1,00	0,83	MnO	0,66	-0,39	-0,64	0,63	0,24	0,76	1,00	0,57
	Cr ₂ O ₃	0,88	-0,64	-0,78	0,79	0,44	0,81	0,83	1,00	Cr ₂ O ₃	0,92	-0,78	-0,75	0,91	0,34	0,82	0,57	1,00
Boulder/Bedrock	Fe	1,00	0,41	-0,74	0,27	0,52	0,80	0,75	0,58	Fe	1,00	0,30	-0,82	0,75	0,51	0,79	0,70	0,89
	SiO ₂	0,41	1,00	-0,68	0,16	0,23	0,26	0,39	0,33	SiO ₂	0,30	1,00	-0,63	0,12	0,04	0,47	0,54	0,25
	MgO	-0,74	-0,68	1,00	-0,43	-0,42	-0,47	-0,44	-0,59	MgO	-0,82	-0,63	1,00	-0,63	-0,31	-0,72	-0,66	-0,75
	Al ₂ O ₃	0,27	0,16	-0,43	1,00	0,15	0,07	0,24	0,61	Al ₂ O ₃	0,75	0,12	-0,63	1,00	0,36	0,65	0,60	0,80
	Ni	0,52	0,23	-0,42	0,15	1,00	0,40	0,38	0,51	Ni	0,51	0,04	-0,31	0,36	1,00	0,31	0,30	0,40
	Co	0,80	0,26	-0,47	0,07	0,40	1,00	0,68	0,45	Co	0,79	0,47	-0,72	0,65	0,31	1,00	0,96	0,72
	MnO	0,75	0,39	-0,44	0,24	0,38	0,68	1,00	0,49	MnO	0,70	0,54	-0,66	0,60	0,30	0,96	1,00	0,66
	Cr ₂ O ₃	0,58	0,33	-0,59	0,61	0,51	0,45	0,49	1,00	Cr ₂ O ₃	0,89	0,25	-0,75	0,80	0,40	0,72	0,66	1,00

Tabel 4. Tabel klasifikasi koefisien korelasi hasil analisis multivariat Blok HZ

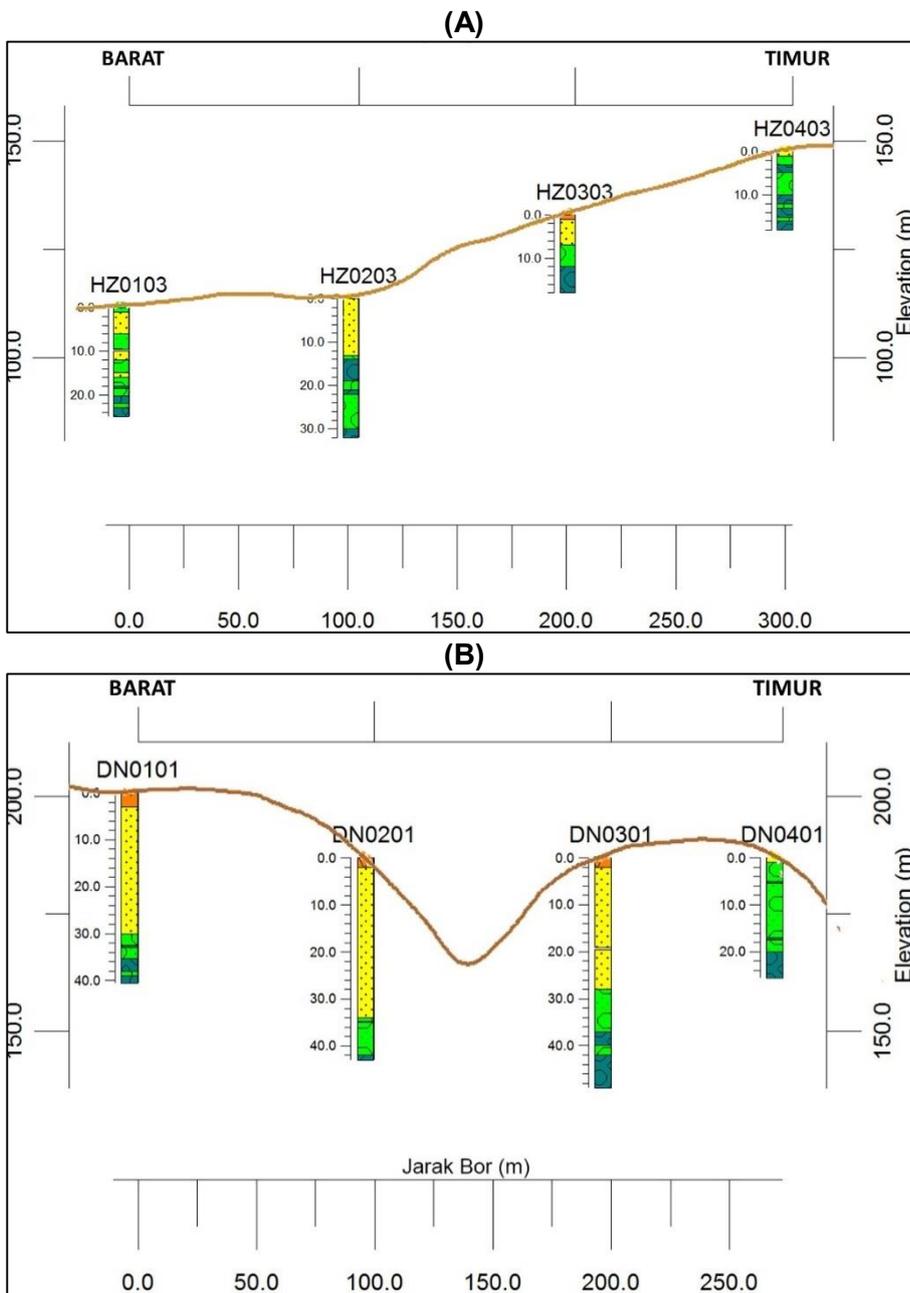
Angka Korelasi	Tingkat Korelasi	Tipe Unsur Korelasi	Kategori Korelasi Zonasi					
			Semua Zona	Top Soil	Limonite	Saprolite	Boulder/Bedrock	
Positif	Sangat Kuat	Major vs Major	SiO ₂ vs MgO	-	-	-	-	
		Major vs Minor	Fe vs Cr ₂ O ₃	-	-	Fe vs Co; Fe vs MnO; Fe vs Cr ₂ O ₃	-	
		Minor vs Minor	Co vs MnO	Co vs MnO	Co vs MnO	Co vs MnO; Co vs Cr ₂ O ₃ ; MnO vs Cr ₂ O ₃	-	
	Kuat	Major vs Major	Fe vs Al ₂ O ₃		SiO ₂ vs MgO	Fe vs Al ₂ O ₃		
		Major vs Minor	Fe vs Co; Fe vs MnO; Al ₂ O ₃ vs Cr ₂ O ₃	SiO ₂ vs Co; SiO ₂ vs MnO	-	Al ₂ O ₃ vs MnO; Al ₂ O ₃ vs Cr ₂ O ₃	Fe vs Co; Fe vs MnO; Al ₂ O ₃ vs Cr ₂ O ₃	
		Minor vs Minor	Co vs Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	
		Minor vs Minor	MnO vs Cr ₂ O ₃	Ni vs Co; Ni vs MnO	-	-	Co vs MnO	
	Negatif	Kuat	Major vs Major	SiO ₂ vs Al ₂ O ₃	-	Fe vs MgO	Fe vs SiO ₂ ; MgO vs Al ₂ O ₃	Fe vs MgO; SiO ₂ vs MgO
			Major vs Minor	SiO ₂ vs Co; SiO ₂ vs MnO; MgO vs Co; MgO vs MnO	Al ₂ O ₃ vs Ni	Al ₂ O ₃ vs Ni	SiO ₂ vs Co; SiO ₂ vs Cr ₂ O ₃ ; MgO vs Co; MgO vs MnO; MgO vs Cr ₂ O ₃	-
		Sangat Kuat	Major vs Major	Fe vs SiO ₂ ; Fe vs MgO; MgO vs Al ₂ O ₃	Fe vs SiO ₂ ; MgO vs Al ₂ O ₃	Fe vs SiO ₂	Fe vs MgO	-
Major vs Minor			SiO ₂ vs Cr ₂ O ₃ ; MgO vs Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	

Tabel 5. Tabel klasifikasi koefisien korelasi hasil analisis multivariat Blok DN

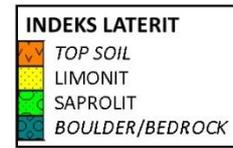
Angka Korelasi	Tingkat Korelasi	Tipe Unsur Korelasi	Kategori Zonasi				
			Semua Zona	Top Soil	Limonite	Saprolite	Boulder/Bedrock
Positif	Sangat Kuat	Major vs Major	SiO ₂ vs MgO	-	-	-	-
		Major vs Minor	Fe vs Cr ₂ O ₃	Fe vs Ni	-	Fe vs Cr ₂ O ₃	Fe vs Cr ₂ O ₃
		Minor vs Minor	Co vs MnO	Co vs MnO	Co vs MnO	-	Co vs MnO
	Kuat	Major vs Major	Fe vs Al ₂ O ₃	-	-	-	Fe vs Al ₂ O ₃
		Major vs Minor	Fe vs Co; Fe vs MnO; Al ₂ O ₃ vs Cr ₂ O ₃	Fe vs Co	-	Fe vs MnO	Fe vs Co; Fe vs MnO
		Minor vs Minor	Co vs Cr ₂ O ₃ ; MnO vs Cr ₂ O ₃	Ni vs Co, Ni vs MnO	-	-	Co vs Cr ₂ O ₃ ; MnO vs Cr ₂ O ₃
Negatif	Kuat	Major vs Major	SiO ₂ vs Al ₂ O ₃	-	-	SiO ₂ vs Al ₂ O ₃	-
		Major vs Minor	SiO ₂ vs Co; SiO ₂ vs MnO; MgO vs Co; MgO vs MnO	Al ₂ O ₃ vs Co	-	SiO ₂ vs Co; MgO vs Co; MgO vs MnO	MgO vs Co; MgO vs MnO
	Sangat Kuat	Major vs Major	Fe vs MgO; Fe vs SiO ₂ ; MgO vs Al ₂ O ₃	-	Fe vs SiO ₂	Fe vs MgO	Fe vs MgO
		Major vs Minor	MgO vs Cr ₂ O ₃ ; SiO ₂ vs Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ vs Ni	-	-	-

Kriteria korelasi unsur yang dipilih dalam menentukan jumlah unsur adalah minimal 3 korelasi pada masing-masing blok. Hal tersebut ditentukan agar korelasi unsur yang dipilih dapat mewakili terhadap zona lain baik keseluruhan maupun masing-masing zona. Dari hasil pemilihan tersebut, unsur-unsur yang saling berkorelasi baik pada Blok HZ maupun Blok DN terdapat unsur-unsur terdiri dari unsur *major* (Fe, SiO₂ dan MgO dan Al₂O₃) serta unsur *minor* (Ni, Co, MnO dan Cr₂O₃).

Hasil tersebut kemudian dikompilasikan dan diterapkan untuk melakukan interpretasi distribusi profil laterit nikel pada penampang *topsoil* - limonit- saprolit - *boulder/bedrock*. Pada penampang tersebut secara umum tersusun atas *topsoil*, limonit, sisipan saprolit di limonit, sisipan *boulder* di limonit, saprolit, sisipan *boulder* di saprolit, dan diakhiri dengan *boulder/bedrock* berikut contoh penampang yang mewakili pada Blok HZ dan DN (Gambar 8).



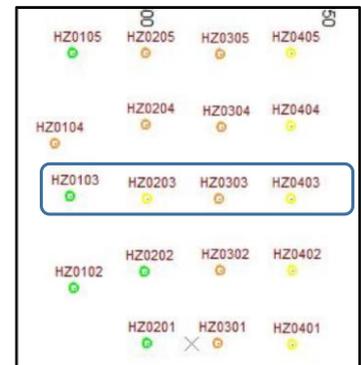
KETERANGAN:



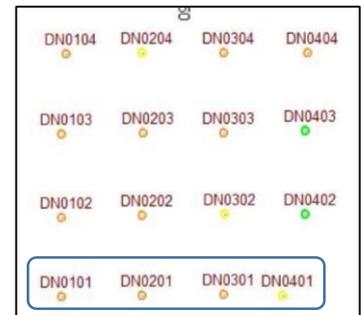
SKALA :
Horz. : Vert.
1 : 2

INDEKS PENAMPANG

Blok HZ



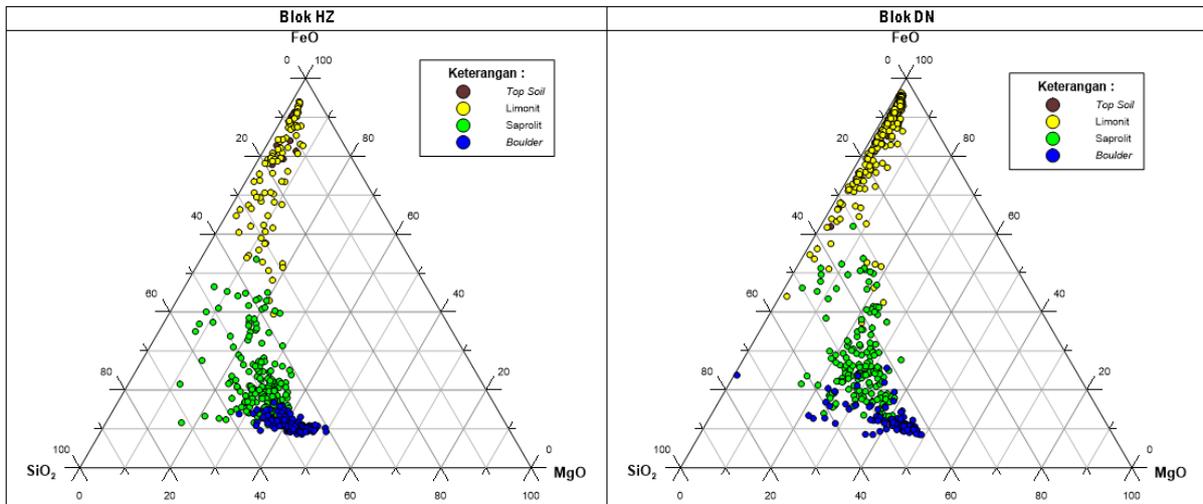
Blok DN



Gambar 8. Penampang hasil pemboran: A, Blok HZ; B, Blok DN

Pada penampang Blok HZ pada umumnya memiliki susunan laterit nikel relatif tidak teratur dengan kondisi morfologi relatif landai dan miring. Pada penampang Blok DN pada umumnya memiliki susunan laterit nikel relatif tidak teratur pada bagian morfologi miring hingga curam. Namun pada bagian relatif landai memiliki susunan relatif teratur. Adapun pada kondisi relatif landai pada Blok DN memiliki zona limonit relatif tebal.

Agar dapat mengetahui distribusi zona laterit nikel pada blok HZ maupun DN terkait unsur yang saling berkorelasi kuat hingga sangat kuat terutama unsur yang mengandung oksida yang memiliki nilai persentase kimia dominan (FeO, MgO dan SiO₂) disajikan dalam *ternary diagram* (Gambar 9).



Gambar 9. Ternary diagram distribusi zona laterit nikel Blok HZ dan DN

Diagram tersebut menunjukkan bahwa pada Blok HZ maupun DN, zona *top soil* memiliki kadar FeO relatif tinggi serta kadar SiO₂ dan MgO yang relatif sangat rendah. Pada zona limonit memiliki kadar FeO relatif sedang ke tinggi serta kadar SiO₂ dan MgO relatif rendah. Pada zona saprolit memiliki kadar FeO sedang ke sangat rendah serta kadar SiO₂ relatif sedang ke tinggi dan MgO relatif sedang. Pada zona *boulder/bedrock*, memiliki kadar FeO sangat rendah, serta kadar SiO₂ relatif sedang tinggi dan MgO yang sedang. Namun pada Blok DN ditemukan satu contoh anomali pada zona *boulder/bedrock* yaitu memiliki kadar MgO yang sangat rendah, yang dimungkinkan karena senyawa MgO tersebut masih terlarutkan dalam air tanah.

PEMBAHASAN

Hubungan Zonasi Laterit Nikel Berdasarkan Morfologi

Berdasarkan kondisi morfologi dengan klasifikasi Van Zuidam (1985), zonasi laterit nikel pada Blok HZ maupun DN pada umumnya menempati morfologi dengan relief sedikit miring hingga sangat curam dengan tampilan peta sebagai berikut (Gambar 10).

Pada Blok HZ secara detail memiliki sedikit wilayah yang landai hingga miring (sedikit bagian timur) kemudian di dominasi oleh

area agak curam (bagian tengah dan timur) hingga curam (bagian utara dan selatan) dan sedikit sangat curam di barat daya blok. Ini berarti bahwa zonasi laterit nikel yang tersusun relatif bervariasi dan tidak sesuai dengan urutan zonasi laterit nikel sehingga terindikasi adanya ketidakaturan pelapukan. Hal ini dibuktikan dengan masih adanya sisipan saprolit pada limonit ataupun sisipan limonit pada saprolit, maupun sisipan *boulder* pada saprolit ataupun sedikit sisipan saprolit pada *boulder*.

Pada Blok DN yang didominasi oleh area landai hingga miring (utara, tengah, barat, barat daya dan tenggara), sedikit didominasi oleh area curam (utara, timur laut, timur dan sedikit selatan) dan sedikit sangat curam. Ini berarti bahwa zonasi laterit nikel di sebelah barat blok DN relatif terbentuk sesuai urutan zonasi laterit nikel namun masih ada sedikit sisipan *boulder* pada saprolit yang mengindikasikan ketidakaturan pelapukan pada zona saprolit dikarenakan pengaruh kondisi morfologi di bagian timur Blok DN. Adapun ketidaksesuaian urutan zonasi laterit nikel pada bagian timur Blok DN terjadi karena kondisi geologinya menyerupai Blok HZ.

Hubungan Zonasi Laterit Nikel Berdasarkan Ketebalan

Berdasarkan hasil statistik ketebalan yang dibagi berdasarkan blok dan zona laterit

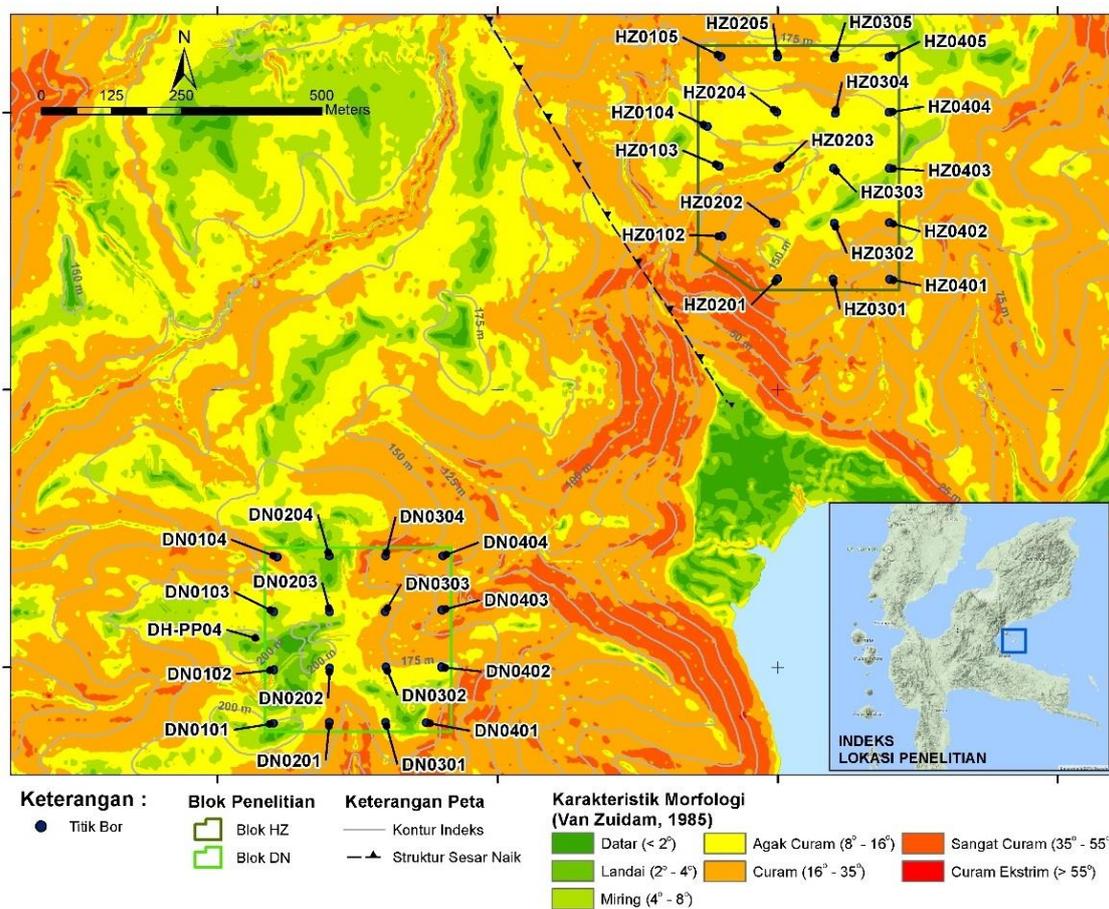
nikel (Tabel 6), pada umumnya masing-masing blok memiliki ketebalan zona yang tidak terdistribusi normal, yang terlihat dari nilai *skewness* dan *kurtosis* serta nilai koefisien variasi (*CoefVar*) > 0,5. Ini berarti bahwa distribusi maupun susunan zona laterit nikel di beberapa titik tidak normal dikarenakan kondisi morfologi. Berdasarkan perbandingan ketebalan zonasi laterit nikel di Blok DN, rata-rata memiliki nilai ketebalan yang lebih tebal dari Blok HZ untuk zonasi laterit nikel secara keseluruhan.

Hubungan Zonasi Laterit Nikel Berdasarkan Distribusi Kimia

Berdasarkan hasil analisis statistik univariat maupun multivariat terhadap masing-masing unsur yang terdiri dari unsur *major* (Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃) dan unsur *minor* (Ni, Co, MnO, Cr₂O₃), dari hasil analisis statistik univariat pada umumnya unsur-unsur tersebut terdistribusi tidak

normal yang dapat diartikan bahwa distribusi unsur yang dihasilkan tidak homogen dengan nilai koefisien variasi (*CoefVar*) > 0,5.

Adapun dari hasil analisis statistik multivariat (Tabel 4 dan 5) unsur-unsur yang memberikan kontribusi dalam penyusunan zona laterit nikel terdiri dari unsur Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃ (unsur *major*) dan unsur Co, MnO, Cr₂O₃ (unsur *minor*), unsur-unsur tersebut dapat memperlihatkan pola distribusi zonasi laterit nikel. Selain itu dari hasil statistik deskriptif, nilai rata-rata unsur yang dihasilkan pada Blok DN memiliki nilai unsur nikel yang relatif lebih tinggi dari Blok HZ. Adapun unsur lainnya yang kadar rata-ratanya lebih tinggi dari Blok HZ terdiri dari unsur Fe, Al₂O₃, Co, MnO dan Cr₂O₃. Sedangkan unsur pada Blok DN yang kadar rata-ratanya lebih rendah dari Blok HZ yaitu unsur SiO₂ dan MnO.



Gambar 10. Peta Morfologi Blok HZ dan DN Daerah Pulau Pakal

Tabel 6. Statistik ketebalan zona laterit nikel Blok HZ dan DN

Blok	ZONA	N	Mean	Median	StDev	CoefVar	Min	Max	Skewness	Kurtosis	Distribusi
HZ	Top Soil	8	1,38	1,00	0,52	0,38	1,00	2,00	0,64	-2,24	Normal
	Limonite	27	3,28	2,00	3,08	0,94	0,40	13,00	1,71	3,00	Tidak normal
	Saprolite	62	2,80	2,00	2,57	0,92	0,40	12,00	1,95	3,91	Tidak normal
	Boulder/Bedrock	50	2,48	2,00	2,00	0,80	0,25	9,00	1,24	1,46	Tidak normal
DN	Top Soil	11	2,02	2,00	1,31	0,65	0,25	5,00	1,07	1,73	Tidak normal
	Limonite	21	17,59	10,00	16,90	0,96	1,00	49,60	0,68	-0,95	Tidak normal
	Saprolite	37	4,02	2,35	3,95	0,98	0,25	18,30	1,71	3,43	Tidak normal
	Boulder/Bedrock	35	2,12	1,00	2,23	1,05	0,30	7,60	1,32	0,57	Tidak normal

KESIMPULAN

Hasil pemboran pada litologi harzburgit dan dunit berdasarkan hasil analisis petrologi (megaskopik, mikroskopik dan XRD) pada EOH (*end of hole*)/meter akhir conto pemboran bersesuaian dengan hasil analisis kimia untuk setiap Blok HZ dan Blok DN). Hasil analisis petrologi pada blok HZ menunjukkan mineral berkomposisi dominan olivin forsterit dan piroksen, sedikit orthopiroksen, generasi awal batuan ultrabasa, berasosiasi dengan mineral opak kromit, kromit, terubah hidrotermal 1 (Rinawan, 2013) dicirikan adanya mineral serpentin krisotil. Pada blok DN mineral yang ditemukan berkomposisi dominan olivin forsterit dan sangat sedikit piroksen, generasi awal batuan ultrabasa, berasosiasi dengan mineral kromit, dicirikan adanya mineral serpentin krisotil.

Berdasarkan hasil analisis kimia secara keseluruhan memiliki unsur kimia yang terdistribusi relatif tidak normal, namun dari hasil analisis tersebut dapat menunjukkan perkembangan laterit yang berbeda antara Blok HZ dan Blok DN dapat ditunjukkan dengan nilai unsur Nikel berpotensi/relatif tinggi yang berkembang pada zona saprolit. Pada Blok HZ memiliki nilai rata-rata lebih kecil daripada Blok DN dimana menunjukkan bahwa distribusi nikel di litologi harzburgit lebih sedikit dari pada litologi dunit.

Berdasarkan kondisi morfologi didominasi oleh agak curam (8° – 16°) hingga curam (16° – 35°) serta sedikit landai (2° – 4°) hingga miring (4° – 8°) dimana dapat mempengaruhi distribusi kadar unsur *major* (Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃) dan *minor* (Ni, Co, MnO, Cr₂O₃) pada masing-masing blok yang dibuktikan pada hasil statistik ditemukan nilai koefisien variasi > 0,5 dimana distribusi kadar pada unsur tersebut secara keseluruhan terdistribusi tidak normal atau tidak homogen.

Hasil analisis multivariat pada Blok HZ dan Blok DN terhadap unsur *major* dan unsur *minor* untuk keseluruhan maupun masing-masing zona menunjukkan bahwa unsur-unsur yang berpotensi memberikan kontribusi dalam penyusunan zona laterit nikel pada Blok HZ maupun Blok DN terdiri dari Fe, SiO₂, MgO, Al₂O₃ (unsur *major*) dan Co, MnO, Cr₂O₃ (unsur *minor*). Unsur-unsur tersebut yakni memiliki hubungan asosiasi dan resistensi unsur yang kuat hingga sangat kuat sehingga dapat berpotensi memperlihatkan pola penyusunan zona laterit nikel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya disampaikan kepada PT Aneka Tambang Tbk. Unit Geomin yang telah memberikan tempat dan data untuk melaksanakan penelitian serta semua pihak yang telah membantu secara

langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, W., 2006, Laterites: fundamentals of chemistry, mineralogy, weathering processes, and laterite formation. PT INCO. 212 hal.

Apandi dan Sudana., 1980, Peta lembar Ternate, Maluku Utara. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Augusman, R. T., 2009, Analisis ketidakpastian dalam estimasi sumber daya nikel laterit menggunakan metode geostatistik, studi kasus endapan nikel laterit di Pulau Pakal, Halmahera Timur, Maluku Utara. Tesis. Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Brand, N. M., Butt C. R. M. and Elias, M., 1998, Nickel laterites: classification and features. AGSO Journal of Australia Geology and Geophysics, Australia 17;81-88.

Elias, M., 2001, Global lateritic nickel resources. New Caledonian Nickel Conference. Pty Ltd CSA, Australia.

Elias, M., Butt. C. R. M., 2003, Nickel lateritic: A. Review. SEG Newsletter 54; 9-15.

Harraz, H. Z., 2015, Topic 8: Residual (eluvial or laterite) mineral deposits. 09 Desember 2015. <http://www.slideshare.net/hzharraz/residualmineral-deposits>.

Harris, R., 2003, Geodynamic patterns of ophiolites and marginal basins in the Indonesian and New Guinea Regions. *Geological Society, London, Special Publications*, 218 (1), pp.481-505.

Ishiwatari, A., 1994, Circum-Pacific Phanerozoic multiple ophiolite belts. In Circum-Pacific Ophiolites (Proceedings of the 29th IGC Ophiolite Symposium) (pp. 7-28).

Kadarusman, A., 2001, Geodynamic of Indonesian region; a petrological approaches. unpublished PhD Thesis. Tokyo Institute of Technology.456p.

Rinawan, F. I. W., Rosana, M. F., Patonah A., Agustini, S., 2013, Batuan ultramafik dan keterdapatan laterit nikel di Pulau Pakal, Kabupaten Halmahera Timur, Maluku Utara. Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Bandung.

Sinclair, A. J., Blackwell, G. H. 2004, Applied mineral inventory estimation. Cambridge University Press, Cambridge.

Sugiyono. 1999, Statistik Untuk Penelitian. CV Alfabeta, Bandung.

Syafrizal, Heriawan, M. N., Notosiswoyo, S., Anggayana, K., Samosir, J. F., 2009, Hubungan kemiringan lereng dan morfologi dalam distribusi ketebalan horizon laterit pada endapan nikel laterit, studi lasus endapan laterit nikel Pulau Gee dan Pulau Pakal, Halmahera Timur, Maluku Utara. JTM Vol. XVI No. 3/2009.

Van Zuidam, R. A. 1985, Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.

Diterima	: 17 September 2018
Direvisi	: 24 September 2018
Disetujui	: 29 November 2018

ALTERASI HIDROTERMAL GUNUNG RENDINGAN BERDASARKAN ANALISIS PETROGRAFI DAN X-RAY DIFFRACTION (XRD)

HYDROTHERMAL ALTERATION IN MOUNT RENDINGAN BASED ON PETROGRAPHY AND X-RAY DIFFRACTION (XRD) ANALYSIS

Dewi Gentana¹, Nana Sulaksana², Emi Sukiyah³, dan Euis T. Yuningsih³

¹Program Doktorat Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

²Departemen Geologi Terapan, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

³Departemen Geologi Sains, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

dewigentana06@gmail.com

ABSTRAK

Daerah penelitian terletak di daerah panas bumi Gunung Rendingan, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Daerah penelitian dipengaruhi oleh Sesar Semangko, mempunyai pola sesar berarah Barat Laut -Tenggara dan Timur Laut – Barat Daya. Penelitian bertujuan untuk mengetahui himpunan mineral alterasi berdasarkan analisis petrografi dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Analisis petrografi digunakan untuk mengetahui mineral alterasi sebagai indikator temperatur dan fluida hidrothermal di daerah penelitian. Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi jenis mineral lempung. Berdasarkan analisis petrografi dan XRD pada batuan permukaan di daerah penelitian menghadirkan mineral kelompok lempung yang terdiri dari smektit, illit, serisit dan kaolinit. Hasil analisis petrografi dan XRD terhadap serbuk bor (*cutting*) dari sumur XD-1, XD-2 dan XD-3 memperlihatkan himpunan mineral alterasi hidrothermal smektit-kaolinit-serisit dan illit-epidot pada sumur XD-1, himpunan mineral serisit-smektit, smektit-illit dan illit-epidot pada sumur XD-2, himpunan mineral smektit-kaolinit dan illit-smektit-epidot pada sumur XD-3. Berdasarkan himpunan mineral alterasi tersebut dapat diperkirakan temperatur bawah permukaan di daerah penelitian berkisar 150°-300°C pada kedalaman 700 – 1900 mKu sebagai zona reservoir. Kehadiran mineral kalk-silikat yaitu epidot bersama wairakit dan prehnit sebagai indikator zona *reservoir* memiliki temperatur yang baik. Batuan di daerah penelitian memiliki permeabilitas yang baik dengan kehadiran mineral adularia.

Kata kunci: Himpunan Mineral Alterasi, Panas Bumi, Petrografi, Sumatera XRD

ABSTRACT

The research area is located in the geothermal area of Mt. Rendingan, Tanggamus Regency, and Lampung Province. The research area was influenced by the Semangko Fault, having Northwest-Southeast and Northeast-Southwest fault pattern. The study aims to determine the alteration minerals assemblages based on Petrographic and X-Ray Diffraction (XRD) Analysis. Petrographic analysis was used to determine alteration minerals as indicators of temperature and hydrothermal fluid in the reserach area. XRD analysis was performed to identify the type of clay minerals. Based on petrographic and XRD analysis on surface rocks in the research area present clay group minerals: smectite, ilite, sericite and kaolinite. The results of petrographic and XRD analysis of cutting from wells XD-1, XD-2 and XD-3 showed a hydrothermal alteration minerals assemblage such as smectite-kaolinite-sericite and illite-epidote in XD-1 wells, a sericite-smectite, smectite-ilite and illite-epidote in XD-2 wells, smectite-kaolinite minerals and illite-smectite-epidote minerals assemblage in XD-3 wells. Based on the assemblage of alteration minerals it can be estimated the subsurface temperature in the reserach area from 150°-300 °C in ranges at depth of 700-1900 mKu as a reservoir zone. The presence of calc-silicate minerals namely epidote with wairakit and prehnite as reservoir zone indicators which have a good temperatures. The rocks in the

reserach area have a good permeability which is characterized by the presence of adularia minerals.

Keywords: *Alteration mineral assemblages, geothermal, petrographic, Sumatra, XRD*

PENDAHULUAN

Daerah penelitian merupakan daerah panas bumi Gunung Rendingan yang secara administratif termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung, Sumatra bagian Selatan. Secara geografis berada pada koordinat 104 °29'20,9"BT hingga 104°38'37,15" BT dan 5°16'14,47" LS hingga 5°31'4,35"LS. Daerah penelitian terbentuk dari suatu rangkaian kejadian regional tektono-vulkanik yang runtuh (*collapse*) membentuk depresi (Van Bemmelen, 1949). Kegiatan tektonik yang berkembang berasal dari suatu mata rantai kejadian regional tersebut telah mengalami segmentasi. Di sekitar Sumatra Selatan hingga Teluk Semangko sesar ini dikenal sebagai sistim Sesar Semangko. Pulau Sumatra membentuk sesar-sesar Semangko yang bersambung dari Utara ke Selatan yang dikenal dengan Sistim Sesar Semangko (*Semangko Fault System*). Secara fisiografis daerah penelitian termasuk ke dalam zona sesar Semangko Selatan yang merupakan daerah depresi sepanjang Bukit Barisan yang mempunyai arah Barat Laut-Tenggara (NW-SE) membujur dari Teluk Semangko hingga Banda Aceh (Van Bemmelen, 1949). Kehadiran sesar-sesar dekstral yang berarah Barat Laut-Tenggara (NW-SE) sangat berperan sebagai zona permeabilitas yang menyebabkan terdapat manifestasi panas bumi di permukaan. Hal ini mengindikasikan bahwa ada sumber panas di kedalaman membentuk suatu sistem panas bumi (*reservoir*) yang dapat dikembangkan sebagai sumber energi panas bumi. Aktivitas sistem panas bumi umumnya berkaitan dengan pembentukan mineral alterasi hidrotermal. Suatu lapangan panas bumi dapat diproduksi secara maksimal apabila telah diketahui karakteristik sistem panas bumi. Mineral alterasi hidrotermal dapat dipergunakan

sebagai salah satu indikator untuk mengetahui suatu daerah yang mempunyai potensi panas bumi. Alterasi hidrotermal merupakan ciri adanya perubahan tekstur, mineralogi, dan komposisi kimia dari suatu batuan yang diakibatkan oleh aktivitas fluida hidrotermal, Hochstein dan Browne (2000). Alterasi hidrotermal digunakan untuk mengetahui mineral ubahan serta mengestimasi tingkat keasaman fluida (Yosana, 2017). Guilbert dan Park (1986) proses hidrotermal pada keseimbangan tertentu akan menghasilkan kumpulan mineral tertentu sebagai himpunan mineral (*mineral assemblage*).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui himpunan mineral alterasi hidrotermal berdasarkan analisis petrologi yaitu petrografi dan *X-Ray Diffraction* (XRD) yang dilakukan terhadap sampel batuan permukaan dan bawah permukaan (sumur) untuk memprediksi temperatur bawah permukaan (*reservoir*) panas bumi di daerah penelitian.

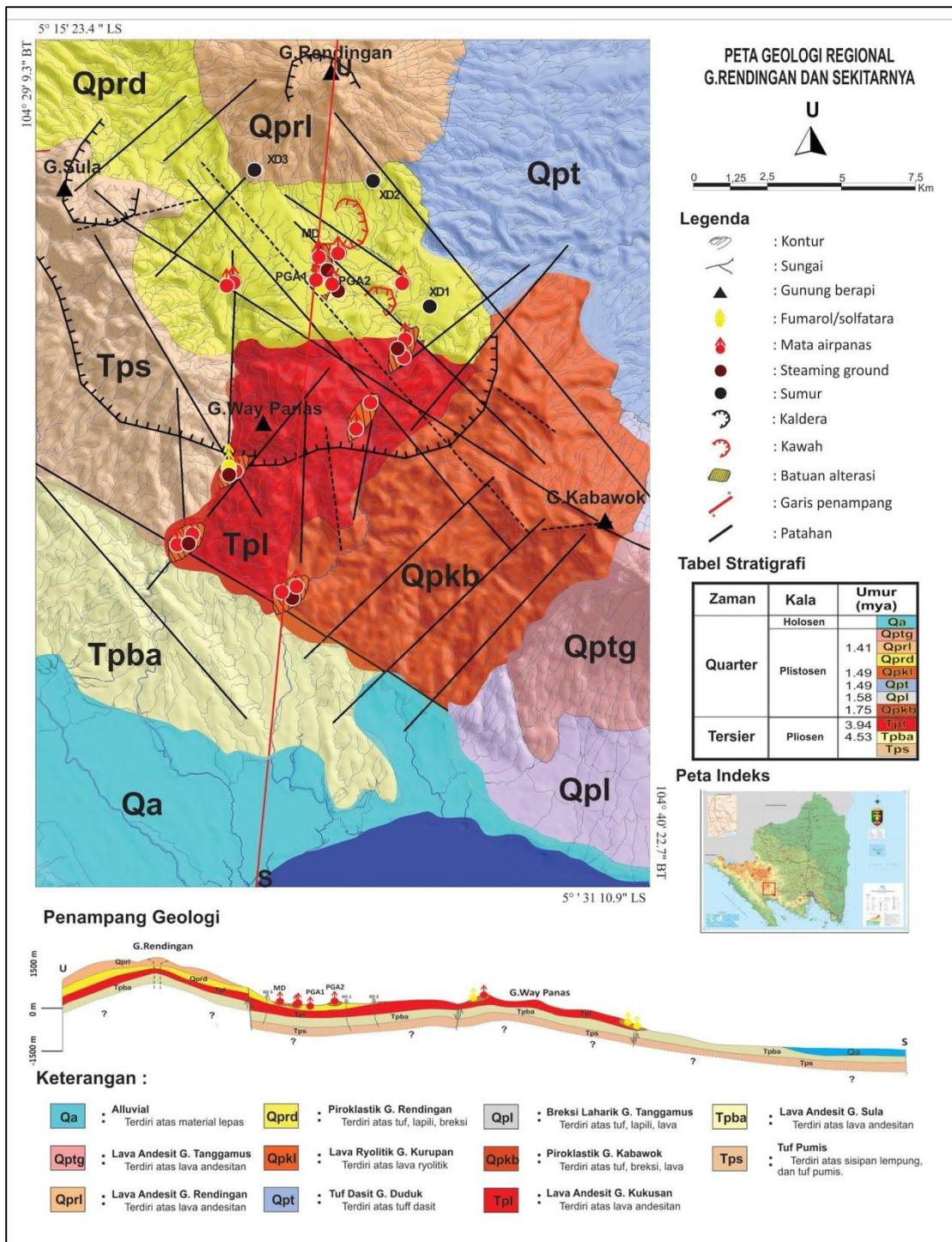
Geologi Daerah Penelitian

Geologi regional di daerah penelitian berdasarkan peneliti terdahulu tersusun oleh batuan yang berumur Tersier hingga Kuarter (Masdjuk, 1990). Litologi di daerah penelitian didominasi oleh produk vulkanik Kuarter terdiri dari 8 (delapan) satuan batuan. Aluvium sebagai endapan termuda dijumpai di bagian Barat Daya dan Selatan daerah penelitian. Produk vulkanik Tersier terdiri dari 3 (tiga) satuan batuan dari muda ke tua yaitu lava andesit Gunung Kukusan, lava andesit dan tuf *pumice* Gunung Sula. Berdasarkan analisis umur batuan (*age dating*) memperlihatkan batuan tertua berumur Tersier dengan umur berkisar dari $3.94-4.53 \times 10^6$ tahun. Batuan yang berumur Kuarter mempunyai umur berkisar dari $1.41-1.75 \times 10^6$ tahun (Masdjuk, 1990). Lava andesit sebagai batuan tertua yang berasal dari Gunung Sula secara megaskopis berwarna abu-abu kehitaman, fenokris

plagioklas, satuan batuan andesit ini tidak mengalami alterasi dan satuan batuan ini berumur sekitar 4.53×10^6 tahun atau sekitar Pliosen Tengah. Satuan lava Andesit basaltik yang diperkirakan berasal dari Gunung Kukusan merupakan batuan kedua tertua di daerah penelitian. Satuan batuan ini berwarna hitam hingga abu-abu, bertekstur porfiri-afanitik dengan komposisi plagioklas dan piroksin. Batuan lava andesit di wilayah Gunung Kukusan ini berumur 3.93×10^6 tahun atau sekitar Pliosen Atas. Lava dasit yang tersingkap di sekitar Gunung Duduk yang berumur Tersier dan Pliosen atas (3.93×10^6 tahun). Pada batuan ini telah mengalami pelapukan, sehingga memiliki warna abu-abu keputihan, sebagai fenokris mineral plagioklas, hornblenda, dan mineral opak (pirit) yang terdapat di dalam masa dasar gelas. Satuan batuan piroklastik yang bersumber dari Gunung Kebawok, terdiri dari piroklastik berwarna coklat kekuningan hingga abu-abu, breksi tuf yang telah mengalami proses pelapukan yang cukup tinggi bersifat sangat lunak. Umur batuan ini 1.75×10^6 tahun atau sekitar Pleistosen Bawah. Batuan piroklastik berasal dari Gunung Rendingan, memiliki warna putih kecoklatan sampai kekuningan, tidak terkompaksi dengan baik, diperkirakan umurnya 1.41×10^6 tahun atau sekitar Pleistosen Tengah. Batuan piroklastik tuf tertutupi oleh satuan lava andesit basaltik yang merupakan produk dari vulkanik Gunung Rendingan. Lava memiliki warna abu-abu gelap, bertekstur porfiritik-afanitik, didominasi oleh mikrolit

plagioklas, struktur aliran, dan vesikular yang berorientasi. Satuan breksi laharik andesit basaltik memiliki warna abu-abu gelap, bertekstur afanitik. Batuan sebagai fragmen breksi memperlihatkan struktur aliran dan vesikular yang berorientasi. Satuan batuan ini diperkirakan juga berasal dari Gunung Rendingan.

Secara spesifik di daerah penelitian berkembang sesar-sesar yang terlokalisir dalam suatu daerah depresi akibat gerakan tektonik regional Semangko yang bergerak untuk mencari posisi keseimbangan yang menghasilkan permeabilitas pada batuan yang dilaluinya (Kamah, 2001). Perkembangan struktur geologi di daerah penelitian diperlihatkan oleh sesar-sesar yang memiliki arah Barat Laut - Tenggara (NW-SE) dan Timur Laut – Barat Daya (NE-SW) serta fenomena kawah dan daerah depresi merupakan sisa kaldera gunungapi yang berperan terhadap kemunculan manifestasi panas bumi. Keberadaan manifestasi panas bumi di daerah penelitian, umumnya terdapat pada daerah depresi, zona tepi atau perpotongan sesar berupa mata air panas/ hangat, fumarol, solfatar, kubangan lumpur panas (*mud pool*), tanah beruap (*steaming ground*), uap air panas (*steam heated water*), dan batuan alterasi tersebar di bagian tengah dan Selatan daerah penelitian. Di beberapa tempat terdapat silika residu dan travertin. Peta geologi regional dan penampang geologi yang memperlihatkan adanya manifestasi panas bumi permukaan ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta dan penampang geologi Utara-Selatan (A-B), memperlihatkan keberadaan manifestasi panas bumi di daerah penelitian umumnya berada pada daerah depresi, pada tepi atau perpotongan patahan

METODOLOGI

Metode yang digunakan adalah penelitian lapangan dan penelitian laboratorium. Penelitian lapangan merupakan pengamatan visual terhadap manifestasi

panas bumi permukaan, khususnya untuk pengamatan litologi berkaitan dengan ketersediaan batuan alterasi yang akan menggambarkan himpunan mineral alterasi hidrothermal. Penelitian laboratorium berupa analisis petrologi meliputi analisis

petrografi dengan menggunakan mikroskop polarisasi dan *X-Ray Diffraction* (XRD). Analisis petrografi dan XRD dilakukan pada sampel batuan permukaan dari 3 (tiga) daerah di lokasi penelitian yaitu daerah Pagar Alam 1 (PGA-1), Pagar Alam 2 (PGA-2) dan Muara Dua (MD). Analisis petrografi dan XRD juga dilakukan pada sampel batuan serbuk bor (*cutting*) dari sumur pengeboran XD-1, XD-2 dan XD3.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Litologi Dan Manifestasi panas bumi Permukaan

Litologi daerah penelitian ini mencakup daerah Pagar Alam (PGA-1), Pagar Alam 2 (PGA-2) dan Muara Dua (MD) tersusun oleh batuan produk vulkanik berupa lava, piroklastik berupa tuf dan breksi vulkanik yang telah teralterasi secara *argillic-propylitic* ditandai dengan mineral kaolinit yang mengindikasikan lingkungan asam. Di ke 3 (tiga) daerah pengamatan tersebut terdapat manifestasi panas bumi permukaan berupa mata air panas/hangat, fumarol, solfatara, kubangan lumpur panas (*mud pool*), tanah panas berupa (*steaming ground*), uap air panas (*steam heated water*), dan batuan alterasi.

Daerah Pagar Alam 1

Pada daerah Pagar Alam 1 (PGA-1), hasil observasi pengamatan visual di lapangan, litologi produk vulkanik (lava andesit-basaltik) berwarna abu-abu muda hingga putih, telah mengalami pelapukan dan berubah kuat sehingga sulit untuk dikenali tekstur batuan asal. Manifestasi panas bumi permukaan berupa *steaming ground*, fumarol, *mud pool*, mata air panas dan batuan alterasi, berbau belerang. Mata air panas memiliki temperatur 80,8°C dengan pH 2. Dibeberapa lokasi terdapat *mudpool* memiliki temperatur 97,2°C dan pH 3 (Gambar 2). Pada lokasi ini terdapat adanya endapan silika residu (putih), jarosit (hitam) dan sulfur (kuning).



Gambar 2. Manifestasi panas bumi daerah PGA-1, berupa batuan alterasi, fumarol, solfatar dan *streaming ground*.

Daerah Pagar Alam 2

Pada daerah Pagar Alam 2 (PGA-2), hasil observasi pengamatan visual di lapangan dijumpai batuan piroklastik, tuf dan breksi yang telah mengalami proses alterasi yang sangat kuat menjadi kaolinit, berwarna putih kecoklatan lengket (*sticky*). Terdapat manifestasi panas bumi permukaan berupa fumarol, solfatara, berbau belerang tajam, *steaming ground*, batuan alterasi, mata air panas dengan gelembung - gelembung gas pada dasar sungai dan pH air 3. Di lokasi ini juga dijumpai *mudpool* memiliki temperatur 97,2°C, *steaming ground* memiliki temperatur 93°C. (Gambar 3).



Gambar 3. Manifestasi panas bumi daerah PGA-2 berupa fumarol/solfatar, *mud pool*, *steaming ground* dan mata air panas dengan gelembung-gelembung gas pada dasar sungai.

Daerah Muara Dua

Pada daerah Muara Dua (MD), hasil observasi pengamatan visual di lapangan terdapat batuan piroklastik berupa tuf, breksi dan lava andesit yang telah

teralterasi kuat secara *argillic* ditandai dengan mineral kaolinit. Hamparan batuan alterasi luas disepanjang sungai, berwarna putih kecoklatan lengket (*sticky*). Hamparan batuan alterasi dengan *steaming ground* memiliki temperatur 94,8°C. Manifestasi panas bumi permukaan lainnya berupa *mudpool*, fumarol, solfatar, berbau belerang, mata air panas memiliki temperatur 97°C dengan pH air 4. *Steam heated water* membentuk danau, air danau berwarna bening kehijauan, berbau belerang, memiliki temperatur 39,9°C. Rendahnya temperatur air danau mengindikasikan bahwa air panas di daerah ini telah tercampur dengan air permukaan (Gambar 4).



Gambar 4. Manifestasi panas bumi MD berupa *steam heatedwater*, batuan alterasi, *steaming ground*, fumarol solfatar

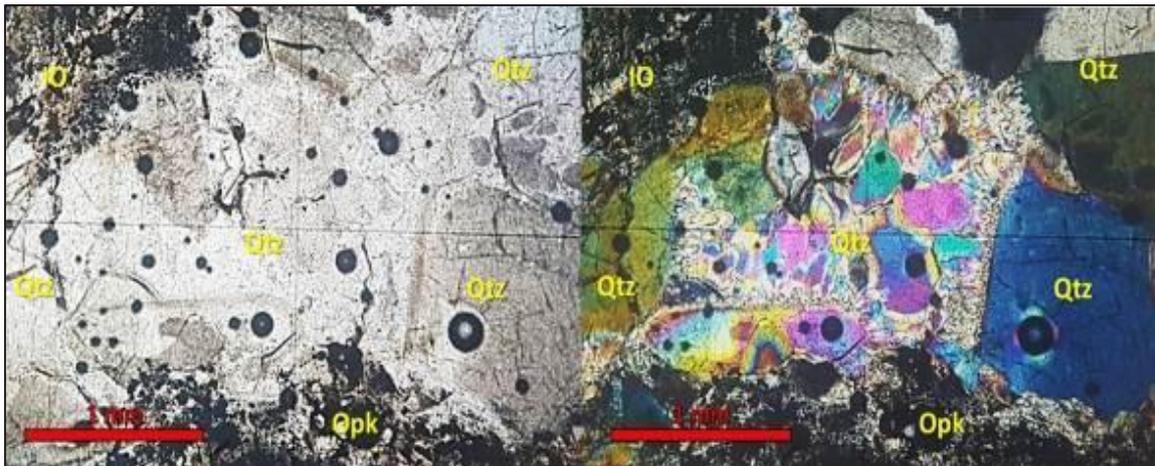
Karakteristik Mineral Alterasi

Hasil analisis petrografi terhadap sampel batuan yang diambil dari daerah Pagar Alam 1 (PGA-1) telah mengalami intensitas alterasi hidrotermal mencapai 100% dan pelapukan yang cukup tinggi, sehingga sulit untuk mengenali jenis dan tekstur batuan asal, memperlihatkan

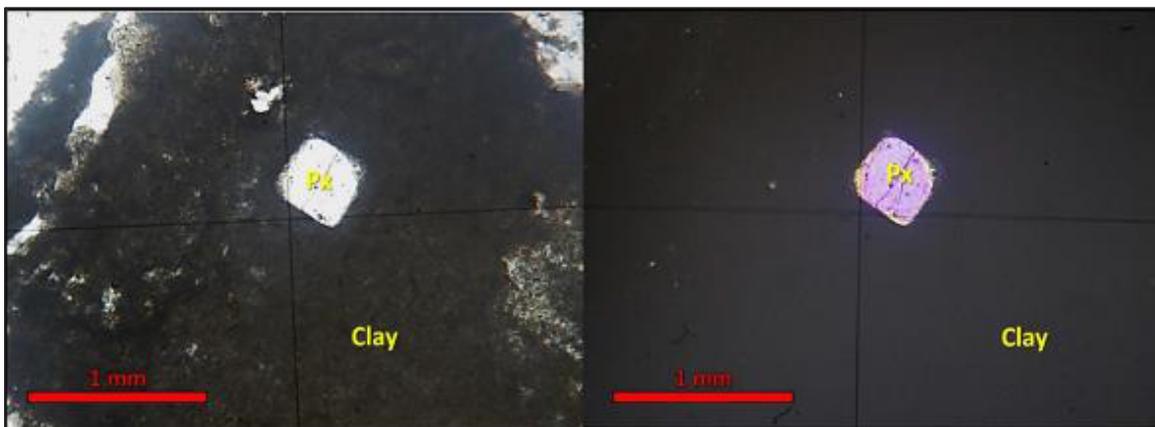
warna putih kecoklatan (//-Nikol) dan kuning kecoklatan (X-Nikol). Sayatan tipis tersusun oleh mineral kuarsa sekunder (45%) dengan tekstur *colloform*, oksida besi (20%), mineral opak (15%) smektit (10%), anhidrit (10%). Adanya tekstur *colloform* mencerminkan proses pengendapan mineral kuarsa sekunder. Terdapat mineral smektit mengisi mineral (*vein mineral*) (Gambar 5).

Hasil analisis petrografi sampel batuan permukaan daerah Pagar Alam 2 (PGA-2) dalam sayatan tipis memperlihatkan warna hitam kecoklatan (//-Nikol) dan hitam (X-Nikol). Tekstur awal batuan sangat sulit dikenali batuan telah mengalami alterasi yang sangat kuat dengan intensitas alterasi mencapai 100%.

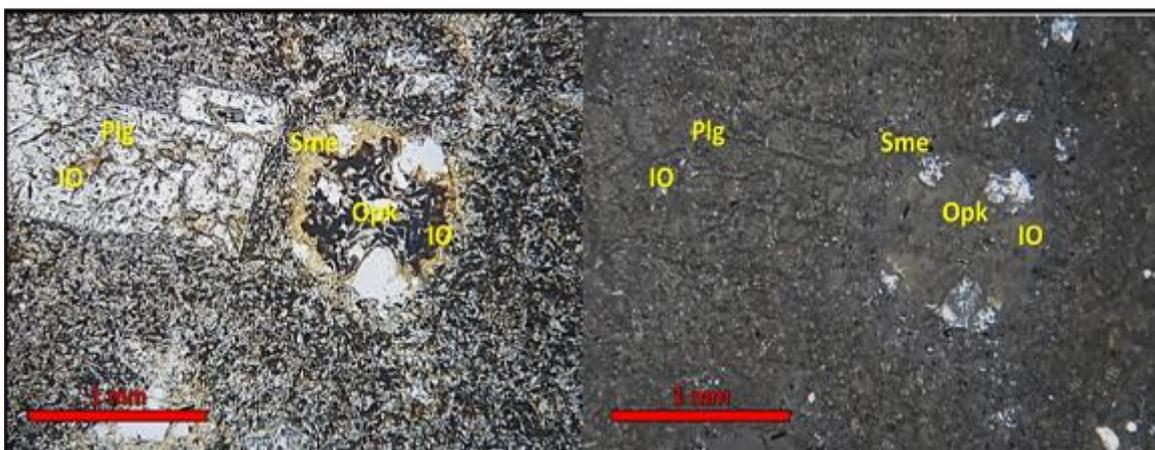
Kenampakan mikroskopis pada sayatan tipis sampel PGA-2 tersusun didominasi oleh mineral lempung (96%), piroksin (2%) dan pecahan mineral kuarsa (2%), tersebar tidak merata (Gambar 6). Secara mikroskopis, bertekstur afanitik derajat kristalisasi hipokristalin, bentuk kristal subhedral-anhedral, fenokris tersusun oleh mineral plagioklas (10%) berubah menjadi mineral oksida (10%), smektit (15%), dan mineral opak (20%). Mineral smektit dijumpai sebagai *vein mineral* dan hadir juga mengubah masa dasar dan fenokris plagioklas (10%) dengan total masa dasar (35%). Pada sayatan tipis mineral primer plagioklas dan piroksen, dengan masa dasar berupa mineral sekunder berupa mineral opak, smektit dan oksida masih dapat dikenali dengan tingkat intensitas ubahan sedang (45%). Mineral smektit dijumpai juga sebagai *vein mineral* dan masa dasar (Gambar 7).



Gambar 5. Kenampakan pagioklas berubah menjadi mineral lempung, klorit bersama mineral kuarsa sekunder pada sampel batuan PGA-1, perbesaran 40x. Kiri //-Nikol. Kanan X-Nikol



Gambar 6. Kenampakan fragmen mineral piroksin dalam matriks mineral lempung yang berlimpah, menunjukkan batuan telah mengalami berubah kuat. Sampel batuan PGA-2, perbesaran 40 x. Kiri //-Nikol. Kanan X-Nikol.



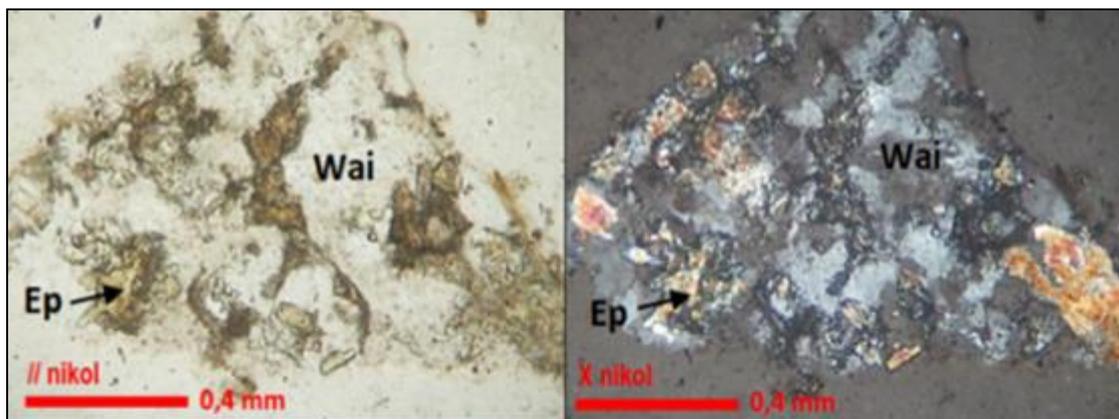
Gambar 7. Kenampakan mineral kuarsa sekunder polikristalin mengisi rongga batuan. Terdapat mineral smektit (Sme) menggantikan masa dasar. Kehadiran oksida besi (IO) bersama mineral opak pada sampel batuan MD, perbesaran 40x. Kiri //-Nikol. Kanan X-Nikol.

Himpunan Mineral Alterasi Sumur XD-1

Himpunan Mineral Smektit-Kaolinit-Serisit Himpunan mineral ini terdapat pada sampel *cutting* interval kedalaman 100-818 mKu. Secara mikroskopis sayatan *cutting* terdiri dari fragmen andesit aliran, andesit porfiritik dan tuf, yang umumnya telah teralterasi dengan intensitas rendah-sedang (20-50%). Terdapat mineral sekunder yaitu mineral lempung kaolin dan serisit menggantikan plagioklas, kuarsa dan gelas dan juga sebagai masa dasar berwarna coklat keruh. Mineral sekunder lainnya dijumpai pada kedalaman ini yaitu kalsit, zeolit, idingsit, piropilit. Mineral opak dan sfen hadir berupa agregat halus menggantikan masa dasar pada andesit aliran, porfiritik dan tuf. Pada kedalaman 501-598mKu hadirnya mineral epidot bersama illit sebagai *relict mineral*.

Himpunan Mineral Alterasi Illit-Epidot. Himpunan mineral ini terdapat pada litologi andesit aliran, andesit porfiritik dan tuf yang telah teralterasi dengan intensitas sedang-kuat (30-70%), pada interval kedalaman 908-1980 mKu. Pada kedalaman ini terdapat mineral sekunder

dengan kehadiran mineral illit bersama mineral kalsit, piropilit, kuarsa, zeolit, klorit dan sfen. Mineral klorit, kalsit dan sfen terlihat menggantikan mineral plagioklas, feldspar, dan hadir sebagai agregat dan menggantikan masa dasar di dalam tuf, andesit porfiritik dan andesit aliran. Pada kedalaman ini terdapat mineral opak tersebar tidak merata berbentuk prisma dan sebagai agregat halus menimpa mineral lempung, kuarsa dan sfen. Mineral smektit-illit terdapat pada interval kedalaman 903-1104mKu, pada litologi andesit porfiritik. Mineral kalsit dijumpai melimpah sebagai masa dasar dan fenokris pada andesit porfiritik. Feldspar sekunder hadir bersama zeolit. Zeolit bias rangkap rendah hadir bersama mineral lempung. Mineral sfen mempunyai bias rangkap tinggi hadir bersama mineral opak. Mineral illit hadir kembali di kedalaman 1659 mKu. Mineral epidot hadir bersama klorit pada interval kedalaman 1800-1980 mKu. Klorit dijumpai melimpah merubah feldspar pada litologi andesit porfiri. Analisis mikroskopis *cutting* sumur XD1 pada kedalaman 501 mKu memperlihatkan mineral smektit mengubah masa dasar batuan (Gambar 8).



Gambar 8. Kenampakan mikroskopis, fragmen andesit aliran pada kedalaman 501 mKu, sampel *cutting* sumur XD-1. Plagioklas berubah menjadi epidot (Ep), masa dasar berubah menjadi mineral lempung Wairakit (Wai). Kehadiran epidot pada kedalam ini diperkirakan sebagai *relict mineral* dan Illit (Ill) dan klorit (Chl). PPL (*Paralel Nicol*); XPL (*Cross Nicol*) sumur XD1

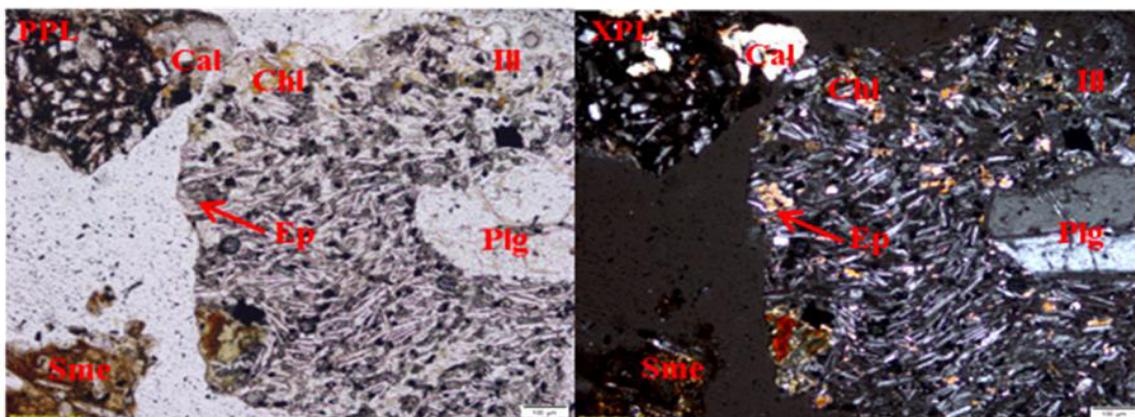
Himpunan Mineral Alterasi XD-2

Himpunan Mineral Alterasi Smektit-Serisit. Himpunan mineral ini terdapat pada sampel *cutting* interval kedalaman 128-518 mKu pada litologi tuf litik terubah (60-80%), fragmen andesit terubah (20-30%) dan basalt terubah (10%). Tuf litik warna abu-abu - merah kecoklatan. Terdapat andesit sebagai fragmen pada tuf litik terubah menjadi mineral smektit dan oksida besi. Oksida besi berwarna coklat kemerahan sebagai matriks dan *vein mineral*. Mineral smektit hadir bersama serisit menggantikan fenokris dan matriks plagioklas. Mineral sekunder lainnya pada kedalaman ini yaitu mineral opak berwarna hitam dan smektit berwarna coklat hadir merubah plagioklas (matriks) dan serisit berwarna putih kecoklatan bias rangkap tinggi, merubah plagioklas fenokris dan matrik.

Himpunan Mineral Smektit-Ilit. Himpunan mineral ini terdapat pada sampel serbuk bor (*cutting*) interval kedalaman 519- 908mKu pada litologi tuf litik terubah, basalt terubah dan andesit terubah. Mineral sekunder (*clay mineral*) yang hadir pada kedalaman ini yaitu smektit dan illit. Mineral sekunder lainnya antara lain klorit, kalsit, kuarsa sekunder, opak dan oksida besi. Mineral opak hadir tersebar merubah masa dasar batuan dan mineral klorit terlihat hadir mengubah

plagioklas dan masa dasar batuan bersama mineral lempung.

Himpunan Mineral Alterasi Ilit-Epidot. Himpunan mineral ini terdapat pada sampel *cutting* interval 909-1748 mKu pada litologi tuf litik terubah dan tuf kristal terubah (interval kedalaman 909-1028mKu), andesit terubah terdapat pada interval kedalaman 1271-1301mKu. Terdapat andesit terubah bersama lempung hitam dan *graywacke* terubah pada interval kedalaman 1301-1451mKu. Pada interval kedalaman 1452-1748mKu dijumpai kembali andesit terubah. Mineral sekunder lempung yang hadir pada himpunan mineral ini yaitu mineral illit dijumpai mulai kedalaman 908 mKu. Mineral sekunder lainnya yaitu klorit, kalsit, epidot dan kuarsa sekunder. Kenampakan mineral epidot hadir mengubah plagioklas dan mengisi urat pada fragmen batuan mulai dijumpai pada kedalaman 1499 mKu. Klorit hadir merubah masa dasar dan plagioklas. Kehadiran mineral kuarsa sekunder, oksida besi, kalsit, klorit, illit dan epidot selain menggantikan plagioklas dan masa dasar juga terdapat sebagai *vein mineral* mengisi rekahan pada fragmen tuf dan fragmen andesit. Intensitas ubahan pada *cutting* sumur XD-2 secara keseluruhan rendah hingga sedang (22-45%). Dari kenampakan mikroskopis (petrografi) *cutting* sumur XD2 pada kedalaman 1499 mKu memperlihatkan kehadiran mineral wairakit bersama epidot (Gambar 9).



Gambar 9. Kenampakan mikroskopis, fragmen andesit pada kedalaman 1499 mKu, sampel *cutting* sumur XD-2. Plagioklas terubah menjadi illit, smektit (Sme), epidot (Ep) dan kalsit (Cal). PPL (*Paralel Nicol*), XPL (*Cross Nicol*).

Pada sumur XD2 terjadi hilang sirkulasi (*loss circulation*) mulai interval kedalaman 690-800mKu dan hilang sirkulasi berulang pada interval kedalaman 1299-1342 mKu, 1411-1448 mKu, 1510-1528 mKu, 1528-1551 mKu, 1551-1574 mKu, 1574-1603 mKu, 1633-1722 mKu. Hilang sirkulasi pada kedalaman tersebut di atas berkisar dari 0,6-20 Barel Per Minutes (BPM).

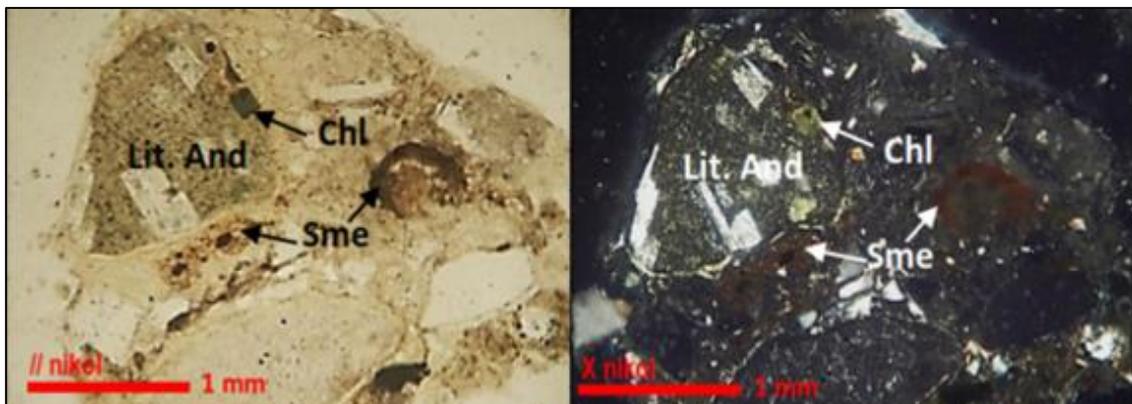
Himpunan Mineral Alterasi XD-3

Himpunan Mineral Alterasi Smektit-Kaolinit. Himpunan mineral ini terdapat pada sampel *cutting* interval kedalaman 175-650mKu pada litologi breksi vulkanik terubah. Pada kedalaman 247 -375mKu terdapat tuf teralterasi. Umumnya batuan telah mengalami alterasi dengan intensitas alterasi rendah hingga sedang (25-50%. Mineral lempung melimpah pada kedalaman ini hadir bersama mineral kalsit menggantikan plagioklas pada fragmen andesit dan mengisi rekahan-rekahan. Mineral sekunder lain pada kedalaman 570mKu yaitu kuarsa sekunder dan zeolit hadir bersama kalsit sebagai mineral pengisi rongga dan pecahan urat. Di kedalaman 574-650mKu terdapat gelas vulkanik yang sangat melimpah, sebagian teralterasi menjadi mineral lempung dan kalsit. Mineral opak dan oksida besi hadir tersebar tidak merata bersama klorit. Analisis mikroskopis (petrografi) di kedalaman 308mKu pada litologi breksi vulkanik teralterasi terdapat mineral sekunder klorit dan smektit (Gambar 10).

Himpunan Mineral Alterasi Iilit-Smektit-Epidot. Himpunan mineral ini terdapat pada sampel *cutting* interval kedalaman 651-1410 mKu, pada litologi breksi vulkanik dan tuf terubah terdapat pada interval kedalaman 1274-1300 mKu. Mineral sekunder lempung hadir pada kedalaman ini yaitu smektit dan illit. Mineral sekunder lainnya yaitu kalsit, klorit, zeolit, epidot, prehnit, adularia, anhidrit dan aktinolit. Plagioklas melimpah sebagai matriks sebagian terubah menjadi kalsit, kuarsa klorit dan mineral lempung. Mineral sekunder klorit, anhidrit, adularia, kalsit dan oksida besi dijumpai menggantikan sebagian mineral piroksen. Kuarsa sekunder, klorit, zeolit, kalsit dan adularia juga dijumpai sebagai mineral pengisi rongga dan pecahan urat. Mineral epidot hadir sebagai pecahan urat di kedalaman 820 mKu bersama adularia dan zeolit yang mengisi rongga dan rekahan.

Analisis X-Ray Diffraction (XRD) Permukaan dan Sumur

Analisis XRD dilakukan pada 3 (tiga) sampel batuan permukaan yaitu sampel dari daerah Pagar Alam 1 (PGA-1), Pagar Alam 2 (PGA-2), dan Muara Dua (MD). Sampel serbuk bor (*cutting*) diambil dari 3 (tiga) sumur yaitu sumur XD-1, XD-2 dan XD-3. Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi mineral-mineral yang ukurannya tidak dapat terlihat secara mikroskopik (petrografi) terutama pada kelompok mineral lempung

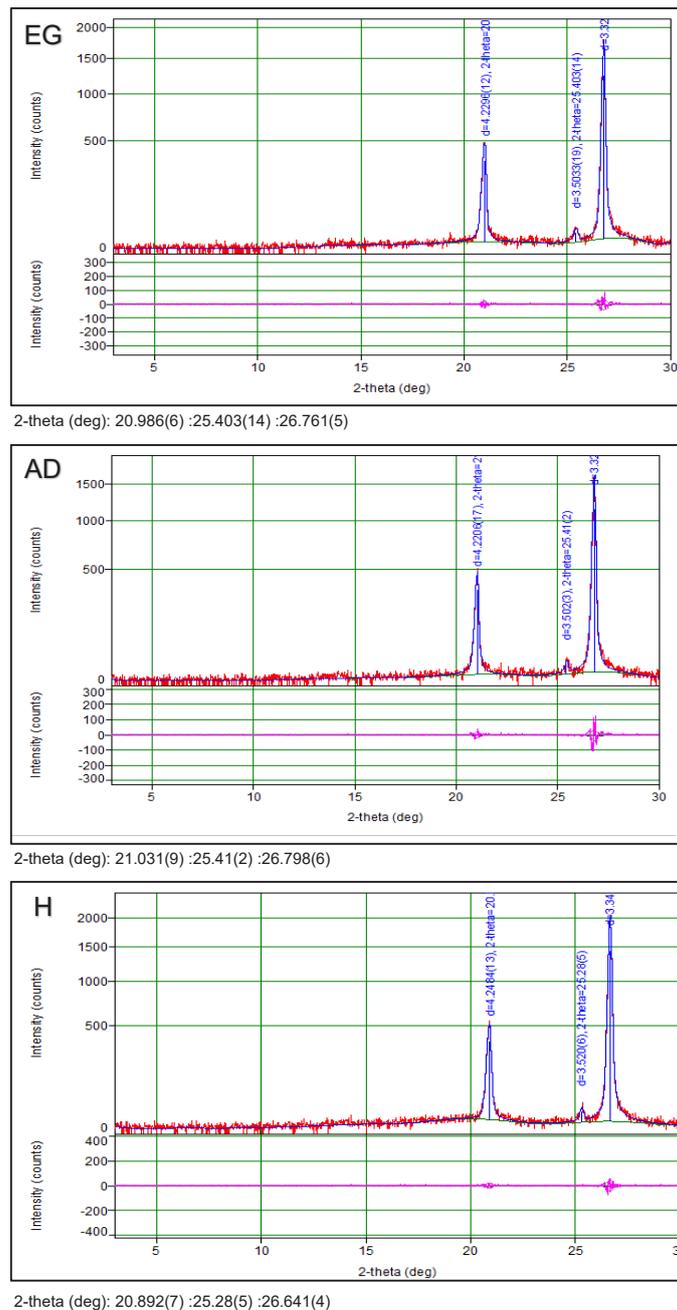


Gambar 10. Kenampakan mikroskopis, fragmen andesit dalam litologi breksi vulkanik teralterasi pada kedalaman 308 mKu, sampel *cutting* sumur XD-3 terdapat plagioklas yang terubah menjadi klorit (Chl) dan sebagian matrik telah terubah menjadi Smektit (Sme).

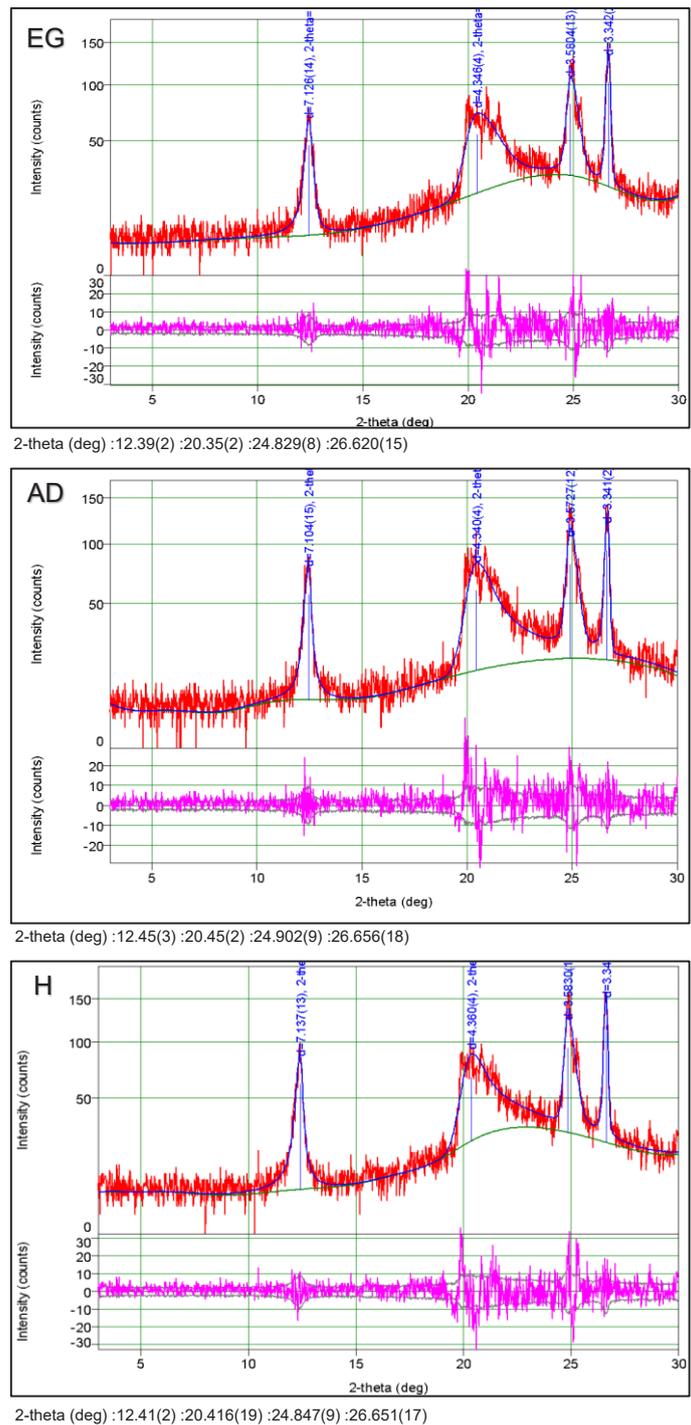
X-Ray Diffraction (XRD) Permukaan

Hasil analisis XRD Pagar Alam 1 (PGA-1), pada kondisi sampel *Ethylene Glicol* (EG,) *Air Dry* (AD) dan *Heating* (H) terdapat puncak grafik dominan mineral *trydimite*, *crystalalite* dan plagioklas (albite). Grafik *clay mineral* smektit masih dikenali pada ke tiga kondisi tersebut. Mineral kaolinit tidak terbaca lagi pada kondisi sampel di *heating* atau dipanaskan (Gambar 11).

Hasil analisis XRD Pagar Alam 2 (PGA-2) teridentifikasi puncak grafik dominan mineral kuarsa. Mineral alterasi hidrotermal lainnya yaitu *clay mineral* kaolinit dan smektit. Pada kondisi sampel *Ethylene Glicol* (EG,) *Air Dry* (AD) dan *Heating* (H) masih terdapat puncak grafik smektit dan kuarsa pada ke tiga kondisi tersebut. Puncak grafik mineral kaolinit tidak dijumpai lagi (Gambar 12).



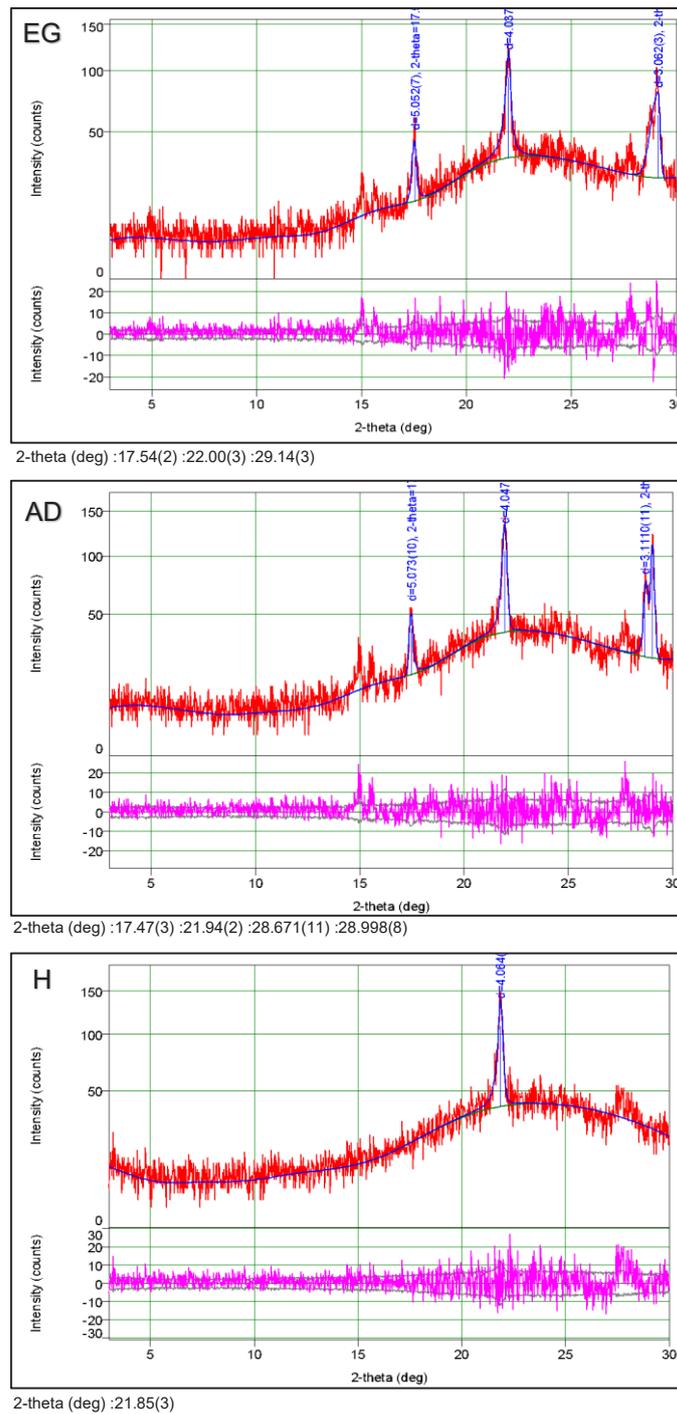
Gambar 11. Hasil XRD permukaan daerah Pagar Alam 1, pada kondisi EG, AD dan H



Gambar 12. Hasil XRD permukaan daerah Pagar Alam 2, pada kondisi EG, AD dan H. Puncak grafik kaolinit masih terbaca pada kondisi EG dan AD

Hasil analisis XRD Muara Dua (MD), teridentifikasi beberapa puncak grafik terlihat cukup jelas dengan kehadiran mineral plagioklas, kalsit dan jarosit. Pada kondisi sampel diberi larutan *Ethylene Glicol* (EG), *Air Dry* (AD) dan dipanaskan (*heating*) masih terlihat puncak mineral

smektit dan kristobalit. Pada kondisi sampel di *heating* atau dipanaskan puncak grafik mineral smektit tidak dijumpai lagi, puncak grafik mineral kuarsa masih muncul untuk ke tiga kondisi EG, AD dan H bersama mineral kalsit (Gambar 13).

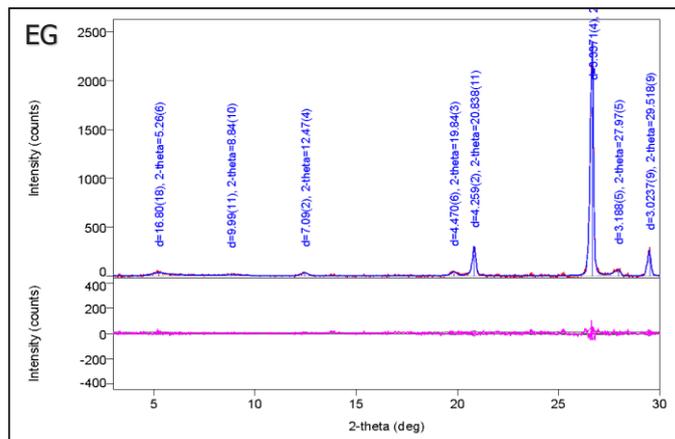


Gambar 13. Hasil XRD permukaan daerah Muara Dua pada kondisi EG, AD dan H, Puncak smektit masih terbaca pada kondisi AD bersama klorit

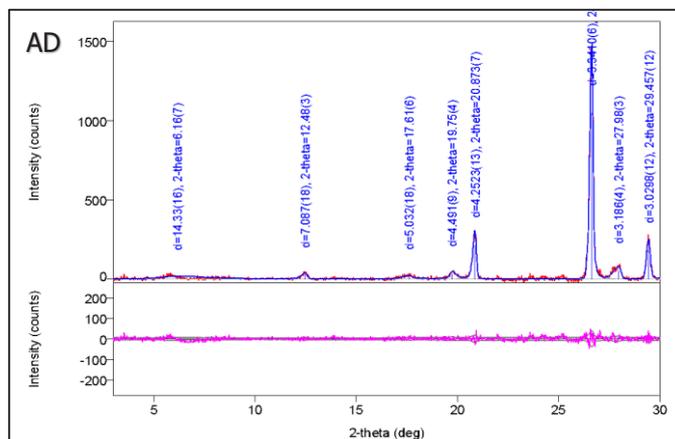
X-Ray Diffraction (XRD) Sumur

Hasil analisis XRD sumur XD-1 pada kedalaman 1254 mKu memperlihatkan puncak grafik *clay mineral* smektit, ilit,

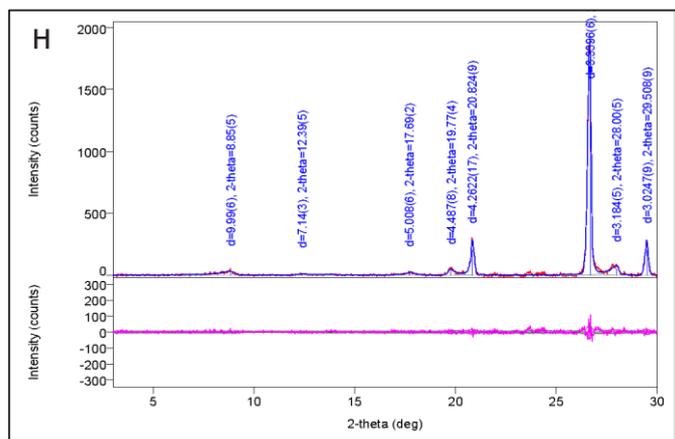
smektit-ilit hadir pada tiga kondisi sampel diberi larutan *Ethylene Glicol* (EG), Air Dry (AD) dan di Heating (H) atau dipanaskan (Gambar 14).



2-theta (deg) :8.78(9) :12.39(4) :13.85(3) :19.80(2) :20.829(5) :22.02(3) :23.633(12) :24.20(3) :25.05(6) :26.641(8) :27.903(6)



2-theta (deg) :8.48(11) :12.44(3) :13.87(3) :17.61(9) :19.742(14) :20.833(10) :22.00(2) :23.53(2) :24.19(2) :25.04(4) :26.641(8) :27.910(7) :29.433(9)

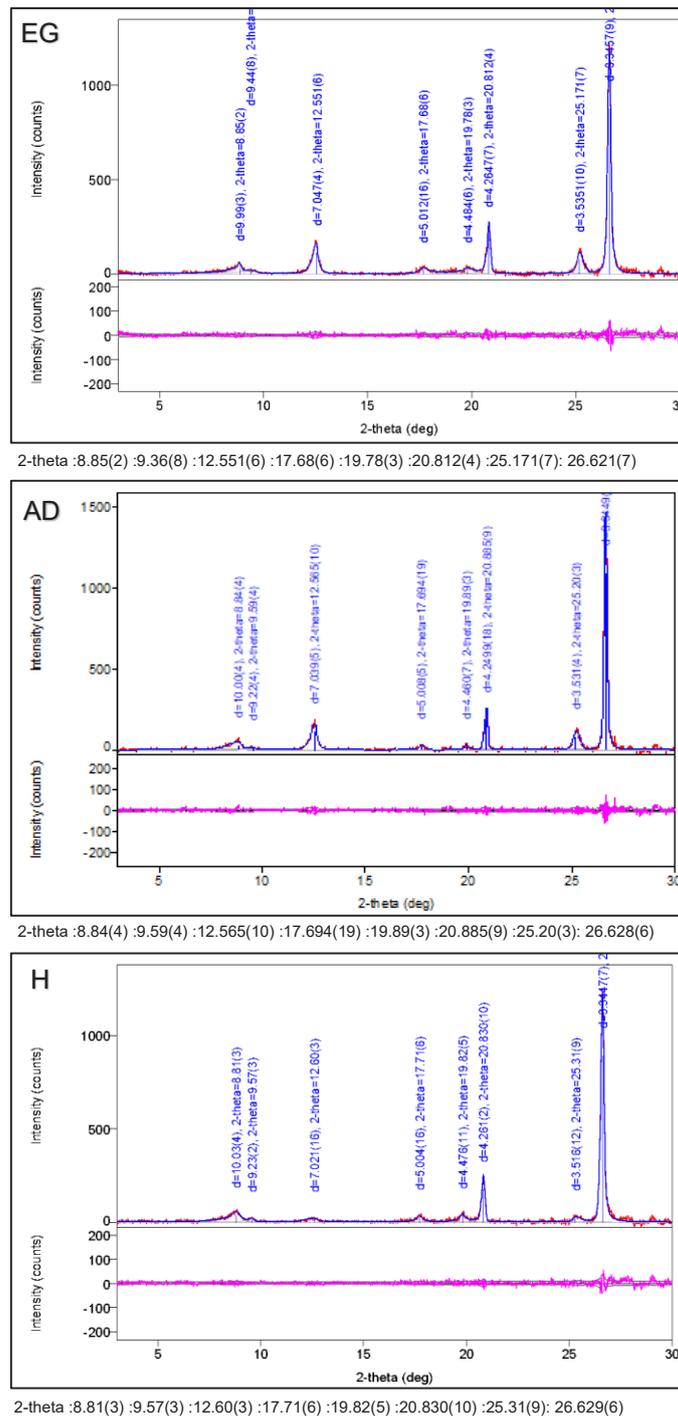


2-theta (deg) :8.78(9) :12.39(4) :13.85(3) :19.80(2) :20.829(5) :22.02(3) :23.633(12) :24.20(3) :25.05(6) :26.641(8) :27.903(6)

Gambar 14. Hasil analisis XRD *cutting* sumur XD-1, kedalaman 1254 mKu memperlihatkan puncak grafik *clay mineral*: kaolinit, illit, smektit pada kondisi EG, AD. Pada kondisi H, grafik kaolinit tidak terbaca

Hasil analisis XRD sumur XD-2 pada kedalaman 1208 mKu, memperlihatkan puncak grafik *clay mineral* kaolinit, smektit, illit, smektit-illit hadir kondisi sampel diberi larutan *Ethylene Glicol* (EG) dan *Air Dry* (AD). Pada kondisi Heating (H) mineral illit

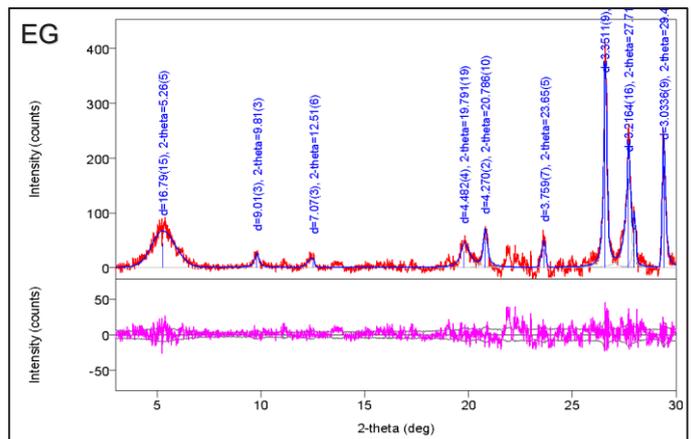
dan smektit, monmorilonit-smektit masih dapat teridentifikasi hadir bersama mineral sekunder lain yaitu plagioklas, tridimit, pirofilit, kalsit dan jarosit. Grafik mineral kaolinit tidak hadir pada kondisi terpanaskan atau *heating* (Gambar 15).



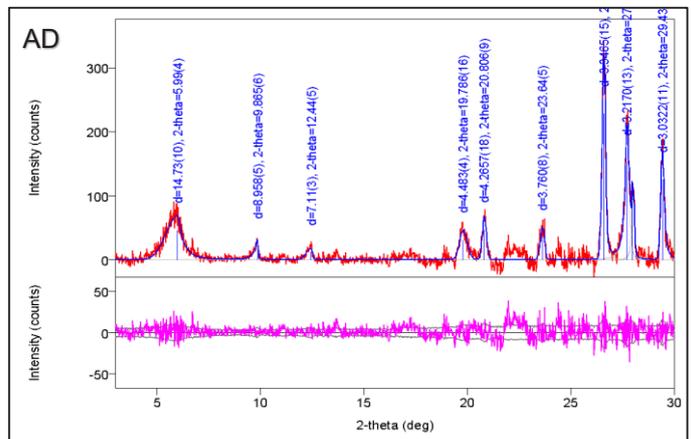
Gambar 15. Hasil analisis XRD *cutting* sumur XD-2, kedalaman 1199 mKu, masih teridentifikasi puncak grafik *clay mineral* : illit dan smektit pada kondisi EG, AD dan H

Hasil analisis XRD sumur XD-3 pada kedalaman 853 mKu, teridentifikasi puncak grafik *clay mineral* yaitu illit, smektit, smektit-ilit dan kaolinit hadir pada kondisi sampel diberi larutan *Ethylene Glicol* (EG) dan *Air Dry* (AD). Pada kondisi *Heating* (H) puncak mineral illit dan smektit masih teridentifikasi hadir bersama mineral

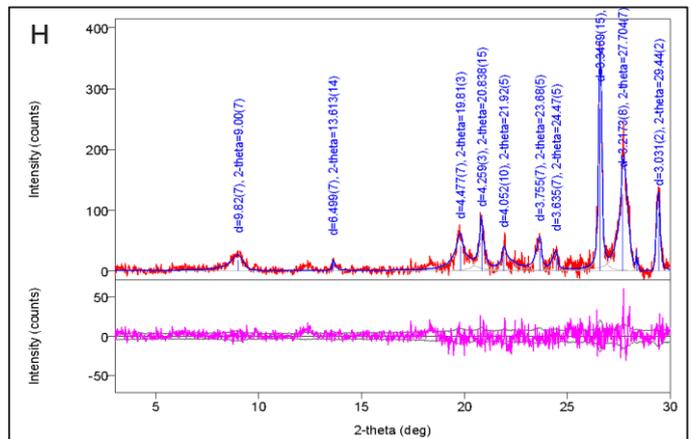
sekunder lain yaitu plagioklas, tridimit, pirofilit, kalsit, jarosit dan klorit. Puncak grafik mineral kaolinit tidak hadir lagi pada kondisi di panaskan atau *heating* (Gambar 16). Log litologi dan himpunan mineral alterasi hidrotermal hasil analisis petrografi dan XRD dari *cutting* sumur XD-1, XD-2 dan XD-3 ditampilkan pada Gambar 17.



2-theta (deg) :5.26(5) :9.81(3) :12.51(6) :19.791(19) :20.786(10) :23.65(5) :26.578(7) :27.712(14) :27.999(9) :29.419(9)

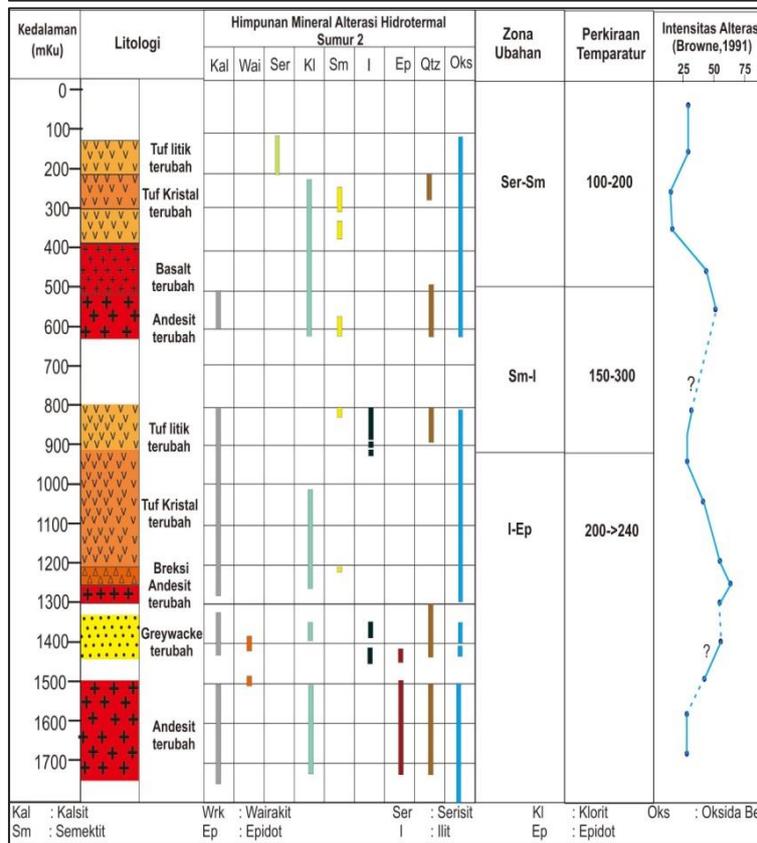
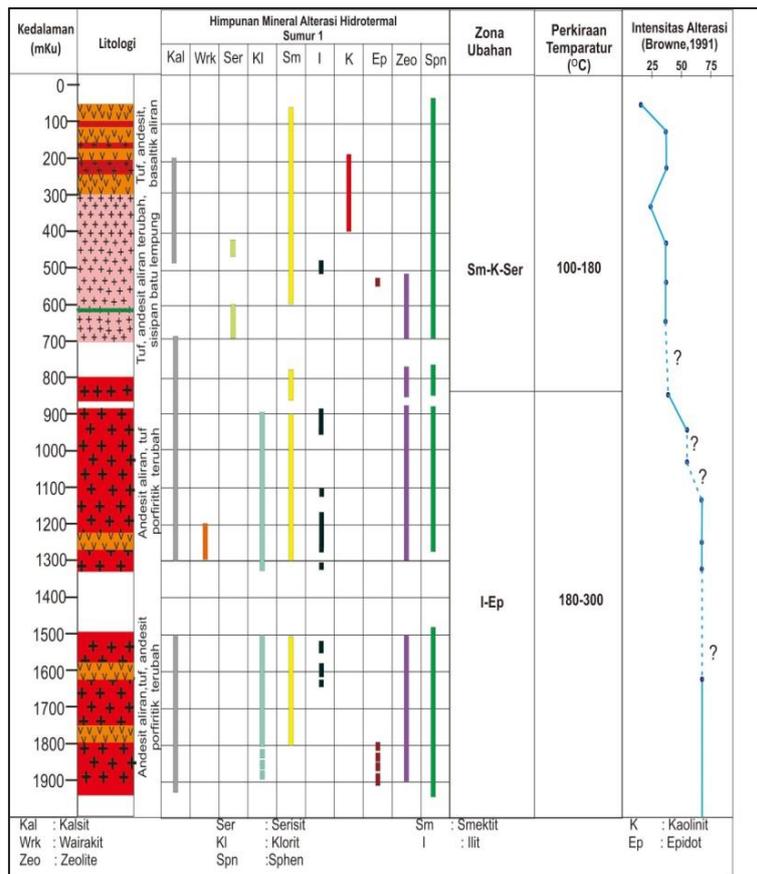


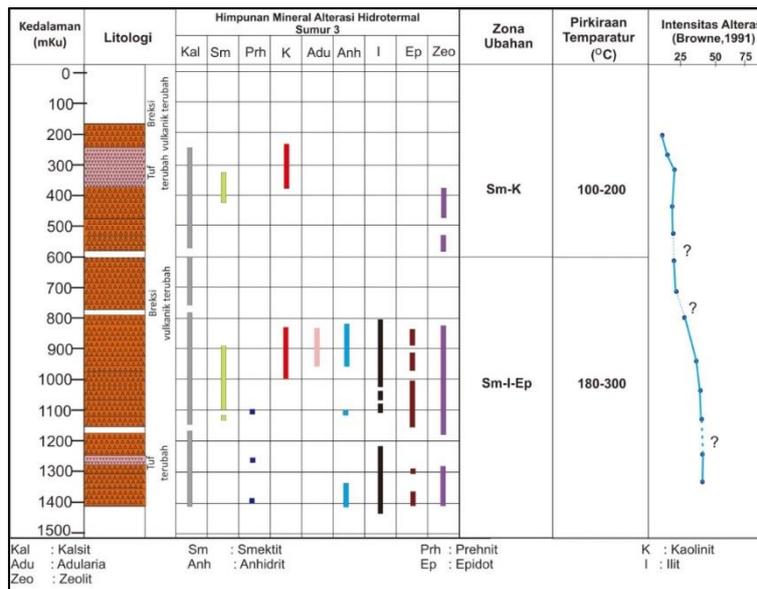
2-theta (deg) :5.99(4) :9.865(6) :12.44(5) :19.786(16) :20.806(9) :23.64(5) :26.615(12) :27.707(11) :27.998(7) :29.433(11)



2-theta (deg) :9.00(7) :13.613(14) :19.81(3) :21.838(15) :21.92(5) :23.68(5) :24.47(5) :26.611(12) :27.704(7) :28.380(9) :29.44(2)

Gambar 16. Hasil analisis XRD *cutting* sumur XD-3, kedalaman 1208 mKu, memperlihatkan puncak grafik *clay mineral* : illit dan smektit masih hadir pada kondisi EG, AD dan H, bersama kuarsa sekunder, kristobalit dan K-Feldspars





Gambar 17. Log Litologi dan Himpunan Mineral Alterasi Hidrotermal pada sumur XD-1, XD-2 dan XD-3, berdasarkan analisis petrografi dan XRD dapat diperkirakan zona *reservoir* memiliki kisaran temperatur 150°-300°C. Sumber : Serbuk bor (*cutting*) PT Pertamina Geothermal Energy

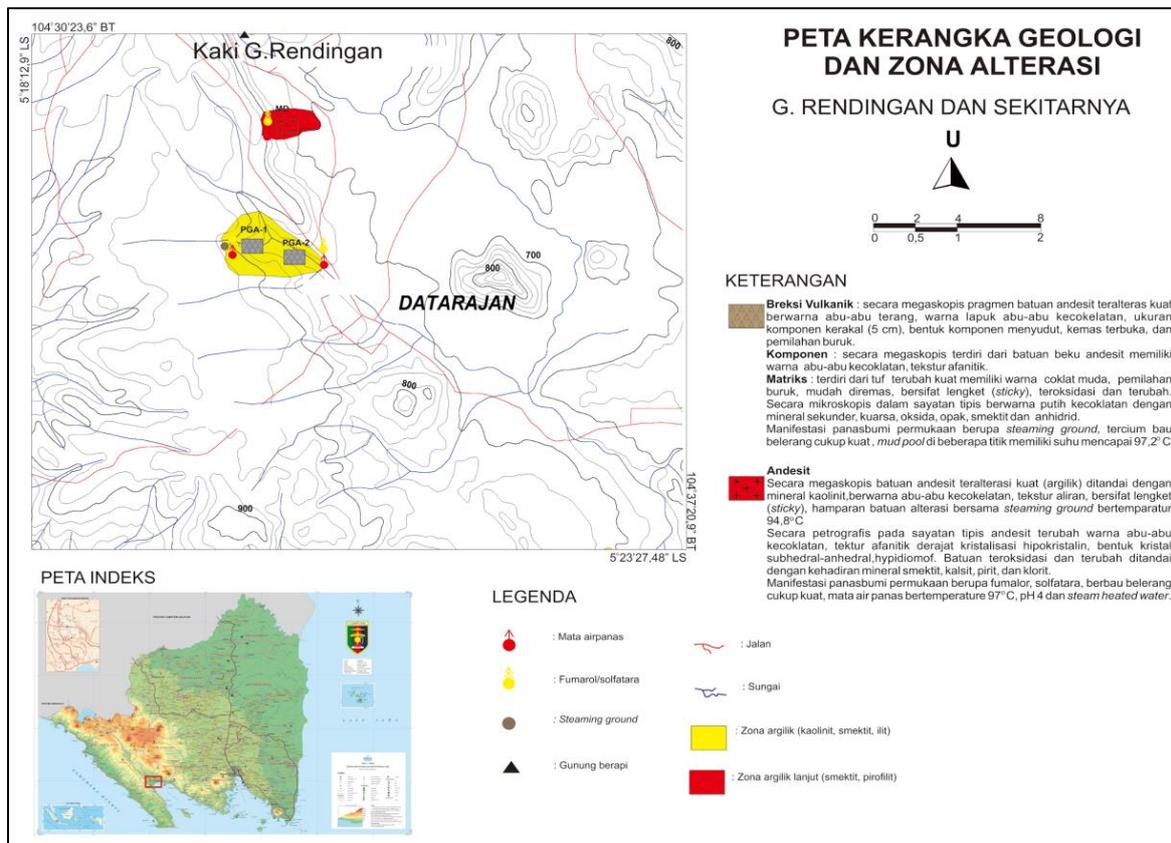
PEMBAHASAN

Alterasi hidrothermal di daerah penelitian memperlihatkan intensitas alterasi bervariasi mulai dari intensitas alterasi rendah hingga sedang (25-50%) dan intensitas alterasi sedang hingga sangat kuat (50 ≥ 75%). Intensitas alterasi rendah-sedang ditunjukkan oleh kondisi batuan dengan masa dasar dan fenokris/ fragmen batuan terubah tetapi tekstur asal batuan masih dapat dikenali. Alterasi mineral dengan intensitas sangat kuat secara mikroskopis diindikasikan oleh batuan yang tidak dapat dikenali baik jenis maupun tekstur batuan asalnya (Browne, 1991).

Batuan terubah dengan intensitas rendah – sedang secara mikroskopis pada batuan andesit terubah masih dapat dikenali mineral primer plagioklas, yang hadir sebagai fragmen atau fenokris pada tuf, serta sebagian lagi sebagai pecahan mineral yang terubah menjadi epidot, klorit dan kuarsa sekunder, oksida dan kalsit.

Pada batuan yang telah mengalami alterasi dengan intensitas sangat kuat, jenis dan

tekstur batuan asal sulit dikenali, dan kehijauan menggantikan tuf, gelas dan masa dasar serta fenokris pada andesit aliran dan andesit porfiritik. Mineral sekunder yang hadir antara lain smektit, serisit, illit, klorit, zeolit, dan kalsit. Mineral sekunder tersebut hadir menggantikan mineral plagioklas, masa dasar juga sebagai pengisi rongga atau urat. Tekstur *colloform* sebagai hasil pengendapan kuarsa (Morrison, 1995). Jenis lempung berdasarkan analisis petrografi berupa smektit, illit kaolinit dan serisit dengan jumlah yang bervariasi. Kehadiran mineral lempung tersebut di atas mengindikasikan bahwa fluida asam terbentuk di dekat permukaan. Hal ini didukung oleh terdapatnya mata air panas (*hot spring*) sebagai manifestasi panas bumi yang berada di daerah penelitian memiliki pH air 3-4. Peta kerangka geologi mencakup lokasi pengamatan litologi dan pengamatan manifestasi panas bumi permukaan di daerah penelitian secara keseluruhan ditampilkan pada Gambar 18. Plagioklas telah terubah menjadi mineral lempung berwarna kecoklatan.



Gambar 18. Log Litologi dan Himpunan Mineral Alterasi Hidrotermal pada sumur XD-1, XD-2 dan XD-3, berdasarkan analisis petrografi dan XRD dapat diperkirakan zona *reservoir* memiliki kisaran temperatur 150°-300°C. Sumber : Serbuk bor (*cutting*) PT Pertamina Geothermal Energy

Berdasarkan hasil analisis petrografi dan XRD pada *cutting* sumur XD-1, XD-2, dan XD-3 memiliki himpunan mineral alterasi hidrotermal yang beragam yang dapat dipergunakan untuk memprediksi temperatur bawah permukaan.

Pada sumur XD-1 terdapat 2 (dua) himpunan mineral alterasi hidrotermal yaitu himpunan mineral smektit-kaolinit-serisit dan illit-epidot. Himpunan Mineral smektit-kaolinit-serisit terdapat pada interval kedalaman 100-818 mKu pada litologi tuf, andesit, basaltik, andesit aliran dan andesit porfiritik umumnya terubah dengan intensitas rendah-sedang (20-50%). Kehadiran mineral serisit menunjukkan adanya pengaruh fluida asam di kedalaman tersebut. Mineral sekunder lainnya yang hadir pada kedalaman ini yaitu kalsit, pirofilit, zeolit, kuarsa sekunder, mineral opak dan sfen. Temperatur bawah permukaan pada interval kedalaman ini

diperkirakan pada kisaran 100°-180°C dan pH asam.

Himpunan mineral illit-epidot pada sumur XD-1 terdapat pada interval kedalaman 908-1980mKu pada litologi tuf, andesit aliran andesit porfiritik dan sisipan batulempung pada kedalaman 1104 mKu dan 1305 mKu. Kemunculan mineral illit dan epidot pada kedalaman 501 mKu diperkirakan sebagai mineral *relict*. Mineral sekunder lain yang hadir antara lain klorit, kalsit, kuarsa sekunder, zeolit, mineral opak wairakit dan sfen. Di beberapa kedalaman klorit, kalsit dan zeolit dijumpai sebagai *vein mineral*. Kehadiran wairakit mengindikasikan bahwa batuan di kedalaman tersebut bersifat permeabel (Suharno dan Browne, 2000). Kehadiran mineral kalk-silikat epidot menandakan daerah kedalaman ini mempunyai suhu tinggi atau indikator temperatur yang baik pada zona *reservoir*. Kisaran temperatur

bawah permukaan sumur XD-1 diperkirakan berkisar dari 180°-300°C (Gambar 19 A) dengan pH netral sedikit asam (Thomson, 1996).

Pada sumur XD-2 terdapat 3 (tiga) himpunan mineral alterasi hidrotermal yaitu himpunan mineral smektit-serisit, smektit-ilit dan ilit-epidot.

a. Himpunan mineral smektit-serisit terdapat pada interval kedalaman 125-518 mKu pada litologi tuf litik, tuf kristal, basalt, dan andesit berubah dengan intensitas alterasi rendah-sedang (20-44%). Mineral sekunder yang hadir yaitu serisit, smektit, oksida besi, mineral opak dan kuarsa sekunder. Kehadiran mineral serisit mengindikasikan larutan asam berasal dari fluida kondensat turun ke sistem hidrotermal melalui media rekahan.

b. Himpunan mineral smektit-ilit terdapat pada interval kedalaman 519-908mKu pada litologi breksi tuf berubah, tuf litik, tuf kristal, andesit dan *greywacke* berubah. Intensitas alterasi pada interval kedalaman tersebut sedang (24-35%). Mineral sekunder hadir pada interval kedalaman ini antara lain kalsit, klorit, kuarsa sekunder, smektit mineral opak dan oksida besi. Himpunan mineral smektit-ilit ini diperkirakan memiliki temperatur pada kisaran 180°-300°C dan pH netral. Adanya zona hilang sirkulasi terjadi pada interval kedalaman 639-817 mKu mengindikasikan pada kedalaman tersebut memiliki permeabilitas yang baik pada batuan dikarenakan oleh perkembangan struktur geologi.

c. Himpunan mineral ilit-epidot terdapat pada interval kedalaman 909-1748 mKu. Epidot dicirikan oleh warna hijau kecoklatan mempunyai bentuk kristal tidak sempurna. Pembentukan epidot muncul pada temperatur 200-250°C (Reyes, 1990). Wairakit umumnya muncul pada temperatur 220°-310°C. Wairakit terdapat pada batuan *graywacke* menyisip pada andesit berubah di kedalaman 1421 mKu dan 1451 mKu. Kehadiran mineral wairakit sebagai penciri zona permeabel (Suharno dan Browne, 2000). Mineral sekunder yang

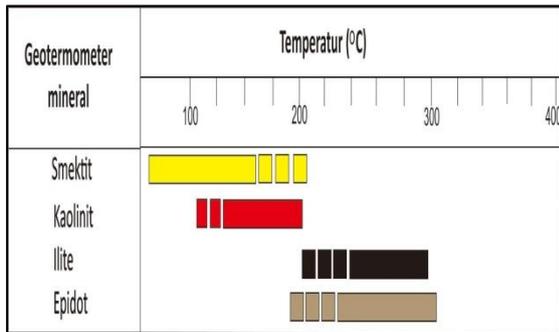
hadir antara lain ilit, epidot, kalsit, klorit, mineral opak, wairakit dan kuarsa sekunder. Kehadiran epidot dan wairakit digunakan sebagai indikator zona *reservoir*. Adanya zona hilang sirkulasi mulai kedalaman 640-800mKu dan hilang sirkulasi dijumpai kembali pada interval kedalaman 1272-1299 mKu, 1300-1342mKu yang menerus sampai di kedalaman 1633-1722mKu menandakan pada kedalaman dengan himpunan mineral alterasi tersebut memiliki permeabilitas baik (Siahaan, 2015). Kehadiran mineral kalk-silikat epidot sebagai mineral indikator temperatur yang baik (Gambar 19 B).

Pada sumur XD-3 memiliki 2 (dua) himpunan mineral alterasi hidrotermal yaitu himpunan mineral smektit-kaolinit dan himpunan mineral ilit-smektit-epidot. Himpunan mineral smektit-kaolinit terdapat pada interval kedalaman 178-650mKu pada litologi breksi vulkanik dan tuf berubah dengan intensitas alterasi rendah – sedang (20-27%). Mineral sekunder yang hadir antara lain kalsit, smektit, klorit dan zeolit. Kehadiran kalsit yang melimpah mengindikasikan bahwa himpunan mineral ini mengalami proses pendidihan (*boiling*) (Simmons, 1993).

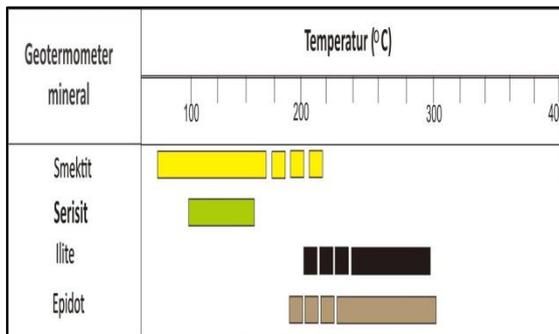
Himpunan mineral smektit-kaolinit ini diperkirakan memiliki temperatur bawah permukaan pada kisaran 100-200°C dan pH asam. Kehadiran mineral zeolit dapat dipergunakan sebagai indikator temperatur yang baik. Kemunculan mineral zeolit sangat tergantung dengan temperatur saat pembentukannya (Brown, 1978).

Himpunan mineral ilit-smektit-epidot terdapat pada interval kedalaman 700-1410mKu pada litologi breksi vulkanik berubah dengan fragmen andesit dan matrik gelas vulkanik dan tuf berubah dengan intensitas alterasi sedang (25-40%). Mineral sekunder yang hadir antara lain kalsit, klorit, zeolit, epidot, prehnit, adularia dan anhidrit, Mineral kalsit kuarsa sekunder dan klorit selain sebagai pengganti plagioklas dan masa dasar juga terdapat sebagai *vein mineral*. Banyaknya *vein mineral* mengindikasikan bahwa

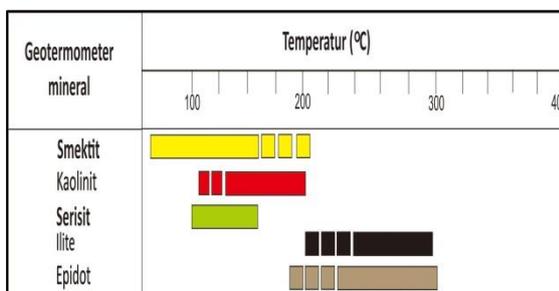
batuan telah mengalami rekahan. Hadirnya mineral adularia sebagai penciri dari zona permeabilitas yang baik (Browne, 1984). Kehadiran mineral epidot dan prehnit dapat digunakan sebagai indikator zona *reservoir* memiliki temperatur yang baik dengan kisaran temperatur 180°-300°C (Gambar 19 C).



Gambar 19A. Perkiraan temperatur bawah permukaan sumur XD-1, berdasarkan himpunan mineral alterasi hidrotermal.



Gambar 19B. Perkiraan temperatur bawah permukaan sumur XD-2, berdasarkan himpunan mineral alterasi hidrotermal.



Gambar 19C. Perkiraan temperatur bawah permukaan sumur XD-3, berdasarkan himpunan mineral alterasi hidrotermal.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis petrografi dan *X-Ray Diffraction* (XRD) sampel batuan permukaan menunjukkan bahwa di daerah penelitian memiliki variasi himpunan mineral alterasi hidrotermal dengan kehadiran mineral sekunder kaolinit, smektit, illit, anhidrit, adularia, kalsit, kuarsa sekunder dan mineral kalk-silikat epidot. Hilangnya mineral kaolinit dan smektit pada kondisi terpanaskan (*heating*) mencerminkan mineral tersebut tidak stabil pada temperatur tinggi. Dari hasil analisis petrografi dan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada sampel serbuk bor (*cutting*) sumur XD-1 mempunyai himpunan mineral smektit-kaolinit-serisit dan illit-epidot. Sumur XD-2 mempunyai himpunan mineral smektit-serisit, smektit-illit dan illit-epidot. Sedangkan pada sumur XD-3 memiliki himpunan mineral smektit-kaolinit dan illit-smektit-epidot. Hal tersebut memperlihatkan bahwa semakin dalam kedalaman sumur, fluida semakin netral. Zona *reservoir* di daerah penelitian diperkirakan pada kedalaman 700 – 1900 mKu dengan kehadiran mineral kalk-silikat seperti mineral epidot, wairakit dan prehnit. Temperatur bawah permukaan berkisar antara 150-300°C pada masa awal pembentukannya. Kehadiran mineral sekunder adularia mengindikasikan batuan di daerah penelitian memiliki permeabilitas yang baik.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis sampaikan kepada PT. Pertamina Geothermal Energy (PGE) yang telah memberikan izin penelitian, dan terimakasih kepada semua pihak yang telah banyak membantu hingga penelitian terlaksana dengan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

Browne, R.P.L., 1978. *Hydrothermal Alteration in active geothermal fields, Annual Reviews, Earth Planet Science*, Annual Reviews Inc., p.229-50.

- Browne, R.P.L., 1984. *Hydrothermal Alteration Lecture Notes*, Geothermal Institute, University of Auckland, New Zealand.
- Browne, R.P.L., 1991. *Hydrothermal Alteration and Geothermal System*, The University of Auckland, New Zealand.
- Hochstein, M.P., and Browne P.R.L., 2000, *Surface Manifestation System with Volcanic Heat Sources*. Encyclopedia of Volcanoes, Academic Press, p 835-853.
- Guilbert, J. M., and Park Jr. C.F., 1986, *The geology of ore deposits*. New York W.H. Libraries Australia., Vol 96 No. 1.
- Kamah, M.Y., 2001, *Mapping Permeability Potential as Target Reservoir at Geothermal Ulubelu Field*. Proceeding of the 5th INAGA Annual Scientific Conference And Exhibitions, Yogyakarta.
- Masdjuk. 1990. *Laporan Geologi Daerah Way Panas dan Ulubelu, Lampung Selatan*. Divisi panas bumi, Direktorat Eksplorasi dan Produksi, Pertamina (Tidak diterbitkan).
- Morrison, G., Dong Guoyi and Subash Jaireth. 1995. *Textural Zoning in Epithermal Quartz Veins*. Klondike Exploration Service.
- Reyes, A.G., 1990. *Petrology of Philippine Geothermal System and The Application of Alteration Mineralogy to their Assessment*. United Nations University, Geothermal Training Programme : Reykjavanik.
- Siahaan, E.E., Sasradipoera, D.S Silitonga, T.H., Pamel, C., Koestono, H, Mubarak, M.H., Rifki, G., 2015. *Success Development Drilling in Ulubelu Green Field in South Sumatra Based on Geological Structure Evidence, Generate 4X55MW*. Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
- Simmons, S.F., and B.W Christenson. 1993. *Towards A Unified Theory on Calcite Formation in Boiling Geothermal System*. Proceeding 15th NZ Geothermal Workshop, pg 145-148.
- Suharno and Browne, P.R.L., 2000. *Subsurface Hydrothermal Alteration at The Ulubelu Geothermal Field, Lampung, Southern Sumatra, Indonesia*, Standford University, California.
- Thomson, A.J.B., and Thomson, J.F.H., 1996. *Atlas of Alteration, a Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals.*, Geological Association of Canada., 1 16 hal.
- Van Bemmelen, RW., 1949. *The Geology of Indonesia*, volume I.A. The Hague Martinus Nijhoff, Nederland.
- Yosana V., Rosana F. M., Haryanto A. D., Koestono, H., 2017. *Himpunan Alterasi Hidrotermal pada sumur penelitian "V Y Z" lapangan Kamojang Jawa Barat, Indonesia*. Padjadjaran. Geoscience Journal. Vol no.2 pp 164-171.

Diterima	: 16 Oktober 2018
Direvisi	: 30 Oktober 2018
Disetujui	: 30 November 2018

**KEPROSPEKAN PANAS BUMI GUNUNG LAWU
BERDASARKAN KAJIAN VULKANOSTRATIGRAFI****GEOTHERMAL PROSPECT OF MOUNT LAWU
BASED ON VOLCANOSTRATIGRAPHIC ANALYSIS**

Dudi Hermawan dan Lano Adhitya Permana
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
dudi.hermawan@esdm.go.id

ABSTRAK

Gunung Lawu merupakan salah satu kerucut gunungapi di Indonesia yang memiliki keterdapatan manifestasi panas bumi dengan sebaran cukup luas di bagian lerengnya. Untuk mengetahui keprospekan panas bumi daerah Gunung Lawu diperlukan suatu kajian ilmiah yang bisa menjelaskan hubungan antara vulkanisme Gunung Lawu dengan pembentukan sistem panas bumi daerah tersebut. Metode penelitian dalam makalah ini adalah berupa kajian vulkanostratigrafi. Kajian dilakukan dengan menentukan parameter-parameter karakteristik vulkanik Gunung Lawu yang meliputi volume dan pola struktur geologi sebagai data primer, serta umur vulkanisme dan evolusi magma sebagai data sekunder. Hasil kajian menunjukkan bahwa Gunung Lawu memiliki volume gunungapi sebesar 300 km³ yang mengindikasikan keberadaan dapur magma yang cukup besar sebagai sumber panas, dengan vulkanisme termuda berumur 200 ribu tahun yang berada di kisaran umur ideal untuk membentuk sistem panas bumi yang matang. Pola struktur geologi menunjukkan arah struktur yang homogen dengan penyebaran *vent* radial mengarah ke puncak Gunung Lawu. Intensitas kerapatan patahan dan rekahan tinggi yang mencerminkan adanya zona permeabilitas tinggi terletak di lereng selatan dan barat Gunung Lawu. Dengan karakteristik tersebut, dapat disimpulkan bahwa daerah panas bumi Gunung Lawu memiliki prospek panas bumi yang menarik untuk dikembangkan dan perlu diteliti lebih lanjut, terutama pada lereng selatan dan barat Gunung Lawu.

Kata kunci: Gunung Lawu, vulkanisme, vulkanostratigrafi, sistem panas bumi, prospek

ABSTRACT

Mount Lawu is one of the volcanic cones in Indonesia which has geothermal manifestation with a fairly wide distribution on the slopes. To find out the geothermal prospect of the Gunung Lawu area, a scientific study is needed that can explain the relationship between Mount Lawu volcanism and the formation of its geothermal system. The research method carried out in this paper is volcanostratigraphic study. The study was conducted by determining the parameters of volcanic characteristics of Mount Lawu which include the volume and pattern of geological structures as primary data, as well as the age of volcanism and evolution of magma as secondary data. The results of the study show that Mount Lawu has volcanic volume of 300 km³ which indicates the presence of quite large magma chamber as heat source, with the youngest volcanism of 200 thousand years as the ideal age range to form mature geothermal system. The pattern of geological structure shows homogeneous structure direction with radial vent spread towards the peak of Mount Lawu. The high intensity of fault and fracture density which reflect the presence of high permeability zones are located on the southern and western slopes of Mount Lawu. With these characteristics, it can be concluded that the Gunung Lawu geothermal area has attractive geothermal prospect to be developed and needs further investigation, especially on the southern and western slopes of Mount Lawu.

Keywords: Mount Lawu, volcanism, volcanostratigraphy, geothermal system, prospect

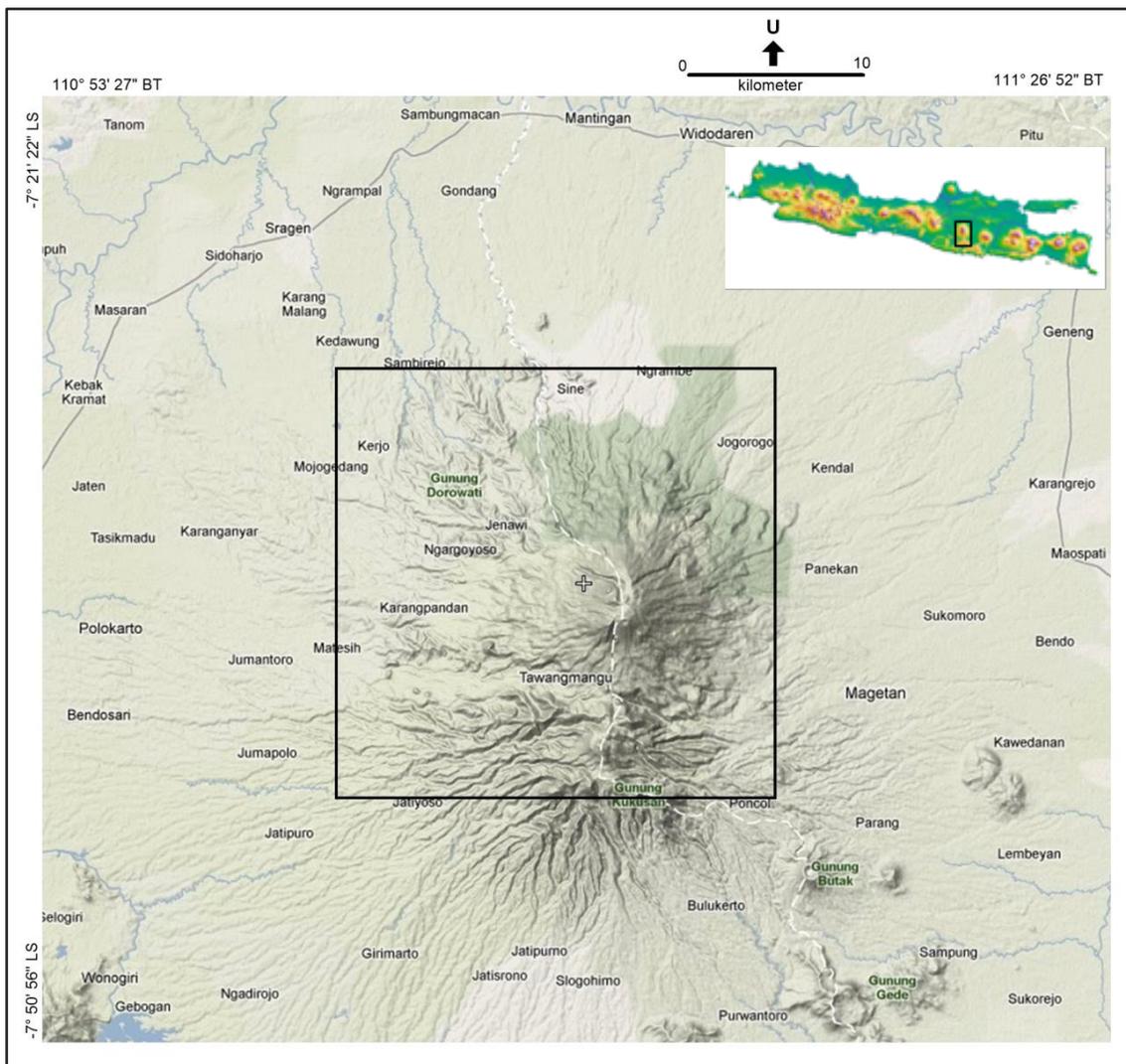
PENDAHULUAN

Pulau Jawa merupakan salah satu pulau di Indonesia yang terletak pada zona pertemuan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia. Pertemuan kedua lempeng tersebut mengakibatkan terjadinya aktivitas magmatik yang membentuk jalur gunungapi dari bagian barat sampai timur Pulau Jawa.

Aktivitas magmatik berperan dalam pembentukan sistem panas bumi sebagai sumber panas (*heat source*) yang memanasi air di kedalaman sehingga membentuk fluida panas di reservoir. Sumintadireja (2005) menyebutkan bahwa sistem panas bumi bertemperatur tinggi terletak di sepanjang zona vulkanik

punggungan pemekaran benua, di atas zona subduksi, dan di daerah anomali pelelehan dalam lempeng. Batas-batas pertemuan lempeng yang bergerak merupakan pusat lokasi kemunculan sistem hidrotermal magma. Salah satu hasil aktivitas magmatik di Pulau Jawa adalah pembentukan kerucut gunungapi Lawu.

Gunung Lawu merupakan suatu kerucut gunungapi yang terletak di perbatasan Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur. Pada lingkungan Gunung Lawu terdapat sejumlah pemunculan manifestasi panas bumi seperti fumarol, mata air panas, dan batuan ubahan yang mengindikasikan adanya suatu sistem panas bumi di kedalaman.



Gambar 1. Peta lokasi daerah panas bumi Gunung Lawu

Untuk memahami bagaimana hubungan antara aktivitas vulkanik Gunung Lawu dengan pembentukan sistem panas buminya, maka perlu dilakukan studi atau kajian vulkanostratigrafi sehingga karakteristik vulkanik Gunung Lawu dapat diketahui dan dipahami, untuk nantinya dapat digunakan sebagai data teknis dalam pengembangan panas bumi daerah tersebut.

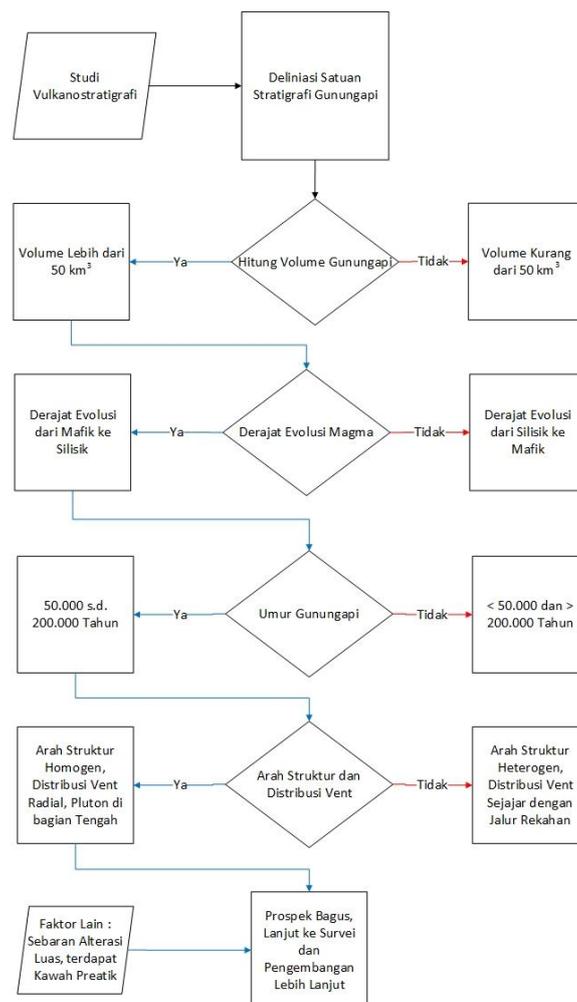
Davis (1973, dalam Wohletz & Heiken, 1992) menyatakan bahwa terdapat beberapa data geologi yang bisa dianalisis untuk mengetahui hubungan antara karakteristik vulkanik suatu gunungapi dengan pembentukan sistem panas bumi. Data tersebut antara lain; analisis topografi dan sebaran satuan stratigrafi gunungapi, pola struktur geologi, umur relatif batuan,

sebaran manifestasi panas bumi, dan analisis data geokimia.

Makalah ini akan membahas bagaimana karakteristik vulkanik Gunung Lawu dalam penentuan keprospeekan panas bumi, sehingga diharapkan dapat memberikan rekomendasi untuk pengembangan selanjutnya.

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam kajian ini meliputi studi vulkanostratigrafi untuk mengetahui karakteristik vulkanik Gunung Lawu dan pola struktur geologi yang terbentuk, dengan mengikuti konsep eksplorasi panas bumi berdasarkan Wohletz & Heiken (1992) seperti disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 2. Alur konsep eksplorasi dan evaluasi potensi panas bumi (modifikasi dari Wohletz & Heiken, 1992)

Dari Gambar 2 tersebut dapat dilihat bahwa parameter karakteristik gunungapi yang perlu untuk diketahui meliputi; sebaran atau distribusi batuan gunungapi berdasarkan dari sumber erupsinya, volume atau ukuran dari gunungapi, derajat evolusi dari komposisi magma pembentuk aktivitas vulkanik tersebut, umur vulkanisme termuda, dan pola struktur geologi yang terbentuk.

Kajian dilakukan dengan menentukan parameter-parameter karakteristik vulkanik Gunung Lawu yang meliputi sebaran atau distribusi batuan gunungapi, volume dan pola struktur geologi sebagai data primer, serta umur vulkanisme dan evolusi magma sebagai data sekunder.

Penentuan sebaran atau distribusi batuan gunungapi, dilakukan berdasarkan identifikasi satuan stratigrafi yang setara formasi yaitu khuluk dan satuan yang lebih kecil yaitu gumuk (Alessandro, dkk., 2013). Sandi Stratigrafi Indonesia Tahun 1996 menyatakan bahwa Khuluk gunungapi merupakan kumpulan batuan/ endapan yang dihasilkan oleh satu atau lebih titik erupsi yang membentuk satu tubuh gunungapi, sedangkan Gumuk gunungapi adalah bagian dari Khuluk yang terbentuk dari hasil suatu erupsi pada tubuh gunungapi tersebut, baik sebagai hasil erupsi pusat maupun erupsi samping. Identifikasi khuluk dan gumuk ini dilakukan pada peta topografi Bakosurtanal skala 1:25.000 Lembar Karangpandan, Ponco, Rambe dan Tawang Mangu.

Langkah pertama dalam mendelineasi satuan stratigrafi gunungapi adalah mengidentifikasi puncak tertinggi yang ditandai dengan struktur sirkular yang menunjukkan depresi kepundan, kaldera atau kawah untuk menentukan pusat erupsi utama ataupun sekunder. Pusat erupsi menjadi hal yang harus dikenali karena dengan demikian dapat diperkirakan ke mana arah penyebaran masing masing produk erupsi. Selanjutnya dilakukan analisis pola aliran sungai pada pola topografi yang menjorok ke arah pusat erupsi. Hal ini dilakukan untuk

mendapatkan gambaran umum pola struktur yang berkembang di daerah kajian berdasarkan analisis morfologi. Setelah analisis pola aliran sungai, kemudian dilakukan analisis kelurusan punggung yang ditandai dengan pola topografi yang menjauh dari pusat erupsi untuk melihat morfologi perbukitan.

Penentuan khuluk pada makalah ini dilakukan berdasarkan pola kontur dari kerucut gunung api yang berukuran besar dan terkenal di Indonesia. Sedangkan penentuan satuan gumuk dilakukan berdasarkan pola kontur kerucut gunung api yang berukuran kecil dan berada di sekitar khuluk. Khuluk dan gumuk yang telah teridentifikasi, dipisahkan berdasarkan batas vulkanostratigrafi yaitu ketika populasi punggung dan aliran sungai membentuk pola radial, maka dianggap berasal dari satu sumber yang sama (Van Zuidam, 1985).

Luas dari masing-masing khuluk yang telah teridentifikasi dan diketahui ketinggiannya, dapat digunakan untuk menghitung volume gunungapi dengan asumsi bentuk gunungapi berupa kerucut. Penghitungannya adalah dengan menggunakan rumus $\frac{1}{3} \times A \times h$, dimana A adalah luas alas gunung, dan h adalah tinggi (selisih antara elevasi puncak gunung dengan elevasi terendah gunung). Khuluk dengan volume $>50 \text{ km}^3$ menunjukkan bahwa khuluk tersebut kemungkinan memiliki dapur magma yang cukup besar, dan bisa berperan sebagai sumber panas dalam suatu sistem panas bumi (Wohletz & Heiken, 1992).

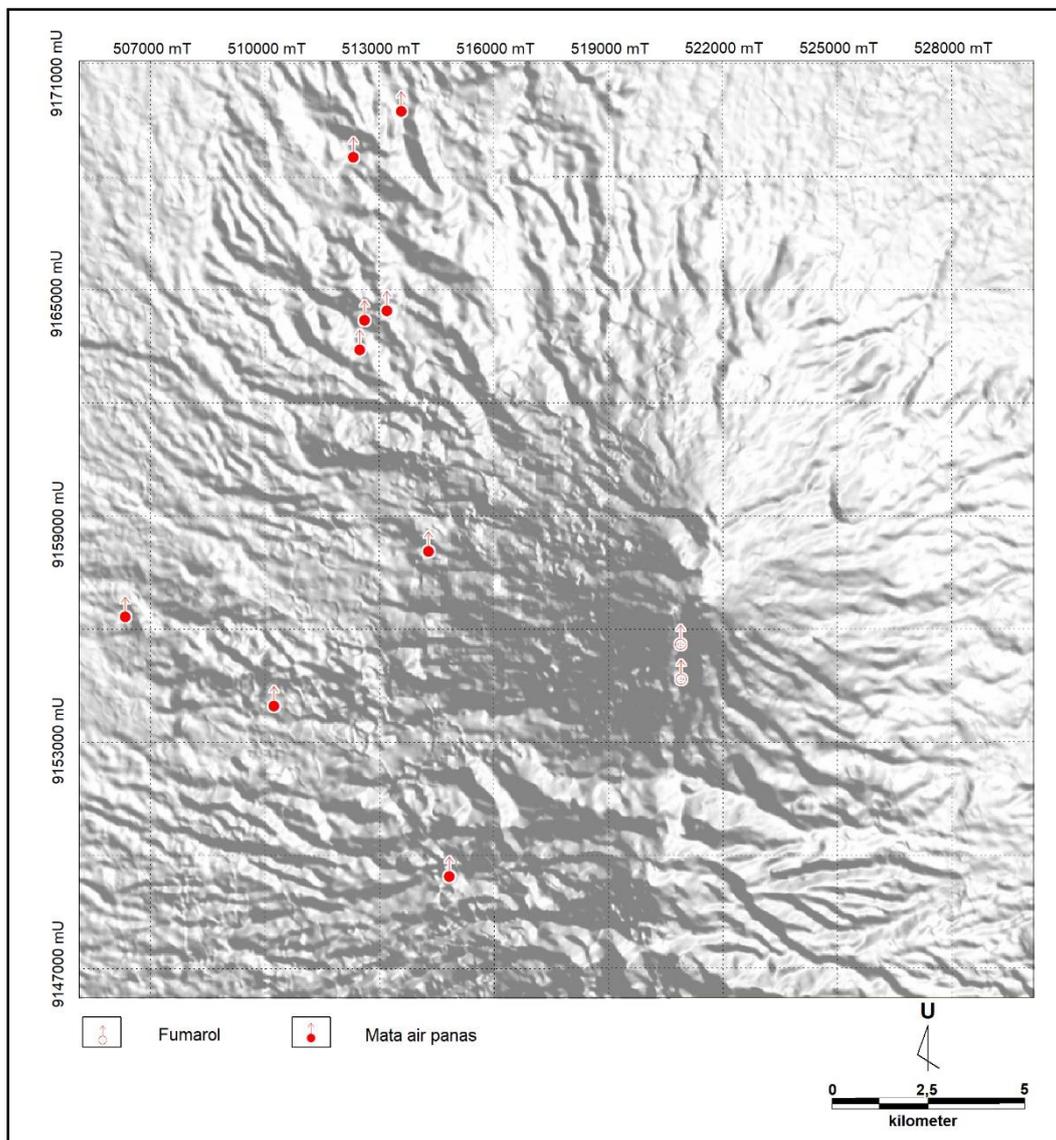
Derajat evolusi magma dan umur vulkanisme diketahui dari data terdahulu berdasarkan penelitian Badan Geologi tahun 2009, yang telah melakukan pemetaan geologi rinci di daerah panas bumi Gunung Lawu.

Pola struktur geologi dan distribusi *vent* dibuat melalui analisis kelurusan pada citra *Digital Elevation Model* (DEM) (Gambar 3). Hung *et al.*, (2005) menyatakan bahwa suatu kelurusan dapat berupa aliran yang

lurus dan lembah, permukaan yang lurus, perubahan tonal tanah, kelurusan daerah vegetasi, perubahan dari perbedaan tipe vegetasi dan ketinggian, atau perbedaan topografi yang kontras. Semua fenomena ini kemungkinan hasil dari fenomena struktur, seperti; sesar (patahan), kekar, lipatan dan rekahan.

Pada penelitian ini kelurusan ditarik berdasarkan kesamaan pola pada citra DEM secara manual berupa garis. Pola yang dimaksud adalah susunan yang teratur mengenai kenampakan geologi, topografi dan vegetasi (Ray, 1960 dalam

Soetoto, 1996). Misalnya pola garis lurus menunjukkan adanya kekar, sesar, dan ketidakselarasan. Arah dari kelurusan ini kemudian diklasifikasikan ke dalam arah umum kelurusan pada diagram Roset, sehingga diketahui arah umum dari kelurusan atau struktur geologi yang terbentuk (Hermawan dan Rezky, 2011). Setelah itu dilakukan penghitungan panjang kelurusan tiap 1 km² untuk mendapatkan peta kerapatan patahan dan rekahan (*fault and fracture density map*), dengan unit yang diperoleh adalah km/km² (Soengkono, 1999).



Gambar 3. Citra DEM resolusi 90m daerah panas bumi Gunung Lawu (<http://srtm.csi.cgiar.org>)

GEOLOGI GUNUNG LAWU

Hasil pemetaan geologi di daerah panas bumi Gunung Lawu yang dilakukan oleh Anonim (2009) menyebutkan bahwa batuan tertua yang ada di daerah kajian adalah batulempung berumur Miosen Awal. Pada Kala Miosen Tengah terjadi aktivitas magmatik yang membentuk batuan intrusi berkomposisi andesit. Kemudian pada Kala Miosen Akhir-Pliosen terjadi proses sedimentasi yang menyebabkan terbentuknya satuan batugamping. Aktivitas tektonik regional pada Kala Pliosen-Plistosen memicu terjadinya kegiatan vulkanik yang membentuk batuan vulkanik Gunung Jobolarangan (Lawu Tua) yang terdiri dari lava berkomposisi andesit-basaltik dan batuan piroklastik yang bersifat asam (silisik). Selanjutnya aktivitas vulkanik berpindah ke sebelah utara yang ditandai dengan pembentukan batuan vulkanik Gunung Lawu Muda berkomposisi andesit-basaltik yang membentuk morfologi Gunung Lawu sekarang. Setelah fase erupsi Gunung Lawu yang membentuk batuan piroklastik, aktivitas vulkanik Gunung Lawu berakhir dengan pembentukan kubah lava muda berkomposisi andesit-basaltik di puncak Gunung Lawu dan kerucut-kerucut Gunung Purung dan Gunung Anak berkomposisi andesit yang merupakan produk erupsi samping. Proses erosi yang berlangsung sampai saat ini menghasilkan endapan lahar dan aluvium seperti yang banyak terdapat di sepanjang pedataran dan sungai-sungai besar. Manifestasi di daerah panas bumi Gunung Lawu muncul di lereng selatan berupa fumarol dan mata air panas dengan temperatur sekitar 90°C, serta batuan ubahan bertipe argilik hingga argilik lanjut, dan tersebar luas di kaki barat dan baratlaut Gunung Lawu berupa mata air panas dengan temperatur 32°C hingga 40°C.

HASIL ANALISIS

Dari peta vulkanostratigrafi daerah panas bumi Gunung Lawu (Gambar 4), dapat dilihat bahwa terdapat tiga bentukan

topografi kawah yaitu satu di puncak Gunung Lawu dan dua kawah di puncak Gunung Jobolarangan. Bentuk kawah ini dapat diperkirakan sebagai pusat erupsi utama dari aktivitas vulkanik yang terjadi di daerah kajian. Dari bentukan kawah ini dapat diperkirakan adanya dua pusat vulkanisme yang berbeda, yaitu vulkanisme Lawu dan vulkanisme Jobolarangan. Hal ini sesuai dengan hasil pemetaan Anonim (2009) yang menyatakan bahwa secara umum terdapat dua periode vulkanisme yang berbeda, yaitu vulkanisme Jobolarangan (Lawu Tua) dan vulkanisme Lawu Muda.

Hasil deliniasi satuan stratigrafi vulkanik menunjukkan bahwa daerah kajian disusun oleh dua khuluk, yaitu Khuluk Jobolarangan dan Khuluk Lawu.

Khuluk Lawu tersebar di bagian utara, barat, timur, sampai tengah dengan luas sebaran sekitar 75% dari luas daerah kajian. Pola aliran sungai pada Khuluk Lawu ini umumnya berpola radial mengarah ke puncak Gunung Lawu. Di dalam Khuluk Lawu teridentifikasi beberapa bentukan gumuk yaitu Gumuk Purung, Gumuk Pablengan, Gumuk Kemuning, Gumuk Kresno, Gumuk Sidomukti, dan Gumuk Anak.

Gumuk Purung terletak di sebelah baratdaya lereng Gunung Lawu dengan pola kontur membentuk suatu topografi kerucut soliter. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Purung ini disusun oleh batuan lava andesit Gunung Purung yang merupakan produk dari erupsi samping.

Gumuk Pablengan terletak di sebelah baratdaya Khuluk Lawu atau di sebelah barat Gumuk Purung dengan pola kontur membentuk perbukitan memanjang di daerah sekitar Pablengan. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Pablengan ini disusun oleh batuan piroklastik tua produk dari Gunung Jobolarangan. Pada Gumuk

Pablengan terdapat pemunculan manifestasi panas bumi berupa mata air panas Pablengan dengan temperatur 36°C.

Gumuk Kemuning terletak di sebelah barat lereng Gunung Lawu yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang membentuk suatu perbukitan soliter. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Kemuning ini disusun oleh batuan lava basalt Ceto yang merupakan produk dari erupsi samping.

Gumuk Kresno terletak di sebelah barataut lereng Gunung Lawu yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah baratlaut - tenggara. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Kresno ini disusun oleh batuan aliran piroklastik Gunung Lawu. Pada Gumuk Kresno terdapat pemunculan manifestasi panas bumi berupa mata air panas Ngunut dan Jenawi dengan temperatur 32°C hingga 40°C.

Gumuk Sidomukti terletak di sebelah timur Gumuk Kresno yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah baratlaut-tenggara. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Sidomukti ini disusun oleh batuan aliran piroklastik Gunung Lawu. Pada Gumuk Sidomukti terdapat pemunculan manifestasi panas bumi berupa mata air panas Bayanan dengan temperatur 40°C.

Gumuk Anak terletak di sebelah timur lereng Gunung Lawu yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah baratdaya-timurlaut. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Anak ini disusun oleh batuan lava andesit Gunung Anak yang merupakan produk dari erupsi samping.

Di lereng selatan Khuluk Lawu terdapat pemunculan manifestasi panas bumi yang

berupa fumarol dan mata air panas dengan temperatur sekitar 90°C, serta batuan ubahan (Anonim, 2009).

Khuluk Jobolarangan terdapat di bagian selatan dengan luas sebaran sekitar 25% dari luas daerah kajian yang terdiri dari empat gumuk yaitu Gumuk Cemorowayang, Gumuk Siatang, Gumuk Kukusan, dan Gumuk Mongkrang (Gambar 4). Pola aliran sungai pada Khuluk Jobolarangan ini di bagian puncak dan lereng umumnya berpola radial mengarah ke puncak Gunung Jobolarangan, sedangkan di bagian pedatarannya berpola dendritik sampai sub dendritik. Pada Khuluk Jobolarangan teridentifikasi dua bentuk kawah di bagian puncak Gunung Jobolarangan dan Gunung Mongkrang, yang diperkirakan merupakan pusat erupsi utama vulkanisme Gunung Jobolarangan. Kawah di puncak Gunung Mongkrang diperkirakan merupakan pusat erupsi dari vulkanisme Gunung Mongkrang yang membentuk Gumuk Mongkrang.

Gumuk Cemorowayang terletak di sebelah barataut lereng Gunung Jobolarangan yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah barat-timur. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Cemorowayang ini dominan disusun oleh batuan aliran piroklastik Gunung Jobolarangan. Pada Gumuk Cemorowayang terdapat pemunculan manifestasi panas bumi berupa mataair panas Tasin dengan temperatur sebesar 40°C.

Gumuk Siatang terletak di sebelah selatan lereng Gunung Jobolarangan yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah baratdaya - timurlaut. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Siatang ini dominan disusun oleh batuan lava dan aliran piroklastik Gunung Jobolarangan.

Gumuk Kukusan terletak di sebelah selatan lereng Gunung Jobolarangan yang

diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah baratdaya - timurlaut. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Kukusan ini dominan disusun oleh batuan lava dan aliran piroklastik Gunung Jobolarangan.

Gumuk Mongkrang terletak di sebelah utara dan timur lereng Gunung Jobolarangan yang diidentifikasi berdasarkan adanya pola kontur yang memanjang berarah barat-timur. Apabila dibandingkan dengan Peta Geologi Daerah Panas Bumi Gunung Lawu (Anonim, 2009), Gumuk Mongkrang ini dominan disusun oleh batuan aliran piroklastik Gunung Jobolarangan.

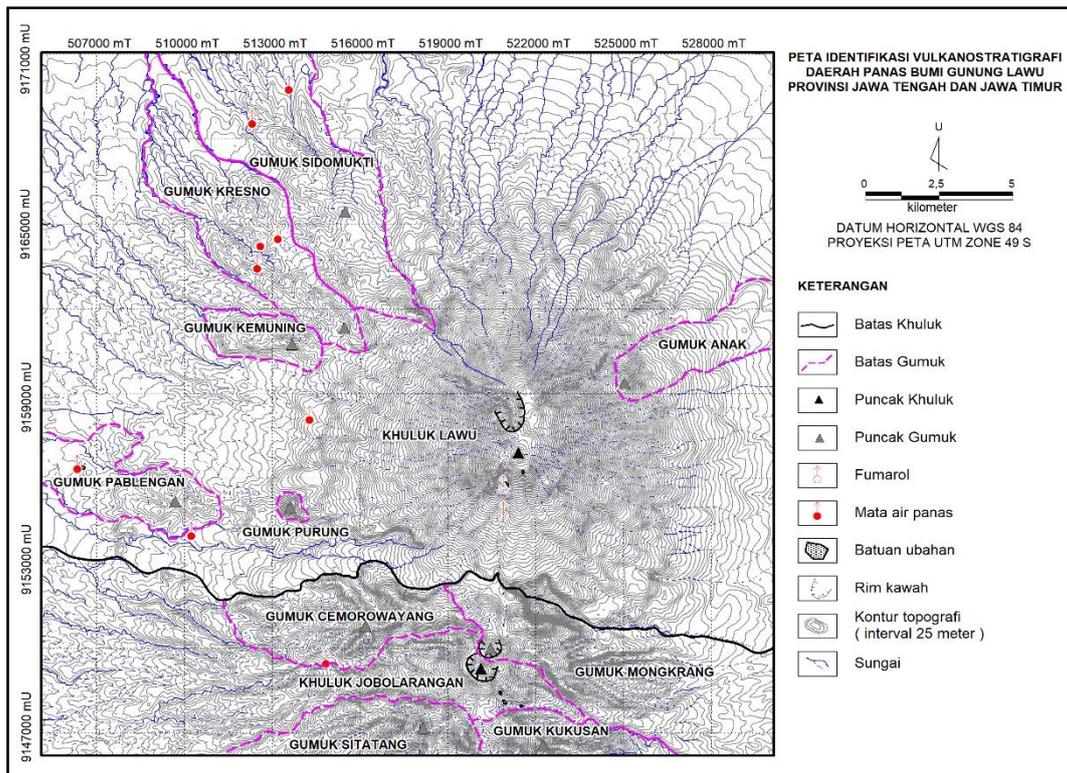
Dari peta vulkanostratigrafi daerah panas bumi Gunung Lawu (Gambar 4) dapat terlihat bahwa morfologi khuluk yang masih memperlihatkan suatu bentuk kerucut gunungapi yang relatif baik adalah Khuluk Lawu. Hal ini bisa dilihat dari morfologinya yang halus yang menunjukkan tingkat erosi yang belum intensif dengan pola aliran sungai yang masih terlihat jelas radial ke arah puncak. Bentuk kerucut yang relatif masih baik yang ditunjang dengan keterdapatan struktur sirkular yang merupakan bentuk kawah/kaldera di bagian puncak, menunjukkan bahwa di bawah Gunung Lawu kemungkinan terdapat *magma chamber* atau dapur magma yang berpotensi masih menyimpan panas yang dibutuhkan untuk membentuk suatu sistem panas bumi. Sedangkan morfologi Khuluk Jobolarangan menunjukkan suatu morfologi bentuk kerucut yang kasar, dikarenakan telah mengalami deformasi dan tingkat erosi yang intensif. Hal tersebut menunjukkan bahwa Khuluk Jobolarangan ini terbentuk lebih tua dibandingkan dengan Khuluk Lawu, sehingga dapur magma di bawah Gunung Jobolarangan diperkirakan telah mendingin dan kurang prospek untuk

membentuk sistem panas bumi yang baik. Hal ini didukung oleh data sebaran pemunculan manifestasi panas bumi di permukaan, yang menunjukkan bahwa pemunculan manifestasi lebih intensif di Khuluk Lawu dibandingkan dengan di Khuluk Jobolarangan. Oleh karena itu dalam analisis dan pembahasan selanjutnya yang akan dibahas terbatas hanya pada Khuluk Lawu.

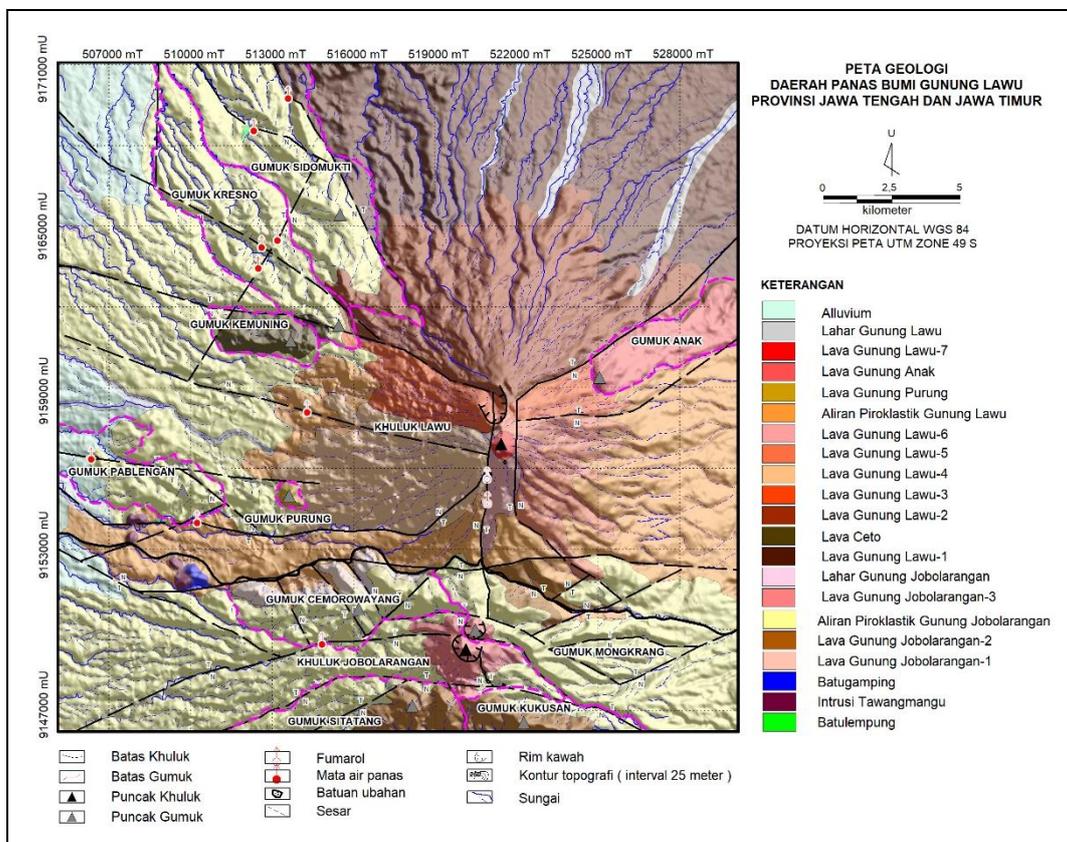
Hasil delineasi Khuluk Lawu menunjukkan diameter Khuluk sebesar 20 km (jari-jari 10 km), dengan elevasi puncak tertinggi 3200 mdpl, dan elevasi terendah 200 m. Dari parameter-parameter tersebut, diperoleh ukuran atau volume Gunung Lawu sebesar $\pm 300 \text{ km}^3$.

Pemetaan geologi yang dilakukan Badan Geologi tahun 2009 (Gambar 5), menunjukkan bahwa batuan vulkanik penyusun daerah kajian mengalami evolusi dari batuan vulkanik berkomposisi magma silisik ke arah *mafik*, dengan batuan termuda berupa kubah lava di puncak Gunung Lawu berkomposisi andesit-basaltik. Data pentarikan umur batuan dengan metode pentarikan radiometrik (Anonim, 2009), menunjukkan bahwa batuan vulkanik termuda berumur $0,2 \pm 0,1$ juta tahun atau sekitar 200 ribu tahun.

Berdasarkan kesamaan pola pada citra DEM, ditarik garis-garis kelurusan yang menunjukkan perkiraan kelurusan patahan dan rekahan (Gambar 6). Garis-garis kelurusan ini kemudian dimasukkan ke dalam Diagram Roset (Gambar 7), untuk diklasifikasikan arah umum dari kelurusan tersebut. Dari Gambar 7 tersebut diketahui bahwa arah kelurusan yang terbentuk di daerah Gunung Lawu relatif homogen, dengan arah dominan barat-laut-tenggara ($N 290^\circ/E$). Distribusi atau sebaran *vent* relatif radial atau memusat ke arah puncak, sehingga diperkirakan dapur magma terdapat di bawah puncak Gunung Lawu.



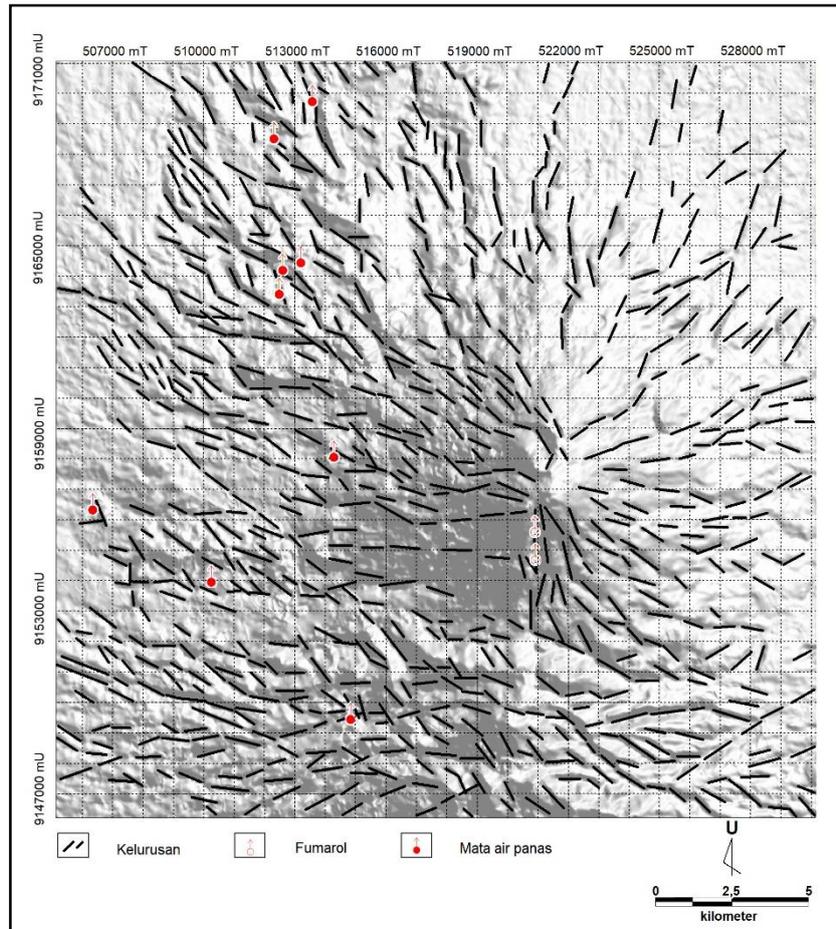
Gambar 4. Peta identifikasi vulkanostratigrafi daerah panas bumi Gunung Lawu



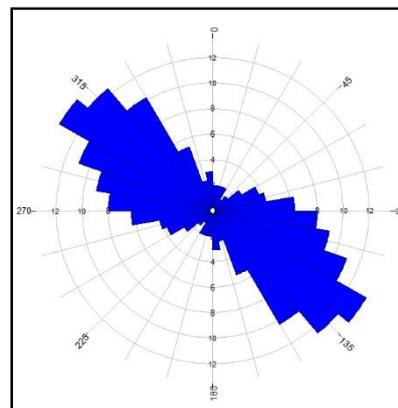
Gambar 5. Peta geologi daerah panas bumi Gunung Lawu (modifikasi dari Anonim, 2009) dikompilasikan dengan hasil identifikasi vulkanostratigrafi

Untuk mengetahui intensitas kerapatan patahan dan rekahan yang terbentuk, dilakukan penghitungan panjang kelurusan-kelurusan tersebut tiap 1 km², sehingga menghasilkan peta kerapatan patahan dan rekahan (Gambar 8). Dari peta tersebut dapat dilihat bahwa intensitas tinggi kerapatan dan rekahan ditunjukkan oleh nilai kerapatan lebih besar dari 2,25

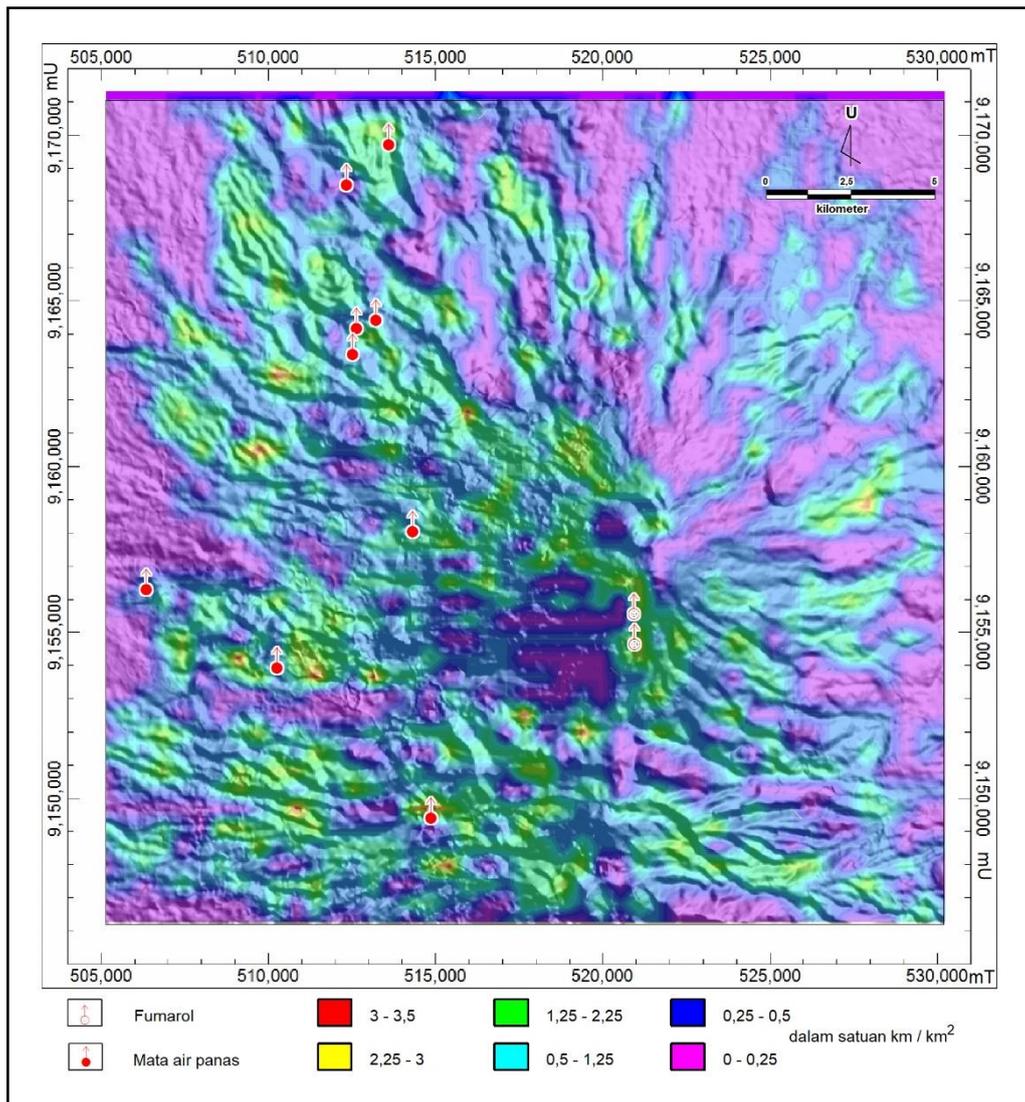
km/km², yang dominan tersebar di lereng selatan dan barat Gunung Lawu, terutama di sekitar pemunculan manifestasi panas bumi, sedangkan intensitas rendah – sedang dengan nilai kerapatan kurang dari 2,25 km/km² tersebar di bagian utara dan timur daerah kajian.



Gambar 6. Peta kelurusan daerah panas bumi Gunung Lawu



Gambar 7. Arah kelurusan di daerah panas bumi Gunung Lawu



Gambar 8. Peta kerapatan patahan dan rekahan daerah panas bumi Gunung Lawu

PEMBAHASAN

Kajian vulkanostratigrafi (Gambar 9) menunjukkan Gunung Lawu memiliki dimensi atau volume gunungapi lebih besar dari 50 km³ (yaitu sebesar 300 km³), sehingga diperkirakan memiliki dapur magma cukup besar sebagai sumber panas yang menyuplai panas ke reservoir di kedalaman.

Hasil pemetaan geologi yang dilakukan Anonim (2009) menyatakan bahwa produk awal vulkanisme Gunung Lawu adalah berupa batuan lava dan piroklastik berkomposisi andesitik hingga silisik (asam), yang kemudian diakhiri dengan pembentukan kubah lava di puncak

Gunung Lawu berkomposisi andesit-basaltik. Hal ini menunjukkan bahwa telah terjadi evolusi magma pada vulkanisme Gunung Lawu, berupa perubahan komposisi magma dari bersifat silisik (asam) menuju mafik (andesitik). Komposisi batuan seperti ini umum ditemukan pada zona subduksi termasuk di Indonesia. Meskipun menurut Wohletz & Heiken (1992) batuan dengan komposisi andesitik diasumsikan kurang prospek untuk pengembangan panas bumi, akan tetapi apabila vulkanismenya berada di zona subduksi pada tatanan aktif margin seperti Gunung Lawu ini, maka diperkirakan masih memiliki prospek yang baik. Sebagai contoh adalah vulkanisme Gunung Salak yang juga memiliki komposisi magma

andesitik yang sudah terbukti bisa membentuk lapangan panas bumi Awibengkok-Gunung Salak yang telah berproduksi (Hulen and Anderson, 1998).

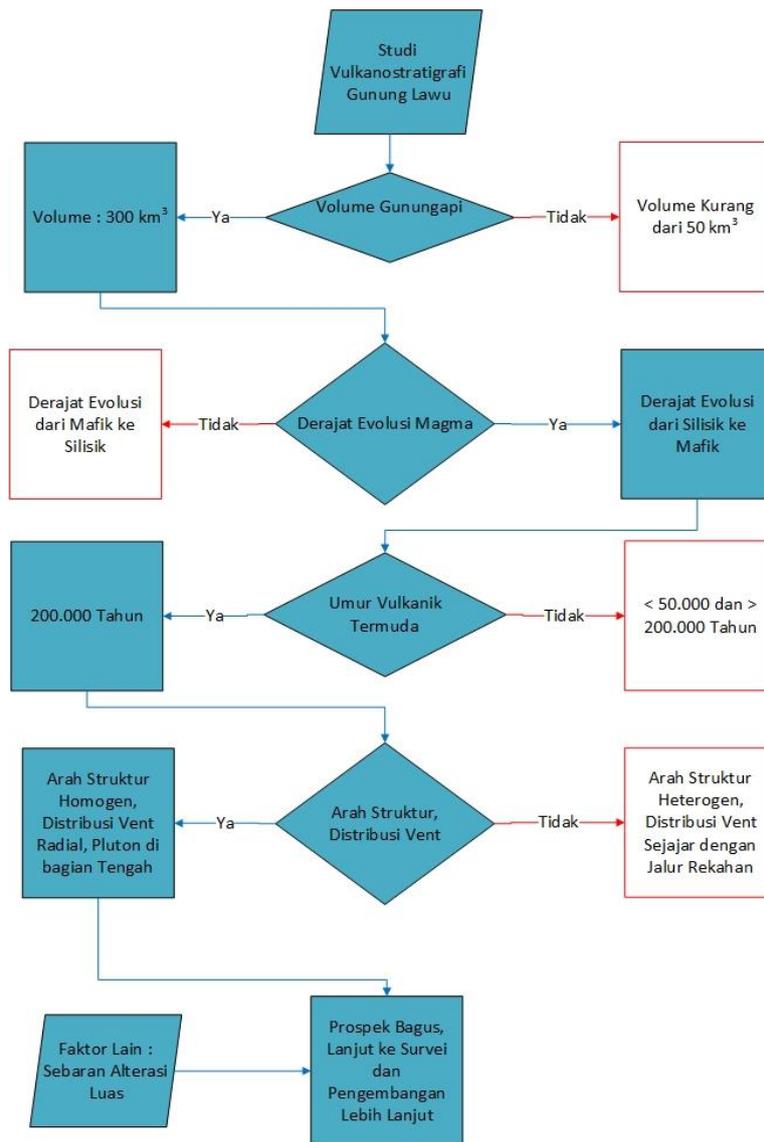
Aktivitas vulkanik termuda Gunung Lawu memiliki umur yang masih cukup muda dan berada pada kisaran umur batuan ideal yaitu sekitar 200 ribu tahun (Anonim, 2009), yang diperkirakan masih menyimpan panas yang memadai untuk membentuk resevoir panas bumi bertemperatur tinggi, serta bisa menjaga keberlangsungan transfer atau perpindahan panas dari sumber panas ke reservoir untuk membentuk sistem panas bumi yang matang (*mature*).

Pola struktur geologi menunjukkan arah struktur yang homogen dengan distribusi *vent* radial yang mengindikasikan magmatisme berpusat di bawah kerucut termuda Gunung Lawu sehingga akumulasi panas dari *heat source* terkumpul di bagian tersebut. Intensitas kerapatan patahan dan rekahan tinggi yang tersebar di lereng barat dan selatan Gunung Lawu menunjukkan bahwa daerah tersebut memiliki permeabilitas tinggi yang berpotensi sebagai zona *recharge* atau *discharge* di permukaan, maupun sebagai zona reservoir di kedalaman.

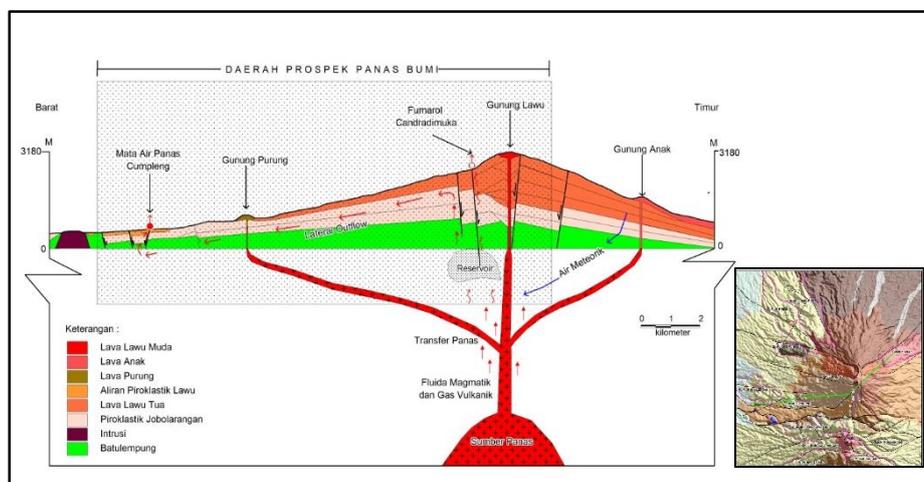
Pemunculan manifestasi fumarol di lereng selatan Gunung Lawu menunjukkan adanya fluida reservoir di bawah manifestasi tersebut, yang kemudian mengalir secara lateral mengikuti elevasi membentuk manifestasi air panas di lereng barat Gunung Lawu (Gambar 10). Dari

gambar tersebut dapat dilihat bahwa sumber panas berasal dari dapur magma di bawah kerucut Gunung Lawu. Fluida magmatik dan gas-gas vulkanik dari tubuh magma berinteraksi dengan air meteorik di kedalaman membentuk zona reservoir pada batuan permeabel. Fluida panas berupa uap dan gas naik ke permukaan sepanjang jalur rekahan membentuk manifestasi fumarol pada elevasi tinggi. Sedangkan fluida panas berupa air mengalir secara lateral mengikuti elevasi kemudian muncul di permukaan sebagai mata air panas pada kaki Gunung Lawu. Aliran lateral fluida panas yang hanya mengarah ke lereng barat Gunung Lawu menunjukkan bahwa lereng barat tersebut relatif memiliki permeabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan bagian lereng yang lain. Hal ini didukung juga dengan sebaran *vent* yang lebih dominan di lereng bagian barat yang ditunjukkan oleh banyaknya bentukan satuan gumuk yang terbentuk di permukaan serta tingginya intensitas kerapatan patahan dan rekahan pada lereng barat tersebut.

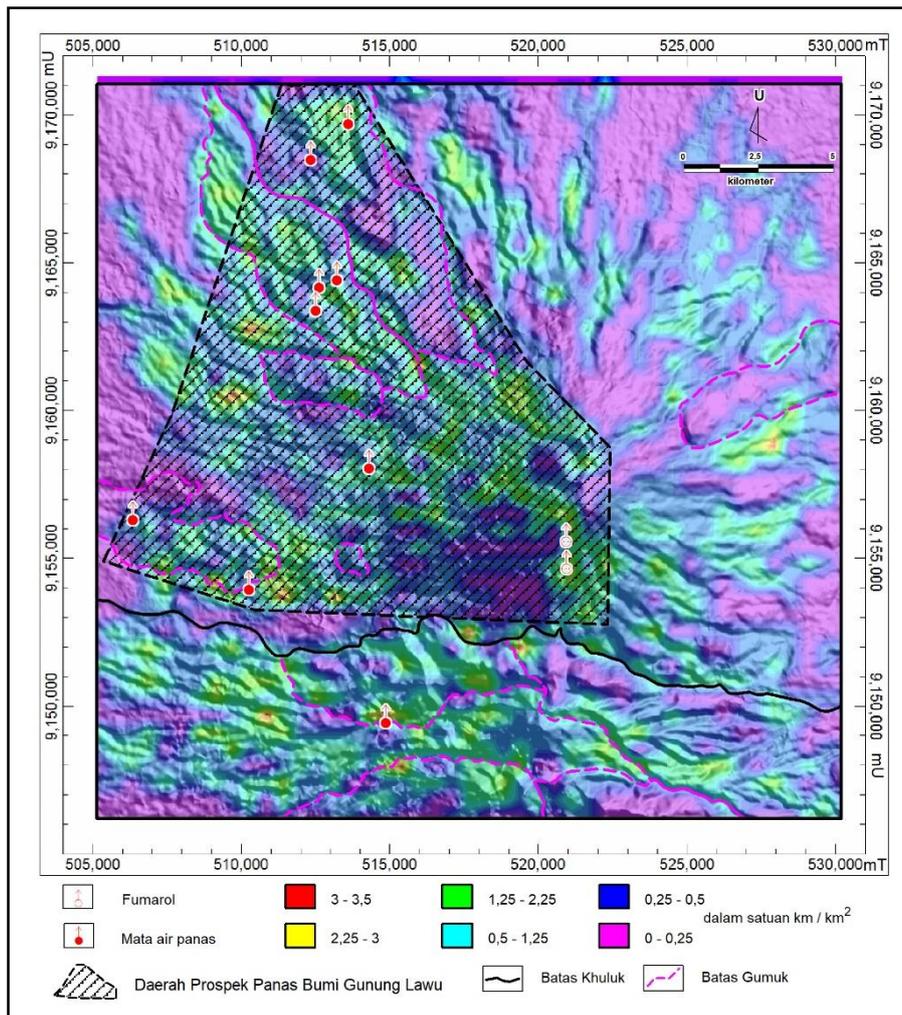
Untuk mengetahui daerah yang memiliki prospek untuk dikembangkan, maka dilakukanlah kompilasi dari hasil identifikasi vulkanostratigrafi, pola struktur geologi, dan sebaran manifestasi panas bumi dalam bentuk peta kompilasi (Gambar 11). Dari peta tersebut dapat diketahui bahwa daerah yang memiliki prospek untuk dikembangkan dan diteliti lebih lanjut adalah di lereng selatan dan barat Gunung Lawu.



Gambar 9. Alur proses kajian vulkanostratigrafi Gunung Lawu berdasarkan konsep eksplorasi panas bumi (modifikasi dari Wohletz & Heiken, 1992)



Gambar 10. Penampang vulkanostratigrafi Gunung Lawu dan hubungannya dengan sistem panas bumi Gunung Lawu



Gambar 11. Peta daerah prospek panas bumi Gunung Lawu

KESIMPULAN

Kajian karakteristik vulkanik menunjukkan bahwa Gunung Lawu memiliki ukuran atau volume cukup besar, yang mengindikasikan adanya suatu volume magma yang cukup besar di kedalaman dengan fungsi sebagai penyuplai panas dalam sistem panas bumi. Umur vulkanisme termuda Gunung Lawu berada dalam kisaran umur ideal, sehingga panas yang ditransfer dapat membentuk suatu sistem panas bumi yang matang (*mature*). Selain itu intensitas kerapatan patahan dan rekahan yang tinggi juga memungkinkan terbentuknya suatu zona permeabilitas yang baik sebagai zona reservoir. Hal ini didukung juga oleh luasnya sebaran manifestasi panas bumi seperti

pemunculan manifestasi fumarol dan mata air panas, serta batuan ubahan. Dengan karakteristik tersebut, maka daerah panas bumi Gunung Lawu diperkirakan memiliki prospek panas bumi yang menarik untuk dikembangkan dan perlu diteliti lebih lanjut, terutama pada lereng selatan dan barat Gunung Lawu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami ucapkan kepada rekan-rekan di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang telah memberikan masukan, dan tim editor/*reviewer* yang telah mengoreksi dan memberikan saran dalam penyusunan makalah ini. Serta kepada dewan redaksi yang telah memberikan kesempatan sehingga makalah ini dapat diterbitkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alessandro, P., Amatullah, B., Asnin, SN., Regandara, R., Azka, G., Hermawan, D., Prihadi, AS., 2013. Geothermal Potential of Mount Malabar Based on Volcanostratigraphy Study, *Proceedings ITB International Geothermal Workshop, 2013*.
- Anonim, 1996. Sandi Stratigrafi Indonesia Edisi 1996. Jakarta: IAGI
- Anonim, 2009. Laporan Survei Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Gunung Lawu, Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung (*unpublished report*)
- Hermawan, Dudi., dan Rezky, Yuanno., 2011. Delineasi Daerah Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kelurusan Citra Landsat Di Candi Umbul Telomoyo, Provinsi Jawa Tengah, Buletin Sumber Daya Geologi Volume 6 No13-2011 ISSN 1907-5367).
- <http://srtm.csi.cgiar.org>, diakses tanggal 29 November 2017.
- Hulen and Anderson., 1998. The Awibengkok, Indonesia, Geothermal Research Project, *Proceedings Twenty-third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.
- Hung LQ, Batelaan O, De Smedt F. 2005. Lineament Extraction and Analysis, comparison of Landsat ETM and ASTER imagery. Case study : Suoimuoi Tropical Karst Catchment, Vietnam. *Proceedings of SPIE Vol. 5983*.
- Soetoto, 1996. Interpretasi Citra untuk Survei Geologi, PUSPICS, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Soengkono, S., 1999. Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assessment of Geothermal System, *Proceeding 21st New Zealand Geothermal Workshop (1999b)*.
- Sumintadireja, P., 2005. Vulkanologi dan Geotermal. Departemen Teknik Geologi, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral, Institut Teknologi Bandung.
- Van Zuidam, R.A. 1985. Aerial Photo Interpretation in Terrain Analysis and Geomorphological Mapping. *Smits Publisher, The Hague*.
- Wohletz, Kenneth dan Heiken, Grant. 1992. *Volcanology and Geothermal Energy. Los Angeles : University of California Press*.

Diterima	: 29 Oktober 2018
Direvisi	: 9 September 2018
Disetujui	: 30 November 2018

EVALUASI CADANGAN MUNGKIN UNTUK SISTEM PANAS BUMI VULKANIK DENGAN METODE VOLUMETRIK: STUDI AREA KAMOJANG DAN LAHENDONG**EVALUATION OF GEOTHERMAL POSSIBLE RESERVES FOR VOLCANIC GEOTHERMAL SYSTEM USING VOLUMETRIC METHOD: AREA OF STUDY IN KAMOJANG AND LAHENDONG****Lia Putriyana**

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
lia.putriyana@gmail.com

ABSTRAK

Di Indonesia perkiraan sumber daya didasarkan pada SNI 13-6482-2000 mengenai Angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi di Indonesia. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi cadangan mungkin panas bumi menggunakan metode *Volumetric – heat stored* dengan simulasi Monte Carlo untuk memperoleh probabilitas dari parameter-parameter yang memiliki tingkat ketidakpastian. Studi ini menggunakan analogi lapangan eksisting Kamojang dan Lahendong, yang berada pada jalur vulkanik yang sama dan memiliki kemiripan tatanan geologi, sehingga karakteristik reservoirnya tidak berbeda jauh. Empat parameter yang dibahas untuk mengevaluasi perhitungan cadangan mungkin adalah saturasi air, porositas batuan, *recovery factor* dan faktor konversi listrik. Hasil perhitungan cadangan mungkin untuk lapangan dominasi air yang diusulkan sebesar 152,73 MW, sedangkan yang menggunakan SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW. Hasil perhitungan untuk lapangan dominasi uap yang diusulkan sebesar 53,62 MW, perbedaan nilainya sangat signifikan dengan hasil perhitungan cadangan mungkin menggunakan SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW.

Kata kunci: Evaluasi cadangan mungkin, Sistem panas bumi vulkanik, Metode volumetric – heat stored

ABSTRACT

Indonesia is blessed with a huge geothermal energy potential up to 29 GW, which is distributed in 331 areas, mostly associated with volcanic environment. In Indonesia, resource estimation is based on Indonesian Nasional Standard (SNI-13-6482-2000). This study reviews the possible reserves estimation, Volumetric – heat stored is preferred method on initial stage exploration. The Volumetric – heat stored is proposed to be combined with Monte Carlo Simulation to obtain the probability distribution for several uncertain parameters. Using analogy of existing fields, Kamojang and Lahendong, represent other volcanic geothermal systems in Indonesia, due to the same volcanic path and identic geological setting, so that their reservoir characteristics are considered not so different. Four parameters have been researched are water saturation, rock porosity, recovery factor and electricity conversion factor. The result of possible reserve estimation for water dominated geothermal field based on proposed value is 152.73 MW, while based on SNI 13-6482-2000 is 152.07 MW. For vapor dominated geothermal field it is 53.62 MW, this result is significantly different to the estimation based on SNI 13-6482-2000 which is 152.07 MW.

Keywords: *Reviews of possible reserves, Volcanic geothermal system, Volumetric –heat stored method*

PENDAHULUAN

Melalui Kebijakan Energi Nasional, pemerintah menetapkan target bauran energi primer yang akan dicapai pada tahun 2025 sebesar 23% dari total proyeksi kebutuhan energi, artinya 45.044 MW ditargetkan akan dipenuhi dari pembangkit listrik energi baru terbarukan (EBT). Terdapat kurang lebih 29 GW total potensi energi panas bumi, hingga Desember 2017 namun baru termanfaatkan sebesar 1.808,5 MW. Tabel 1 memperlihatkan sebaran potensi energi panas bumi Indonesia yang telah disesuaikan dengan SNI 6009:2017 mengenai Klasifikasi sumber daya dan cadangan energi panas bumi Indonesia (Badan Standardisasi Nasional. SNI 6009-2017).

Klasifikasi Sumber Daya Panas Bumi

Klasifikasi sumber daya dan cadangan energi panas bumi di Indonesia berdasarkan tahapan penyelidikan yang mencakup penyelidikan geologi, geokimia, geofisika, teknik reservoir, dan estimasi kesetaraan listrik, telah disusun dalam SNI 6009:2017. Alur kegiatan penyelidikan dan pengembangan panas bumi seperti yang terlihat pada Gambar 1. Sumber daya (*resource*) adalah bagian dari potensi energi yang diharapkan dapat dimanfaatkan, sementara cadangan (*reserve*) adalah bagian dari sumber daya energi yang telah diketahui dimensi, sebaran kuantitas dan kualitasnya, yang telah dikaji dan dinyatakan layak untuk dieksplorasi. Sumber daya panas bumi dibagi dalam dua kelas yaitu kelas sumber daya spekulatif dan hipotesis. Cadangan panas bumi diketahui dari hasil penyelidikan rinci dan dibagi menjadi tiga

kelas yaitu kelas mungkin, terduga, dan terbukti.

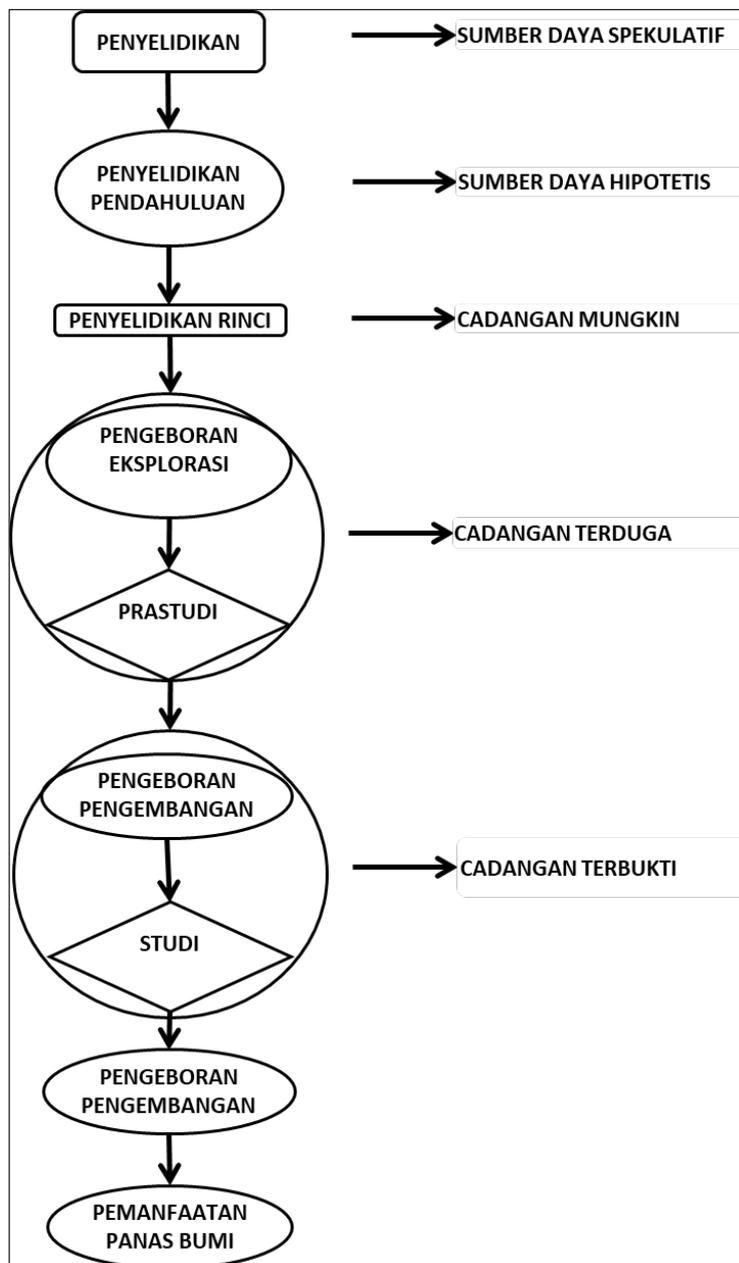
Cadangan mungkin panas bumi dihitung dengan menggunakan metode volumetrik – *heat stored* untuk mengetahui jumlah panas yang tersimpan dalam batuan dan fluida, kemudian memperkirakan seberapa besar panas yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Metode volumetrik – *heat stored* digunakan untuk memperkirakan potensi panas bumi pada saat belum tersedianya data pemboran sumur. Seiring dengan berjalannya tahapan proses pengusahaan panas bumi, penambahan data akan meningkatkan kepastian potensi panas bumi dan metode yang digunakan bukan lagi metode volumetrik – *heat stored* melainkan model numerik karena tingkat akurasi lebih baik. Metode volumetrik – *heat stored* memiliki kelemahan karena tingkat kepastian yang rendah, seringkali perkiraan potensi panas bumi terlalu besar dikarenakan banyaknya parameter yang diasumsikan. Hasil perkiraan potensi panas bumi akan dijadikan acuan dalam penyusunan Kebijakan Energi Nasional (KEN), oleh karena itu tingkat nilai potensi energi panas bumi setidaknya dapat mewakili kondisi sebenarnya, dalam artian lebih rasional dengan kondisi teknologi dan ekonomi saat ini. Studi ini dilakukan untuk meningkatkan validitas estimasi potensi energi panas bumi, berdasarkan hipotesa awal kelemahan metode dan angka parameter untuk perhitungan sumber daya panas bumi di Indonesia yang terdapat dalam SNI13-6482-2000 mengenai Angka Parameter Dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi yang memiliki kelemahan dalam pengasumsian angka parameter yang digunakan

Tabel 1. Sebaran potensi energi panas bumi per Desember 2017

No.	Pulau	Jumlah Lokasi	Sumber Daya, MWe		Cadangan, MWe			Terpasang, MWe
			Spekulatif	Hipotetis	Mungkin	Terduga	Terbukti	
1	Sumatera	98	2817	1917	5065	930	917	452
2	Jawa	73	1410	1689	3949	1373	1865	1224
3	Bali	6	70	22	122	110	30	0
4	Nusa Tenggara	28	225	395	901	0	15	12,5

No.	Pulau	Jumlah Lokasi	Sumber Daya, MWe		Cadangan, MWe			Terpasang, MWe
			Spekulatif	Hipotetis	Mungkin	Terduga	Terbukti	
5	Kalimantan	14	152	17	13	0	0	0
6	Sulawesi	87	1308	325	1248	80	140	120
7	Maluku	33	560	91	677	0	0	0
8	Papua	3	75	0	0	0	0	0
Total		342	6617	4456	11975	2493	2967	1808,5
			11073		17435			

Sumber : Peta Distribusi Daerah dan Potensi Panas Bumi Indonesia. Badan Geologi Kementerian ESDM



Gambar 1. Alur kegiatan penyelidikan dan pengembangan panas bumi, telah disesuaikan dengan SNI 6009:2017

METODE

Studi ini bersifat *desk study* mengenai evaluasi perhitungan cadangan mungkin panas bumi di Indonesia dibatasi pada sistem panas bumi vulkanik mengingat 12 lapangan panas bumi yang sudah dikembangkan keseluruhannya merupakan sistem panas bumi vulkanik. Evaluasi hanya dilakukan pada nilai cadangan mungkin panas bumi hasil perhitungan dengan acuan SNI 13-6482-2000 mengenai Angka Parameter Dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi (Badan Standardisasi Nasional. SNI 13-6482-2000). Perkiraan cadangan mungkin panas bumi dilakukan dengan menggunakan asumsi beberapa nilai parameter mengingat keterbatasan data pada tahap awal penyelidikan pendahuluan dan penyelidikan pendahuluan lanjutan. Nilai parameter yang digunakan pada SNI 13-6482-2000 dievaluasi dengan cara membandingkan dengan nilai parameter pada lapangan panas bumi yang sudah dikembangkan, sehingga diharapkan dapat diperoleh nilai yang lebih rasional untuk menghitung cadangan mungkin panas bumi dan dapat menghindari *over estimation*.

Evaluasi cadangan mungkin panas bumi dilakukan dengan mencari lapangan pembanding yang sesuai dengan kondisi lapangan panas bumi di Indonesia pada umumnya. Lapangan panas bumi Kamojang yang merupakan sistem panas bumi vulkanik dominasi uap dan Lahendong yang merupakan sistem panas bumi dominasi air, akan dijadikan studi area. Pemilihan dua lapangan tersebut dapat mewakili kondisi lapangan panas bumi system vulkanik lainnya yang berada di Indonesia karena berada pada jalur vulkanik yang sama dan memiliki kemiripan tatanan geologi, sehingga karakteristik reservoirnya tidak berbeda jauh.

Metode volumetrik – *heat stored* banyak digunakan oleh industri panas bumi. Metode volumetrik – *heat stored*

merupakan metode yang konsisten untuk diaplikasikan dalam perhitungan cadangan pada tahap awal eksplorasi (Sarmiento, Z.F. and G. Björnsson., 2007). Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh *United State of Geological Survey*, dalam perkembangannya mengalami beberapa penyesuaian sesuai dengan perkembangan teknologi dan ekonomi. Metode volumetrik – *heat stored* menghitung energi panas yang tersimpan pada batuan dan fluida reservoir baik berupa air maupun uap, total dari energi panas tersebut kemudian dihitung konversi menjadi energi listrik.

Berdasarkan SNI 13-6482-2000 mengenai Angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi, energi panas yang tersimpan dalam batuan dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_r = A \cdot h \cdot (1 - \varphi) \cdot \rho_r \cdot c_r \quad (1)$$

Dimana:

- Q_r : energi panas dalam batuan, kJ
- A : luas area prospek, m²
- h : ketebalan, m
- φ : porositas, %
- ρ_r : densitas batuan, kg/m³
- c_r : kapasitas panas batuan, kJ/kg.°C

Energi panas yang tersimpan dalam fluida reservoir dapat berupa air atau uap, atau campuran keduanya. Jumlah air atau uap yang terkandung dalam reservoir digambarkan sebagai nilai saturasi uap (S_v) atau saturasi air (S_w). Energi panas air yang terkandung dalam reservoir dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_w = A \cdot h \cdot \varphi \cdot \rho_w \cdot S_w \cdot (h_{wi} - h_{wf}) \quad (2)$$

Dimana:

- Q_w : energi panas dalam fluida, kJ
- ρ_w : densitas air, kg/m³
- h_{wi} : enthalpy fluida initial, kJ/kg
- h_{wf} : enthalpy fluida final, kJ/kg

Sedangkan persamaan untuk menghitung energi panas uap yang terkandung dalam reservoir adalah:

$$Q_v = A \cdot h \cdot \phi \cdot \rho_v \cdot (1 - S_w) \cdot (h_{wi} - h_{wf}) \quad (3)$$

Dimana:

Q_v : energi panas dalam uap, kJ
 ρ_v : densitas uap, kg/m³

Sehingga total energi panas yang terkandung pada reservoir adalah:

$$Q_t = Q_r + Q_w + Q_v \quad (4)$$

Energi listrik dihitung dengan mengkonversi total energi panas yang terkandung dalam reservoir (Q_t)

$$Q_e = \frac{Q_t \cdot R_f \cdot C_e}{\eta \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 1000} \quad (5)$$

Dimana:

R_f : *recovery factor*, %
 C_e : faktor konversi, %

Studi ini membahas mengenai sistem panas bumi vulkanik yang memiliki karakteristik temperatur tinggi, sehingga nilai parameter pada SNI 13-6482-2000 yang akan dibahas yaitu nilai parameter untuk perhitungan cadangan mungkin pada lapangan bertemperatur tinggi (>225°C) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai parameter untuk perhitungan cadangan mungkin energi panas bumi

Parameter	Nilai
Saturasi air (%)	100
Porositas batuan (%)	10
Kapasitas panas batuan, kJ/kg.°C	1
Densitas batuan, kg/m ³	2,5 x 10 ³
Umur pembangkitan (tahun)	30
Faktor konversi, %	10

Sumber (SNI 13-6482-2000)

Angka-angka parameter pada kelas cadangan mungkin ini ditentukan dengan pertimbangan sebagai berikut:

- 1) Saturasi air 100 % karena fluida dalam reservoir dianggap jenuh air, dengan anggapan bahwa lapangan panas bumi tersebut adalah dominasi air.
- 2) Porositas batuan didasarkan kepada hasil rata-rata pengukuran porositas batuan vulkanik di beberapa lapangan panas bumi.

- 3) Kapasitas panas batuan ditentukan berdasarkan asumsi.
- 4) Densitas batuan ditentukan berdasarkan hasil pengukuran dari batuan ubahan di lapangan panas bumi.
- 5) Umur pembangkitan listrik ditentukan berdasarkan pada lama waktu (umur) pembangkitan listrik.
- 6) Faktor konversi listrik ditentukan berdasarkan kemungkinan kehilangan energi panas setelah ditransfer ke dalam energi listrik.

Nilai *recovery factor* dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$R_f = \frac{T_i - T_f}{T_i - T_s} \times 100 \quad (6)$$

Dimana:

T_i : Temperatur awal, °C
 T_f : Temperatur akhir, °C
 T_s : Temperatur permukaan, °C

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa parameter yang digunakan dalam memperkirakan cadangan mungkin panas bumi memiliki tingkat ketidakpastian yang sangat tinggi seringkali menyebabkan estimasi cadangan mungkin yang berlebihan. Beberapa parameter tersebut antara lain;

1. Saturasi air
2. Porositas batuan
3. *Recovery factor*
4. Faktor konversi listrik

Saturasi air

Fluida reservoir pada lapangan dominasi uap Kamojang memiliki saturasi air sebesar 25-30% yang dibuktikan dari jumlah air yang keluar dari sumur produksi dengan demikian nilai saturasi uap sebesar 70 – 75% (Utami, P., 2000). Pada lapangan panas bumi dominasi air berlaku sebaliknya, nilai saturasi air yang terkandung dalam reservoir sebanyak 70% dengan jumlah uap sebanyak 30%.

Porositas batuan

Nilai porositas menggambarkan kemampuan batuan untuk menyimpan fluida, porositas dapat terukur dengan data

core hasil pemboran. Pada tahap penyelidikan rinci belum terdapat sumur pemboran sehingga nilai porositas merupakan nilai yang diasumsikan, namun asumsi yang digunakan harus memiliki dasar yang kuat. Pada studi ini nilai porositas diwakili dari dua lapangan panas bumi dengan sistem vulkanik, yang mewakili kondisi sistem panas bumi di Indonesia pada umumnya. Lapangan Kamojang merupakan sistem panas bumi vulkanik dominasi uap. Porositas reservoir yang terdiri dari batuan basaltic andesite berkisar 4-7% (Sudarman, dkk., 1995). Lapangan Lahendong merupakan sistem panas bumi vulkanik dominasi air. Porositas reservoir yang terdiri dari beberapa formasi batuan berkisar 10-22% (Yani, A., 2006).

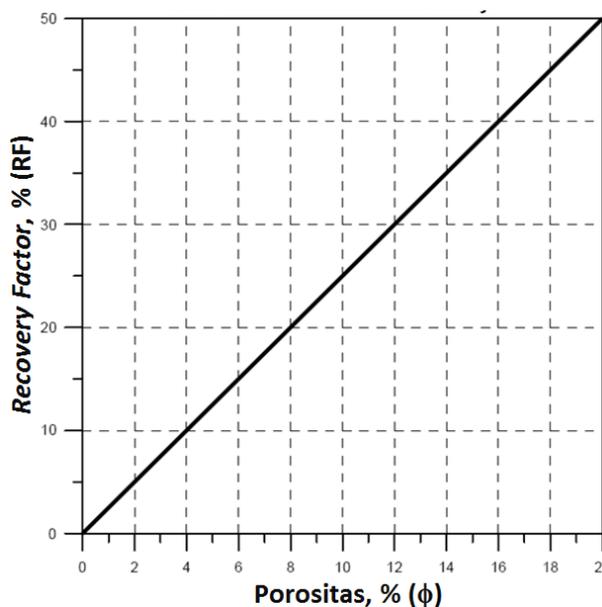
Recovery factor

Nilai *recovery factor* menggambarkan seberapa besar energi yang dapat diambil dari reservoir panas bumi. Nilai tersebut memiliki korelasi terhadap permeabilitas dan porositas reservoir, dengan sistem panas bumi yang berbeda akan memiliki nilai *recovery factor* yang berbeda (L.J.P. Muffler). Nilai *recovery factor* diketahui dengan memplotkan nilai porositas terhadap garis korelasi seperti yang terlihat pada Gambar 2.

Lapangan panas bumi dominasi uap dengan nilai porositas berkisar 4-7% memiliki nilai *recovery factor* antara 10-17,5%, sedangkan untuk lapangan panas bumi dominasi air dengan porositas berkisar 10-22% memiliki nilai *recovery factor* antara 25-50%. Semakin besar nilai *recovery factor* yang digunakan akan berpengaruh pada jumlah potensi panas bumi hasil perhitungan.

Faktor Konversi Listrik

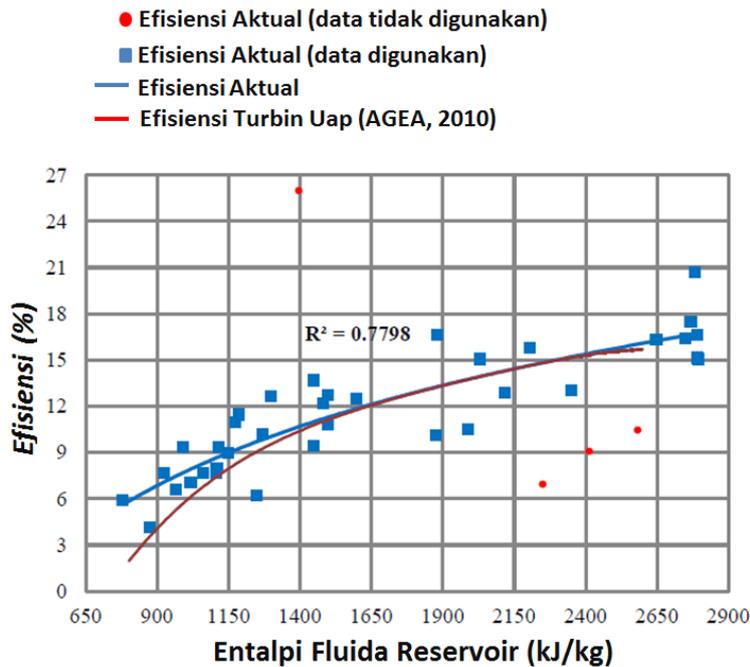
Secara keseluruhan faktor konversi listrik dipengaruhi oleh beberapa parameter antara lain desain pembangkit, kandungan Non Condensable Gas (NCG), kondisi ambient, dan lain-lain (Moon, H., dan Zarrouk, S.J., 2012). Secara umum jenis pembangkit yang digunakan pada sistem panas bumi vulkanik dominasi uap adalah *single flash*, sedangkan dominasi air menggunakan jenis pembangkit *double flash*. Gambar 3 dan Gambar 4 menunjukkan nilai faktor konversi listrik berdasarkan jenis pembangkit dan temperatur fluida reservoir, selama ini SNI 13-6482-2000 mengenai Angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi menyatakan nilai faktor konversi listrik sebesar 10% tanpa mempertimbangkan jenis pembangkit yang digunakan.



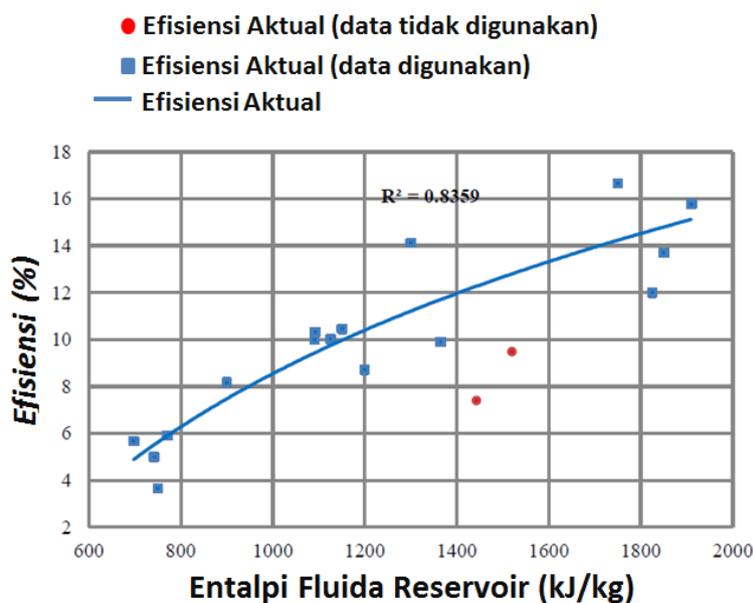
Gambar 2. Korelasi nilai *recovery factor* teoritis dan porositas
 Sumber (Muffler, 1978)

Gambar 3 menunjukkan korelasi *enthalpy* fluida reservoir dengan faktor konversi listrik untuk pembangkit *Single Flash* dan *Dry Steam* yang sesuai digunakan untuk lapangan panas bumi dominasi uap. *Enthalpy* fluida reservoir pada tahap penyelidikan rinci diketahui dari hasil perhitungan Geothermometer untuk memperkirakan temperatur fluida reservoir.

Gambar 4 menunjukkan korelasi *enthalpy* fluida reservoir dengan faktor konversi listrik untuk pembangkit tipe *Double Flash* yang sesuai digunakan pada lapangan panas bumi dominasi air. *Enthalpy* fluida reservoir pada tahap penyelidikan rinci diketahui dari hasil perhitungan Geothermometer untuk memperkirakan temperatur fluida reservoir.



Gambar 3. Korelasi enthalpy reservoir dengan efisiensi (faktor konversi listrik) untuk tipe Single Flash dan Dry Steam. *Sumber (Moon, H., and Zarrouk, S.J., 2012)*



Gambar 4. Korelasi enthalpy reservoir dan efisiensi (faktor konversi listrik) untuk tipe Double Flash. *Sumber (Moon, H., and Zarrouk, S.J., 2012)*

Tabel 3. Perbandingan nilai parameter untuk perhitungan cadangan mungkin energi panas bumi

Parameter	SNI	Usulan	
		Dom. Uap	Dom. Air
Saturasi air, %	100	30	70
Porositas batuan, %	10	4 – 7	10 - 22
<i>Recovery factor</i> , %	50	10 – 17,5	25 - 50
Faktor konversi, %	10	15 - 18	10 - 12

Berdasarkan pembahasan sebelumnya mengenai parameter saturasi air dan uap, porositas batuan, *recovery factor* dan faktor konversi listrik, maka diusulkan nilai parameter-parameter seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Untuk menghitung cadangan mungkin panas bumi dengan metode volumetrik dimana terdapat beberapa parameter dengan rentang nilai tertentu digunakan simulasi Monte Carlo yaitu metode statistik probabilistik untuk menghitung beberapa parameter yang memiliki nilai minimum, *most likely* dan maksimum (Geyer, C.J., 2010). Perhitungan ini dilakukan secara berulang-ulang (iterasi) untuk mendapatkan fungsi probabilitas dan fungsi distribusi parameter. Langkah-langkah simulasi Monte Carlo sebagai berikut:

1. Menetapkan distribusi probabilitas untuk variabel-variabel utama
2. Menetapkan distribusi kumulatif untuk setiap variabel
3. Menentukan interval dari bilangan-bilangan acak untuk setiap variabel
4. Membuat bilangan random
5. Menjalankan simulasi dari rangkaian percobaan

Fungsi distribusi yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo disesuaikan dengan nilai parameter yang disebutkan pada Tabel 3. Nilai parameter yang memiliki rentang minimum, *most likely* dan maksimum menggunakan fungsi distribusi segitiga, sedangkan nilai parameter yang

hanya memiliki rentang minimum dan maksimum menggunakan fungsi distribusi segiempat. Beberapa parameter berikut nilainya diasumsikan yaitu:

- Luas area prospek, A : 10,15 dan 20 km²
- Ketebalan reservoir, h : 500, 750, 1000 m
- Densitas batuan, ρ_r : 2.700 kg/m³
- Kapasitas panas batuan, c_r : 1 kJ/kg.°C

Untuk lapangan dominasi air

- Saturasi air, S_w : 70 kg/m³
- Saturasi uap, S_v : 30 kg/m³
- Temperatur awal, T_i : 250 °C
- Temperatur akhir, T_f : 180 °C

Untuk lapangan dominasi uap

- Saturasi air, S_w : 30 kg/m³
- Saturasi uap, S_v : 70 kg/m³
- Temperatur awal, T_i : 240 °C
- Temperatur akhir, T_f : 180 °C

Fungsi distribusi yang digunakan dalam simulasi Monte Carlo disesuaikan dengan nilai parameter yang disebutkan pada Tabel 3. Nilai parameter yang memiliki rentang minimum, *most likely* dan maksimum menggunakan fungsi distribusi segitiga, sedangkan nilai parameter yang hanya memiliki rentang minimum dan maksimum menggunakan fungsi distribusi segiempat.

Area prospek dan ketebalan reservoir yang diperoleh langsung dari hasil pengukuran menggunakan distribusi segitiga. Sedangkan nilai porositas, *recovery factor*

dan faktor konversi listrik yang hanya memiliki rentang nilai minimum dan maksimum menggunakan fungsi distribusi segiempat. Berikut merupakan hasil

perhitungan menggunakan simulasi Monte Carlo dengan menggunakan angka parameter SNI dan usulan seperti yang tertera pada (Tabel 3).

Tabel 4. Perhitungan menggunakan angka parameter SNI 13-6482-2000

	Min	Max	Most	
Area (sq-km) =	10	20	15	
Thickness (m) =	500	1000	750	P 10 = 83,84 MW
Rock Dens. (kg/cu-m) =	2500			P 50 = 114,82 MW
Porosity (fract) =	10%			P 90 = 152,07 MW
Rock Heat Cap. (kJ/(kg.deg-C)) =	1			
Life Time (years) =	30			
RF (fract) =	0,5			
Elect. Eff. (fract) =	0,1			
Ti (deg-C) =	250			
Tf (deg-C) =	180			
Water Sat. Init. (fract) =	100%			
Water Sat. Fina. (fract) =	10%			

Tabel 5. Perhitungan menggunakan angka parameter usulan untuk lapangan dominasi air

	Min	Max	Most	
Area (sq-km) =	10	20	15	
Thickness (m) =	500	1000	750	P 10 = 67,77 MW
Rock Dens. (kg/cu-m) =	2500			P 50 = 104,39 MW
Porosity (fract) =	10%	22%		P 90 = 152,73 MW
Rock Heat Cap. (kJ/(kg.deg-C)) =	1			
Life Time (years) =	30			
RF (fract) =	0,25	0,5		
Elect. Eff. (fract) =	0,1	0,12		
Ti (deg-C) =	250			
Tf (deg-C) =	180			
Water Sat. Init. (fract) =	70%			
Water Sat. Fina. (fract) =	10%			

Tabel 6. Perhitungan menggunakan angka parameter usulan untuk lapangan dominasi uap

	Min	Max	Most	
Area (sq-km) =	10	20	15	
Thickness (m) =	500	1000	750	P 10 = 25,84 MW
Rock Dens. (kg/cu-m) =	2500			P 50 = 37,93 MW
Porosity (fract) =	4%	7%		P 90 = 53,62 MW
Rock Heat Cap. (kJ/(kg.deg-C)) =	1			
Life Time (years) =	30			
RF (fract) =	0,1	0,175		
Elect. Eff. (fract) =	0,15	0,18		
Ti (deg-C) =	240			
Tf (deg-C) =	180			
Water Sat. Init. (fract) =	30%			
Water Sat. Fina. (fract) =	10%			

HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi Monte Carlo dengan menggunakan angka parameter yang tertera pada SNI 13-6482-2000 menghasilkan perkiraan cadangan mungkin pada tingkat probabilitas 90 sebesar 152,07 MW seperti yang terlihat pada Tabel 4. Simulasi Monte Carlo dengan menggunakan angka parameter usulan untuk lapangan panas bumi dominasi air sesuai dengan referensi yang dapat mewakili kondisi sistem panas bumi vulkanik tipe dominasi air yang ada di Indonesia, didapatkan perkiraan cadangan mungkin hasil perhitungan pada tingkat probabilitas 90 sebesar 152,73 MW seperti yang terlihat pada Tabel 5. Sedangkan untuk lapangan panas bumi dominasi uap sesuai dengan referensi yang dapat mewakili kondisi sistem panas bumi vulkanik tipe dominasi uap yang ada di Indonesia, perkiraan cadangan mungkin hasil perhitungan pada tingkat probabilitas 90 sebesar 53,62 MW seperti yang terlihat pada Tabel 6.

Terlihat perbedaan yang sangat signifikan antara hasil perhitungan dengan menggunakan angka acuan pada SNI 13-6482-2000 dengan hasil perhitungan cadangan mungkin untuk lapangan panas bumi dominasi uap, hal ini dikarenakan nilai porositas dan *recovery factor* pada lapangan panas bumi dominasi uap sangat kecil. Hal ini perlu untuk dipertimbangkan dalam perhitungan cadangan mungkin panas bumi, mengingat keterbatasan data pada tahap survei pendahuluan, untuk menghindari *over estimation* nilai cadangan mungkin yang didapatkan.

Untuk memudahkan dalam membedakan tipe lapangan panas bumi pada tahap studi pendahuluan dilakukan dengan mengamati manifestasi yang ada pada suatu lapangan. Untuk lapangan dominasi air, manifestasi permukaan yang umumnya ditemukan berupa mata air panas dengan debit yang relatif besar, sedangkan untuk lapangan dominasi uap, manifestasi permukaan yang umumnya ditemukan berupa *fumarola*, *solfatara* dan / atau *mud*

pool (kolam lumpur). Hal ini dilakukan guna menghindari *over estimation* dalam perkiraan cadangan mungkin panas bumi.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan cadangan mungkin dengan angka parameter usulan untuk lapangan dominasi air sebesar 152,73 MW, nilai ini tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan cadangan mungkin SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW yang selama ini digunakan sebagai acuan penyusunan kebijakan. Sedangkan hasil perhitungan cadangan mungkin dengan angka parameter usulan untuk lapangan dominasi uap sebesar 53,62 MW, perbedaan nilainya sangat signifikan dengan hasil perhitungan cadangan mungkin SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW yang selama ini digunakan sebagai acuan penyusunan kebijakan.

SARAN/REKOMENDASI

Revisi terhadap acuan angka parameter dalam estimasi potensi panas bumi yang tercantum di SNI 13-6482-2000 perlu dilakukan berdasarkan hasil pada karya tulis ilmiah ini untuk menghindari perkiraan berlebih yang dapat berpengaruh terhadap Kebijakan Energi Nasional terutama penetapan target pemanfaatan energi panas bumi dalam bauran energi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis sampaikan untuk Badan Geologi dan Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral atas data-data yang sudah dipublikasikan.

DAFTAR ACUAN

- Badan Standardisasi Nasional. SNI 6009-2017: Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia. Indonesia, 2017.
- Badan Geologi Kementerian ESDM. Data Sebaran Potensi Panas Bumi di Indonesia, Indonesia, 2017.

- Badan Standarisasi Nasional. SNI 13-5012-1998: Klasifikasi Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia. Indonesia, 1999.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 13-6482-2000: Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*, 2000.
- Sarmiento, Z.F. and, and G. Björnsson., 2007. "Geothermal Resources Assessment -Volumetric Reserves Estimation and Numerical Modelling." El Salvador.
- L.J.P. Muffler. "Assessment of Geothermal Resources of the United States-1978". Geological Survey Circular 790. U.S. Geological Survey.
- Utami, P., 2000. "Characteristics of The Kamojang Geothermal Reservoir (West Java) as Revealed by Its Hydrothermal Alteration Mineralogy". In *Proceedings of World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28- June 10, 2000*. pp. 1921 – 1926.
- Sudarman, dkk., 1995. "Kamojang Geothermal Field 10 Year Operation Experience". In *Proceedings of World Geothermal Congress*, Florence.
- Yani, A., 2006. "Numerical Modelling of Lahendong Geothermal System, Indonesia". Geothermal Training Programme, number 24, page 547-580. Reykjavik, Iceland.
- Moon, H., dan Zarrouk, S.J., 2012. "Efficiency of Geothermal Power Plants: A Worldwide Review". In *Proceedings of New Zealand Geothermal Workshop 19 – 21 November 2012. New Zealand*.
- Geyer, C.J., 2010. "Computation for the Introduction to MCMC chapter of Handbook of Markov Chain Monte Carlo". Technical Report 679, School of Statistics, University of Minnesota.

Diterima	: 30 Agustus 2018
Direvisi	: 9 Oktober 2018
Disetujui	: 30 November 2018

UCAPAN TERIMA KASIH

Dewan Redaksi dalam kesempatan ini mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para editor dan mitra bestari atas kerjasama yang baik dalam proses *review* lima buah artikel untuk edisi ketiga. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya untuk edisi ini, antara lain DR. Ir. Agus Didit Haryanto, M.Sc, DR. Ir. Dicky Muslim, M.Sc, Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T dan Edi Suhanto, S.Si, M.T

Kami juga mengucapkan terimakasih kepada semua unsur Dewan Redaksi atas usaha yang sangat baik dalam menyelesaikan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.13 Nomor.3 Tahun 2018. Semoga hadirnya Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat umum dalam bentuk cetakan maupun digital secara *on line* dapat memberikan informasi yang bermanfaat tentang metode eksplorasi, analisis conto, pengolahan data dan potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 13 Nomor 3 Tahun 2018

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Ahmad Zarkasyi
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: zarkasyiahmad@gmail.com

Dewi Gentana
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: dewigentana06@gmail.com

Dudi Hermawan
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: dudi.hermawan@esdm.go.id

Emi Sukiyah
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: emi.sukiyah@unpad.ac.id

Euis T. Yuningsih
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: etintiny@yahoo.com

Fiandri I. Rinawan
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: irfiandri@gmail.com

Iqbal Takodama
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: iqbal.takodama@esdm.go.id

Lano Aditya Permana
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: lano.adp@gmail.com

Lia Putriyana
Pusat Penelitian dan Pengembangan
Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru
Terbarukan dan Konservasi Energi
Email: lia.putriyana@gmail.com

Mega F. Rosana
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: mega.fatimah.rosana@unpad.ac.id

Mochammad Nur Hadi
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: mochamadnurhadi@gmail.com

Mohammad N. Heriawan
Fakultas Teknik Pertambangan dan
Perminyakan, ITB
Email: heriawan@mining.itb.ac.id

Nana Sulaksana
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: n.sulaksana@unpad.ac.id

Ratna Dewi
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: ratna.de1807@yahoo.com

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 13 Nomor 3 Tahun 2018

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

- 2-D inversion 141
 Active Constraint Balancing 141, 142, 146
 Analisis korelasi 155, 157, 159, 162
 Dunit 155-162, 174
 Evaluasi cadangan mungkin 215, 217-219, 221, 223, 225
 Geothermal system 141, 198, 199, 213, 215, 225
 Gunung Lawu 199-213
 Harzburgit 155, 157-160, 162, 174
 Himpunan Mineral Alterasi 177, 178, 180, 184-186, 191, 194-197
 Magnetotelluric method 141, 153
 Metode volumetric – heat stored 215
 Panas Bumi 141-145, 147, 148, 151-151, 177-182, 194, 198-213, 215-225
 Petrografi 159, 160, 177, 178, 181, 182, 185, 186, 191, 194, 195, 197
 Profil laterit nikel 155-157, 159-161, 170
 Prospek 141, 142, 148, 152, 153, 156, 199, 206, 209, 210, 212, 213, 218, 222
 Resistivity 141
 Sistem panas bumi 141, 142, 145, 152, 153, 178, 199-201, 206, 210-212, 215, 217-221, 223-225
 Sistem panas bumi vulkanik 215, 217-221, 224, 225
 Sumatera 153, 177, 216
 Ultrabasa 155-157, 174
 Unsur *major-minor* 155
 Vulkanisme 199, 202, 204, 205, 209, 212
 Vulcanostratigrafi 199, 201, 202, 204, 206, 207, 209-211
 Wapsalit 141-145, 147, 148, 150-154
 XRD 159, 160, 174, 177, 178, 181, 186-192, 194, 195, 197

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : November 2018

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

DDC:

Iqbal Takodama, Ahmad Zarkasyi, Mochammad Nur Hadi, dan Ratna Dewi
(Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi)

IDENTIFIKASI SISTEM PANAS BUMI DAERAH WAPSALIT BERDASARKAN STRUKTUR TAHANAN JENIS DATA MAGNETOTELLURIK

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2018 Vol. 13 No. 3 Hal. 141 - 154

Daerah panas bumi Wapsalit berada di Pulau Buru, Maluku, Indonesia yang secara geologi berada pada lingkungan non-vulkanik. Berdasarkan penyelidikan terdahulu, daerah ini memiliki prospek panas bumi di sekitar area manifestasi panas bumi yang dikontrol oleh perpotongan dua sesar. Proses inversi 2-Dimensi dari data magnetotellurik (MT) dilakukan untuk menggambarkan sebaran tahanan jenis batuan bawah permukaan. Proses inversi ini menggunakan algoritma Active Constraint Balancing (ACB) yang memanfaatkan prinsip spatially variable regularization parameter. Lapisan konduktif yang berfungsi sebagai lapisan penudung berupa batuan metamorf terubah muncul di dekat permukaan hingga kedalaman 1000 – 1250 meter. Lapisan ini semakin meninggi seiring dengan kedalaman yang mengindikasikan zona reservoir. Zona tahanan jenis tinggi (resistif) dengan bentuk kubah muncul pada bagian bawah yang diinterpretasikan sebagai batuan intrusif muda.

Kata kunci: Wapsalit, metode magnetotellurik, inversi 2-D, Active Constraint Balancing, tahanan jenis, sistem panas bumi

DDC:

Fiandri I. Rinawan¹, Mega F. Rosana¹, Mohammad N. Heriawan², dan Euis T. Yuningsih¹
(¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran dan ²Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, ITB)

KETERKAITAN KELIMPAHAN UNSUR MAJOR DAN MINOR DENGAN ZONASI LATERIT NIKEL BLOK HZ (HARZBURGIT) DAN DN (DUNIT) DAERAH PULAU PAKAL, HALMAHERA TIMUR

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2018 Vol. 13 No. 3 Hal. 155 - 175

Keterkaitan kelimpahan unsur pada profil laterit nikel dilakukan berdasarkan hasil analisis kimia unsur major (Fe, SiO₂, MgO, dan Al₂O₃) dan minor (Ni, Co, MnO, dan Cr₂O₃) menggunakan analisis univariat dan multivariat. Profil berupa tanah atau hancuran batuan hasil lapukan litologi ultrabasa harzburgit (Blok HZ) dan dunit (Blok DN) berumur Kapur hingga Jura, terletak di daerah Pulau Pakal, Halmahera Timur. Tujuan penelitian ini yaitu untuk mengetahui hubungan antar unsur kimia major dan minor terhadap nilai koefisien korelasi kuat hingga sangat kuat baik negatif maupun positif yang terdistribusi pada profil laterit nikel Blok HZ dan DN. Penelitian ini fokus pada identifikasi fisik mineralogi bedrock dan analisis kimia profil laterit nikel. Identifikasi fisik di Blok HZ melibatkan 436 conto berasal dari 19 pemboran, kedalaman 10 m hingga 40 m.

Adapun identifikasi fisik di Blok DN melibatkan 650 conto berasal dari 16 pemboran, kedalaman 11 m hingga 57 m. Komposisi mineral di Blok HZ terdiri dari mineral oksida besi limonit, gutit, jarosit, dan oksida mangan (zona limonit); krisopras, garnierit, magnetit, hematit, serpentin-krisotil, dan stiktit (zona saprolit); olivin-forsterit, piroksen-ortopiroksen, dan kromit (zona boulder/bedrock). Sedangkan di Blok DN terdiri dari mineral oksida besi limonit, gutit, dan oksida mangan (zona limonit); krisopras, jarosit, garnierit, magnetit, hematit, mineral lempung montmorilonit, kuarsa, serpentin-krisotil, dan talk (zona saprolit), olivin-forsterit, piroksen-hastingsit, dan kromit (zona boulder/bedrock). Analisis statistik univariat menunjukkan distribusi data relatif tidak normal dengan koefisien variasi > 0,5. Pada analisis statistik multivariat mengindikasikan nilai koefisien korelasi positif maupun negatif pada zonasi laterit nikel berupa hubungan unsur yang sangat kuat ($\pm 0,80 - 1,00$) dengan jumlah korelasi dominan. Koefisien korelasi pada Blok HZ diantaranya mengindikasikan pasangan unsur yang berkorelasi sangat kuat yaitu: unsur major-major (Fe vs MgO, Fe vs SiO₂, SiO₂ vs MgO, dan MgO vs Al₂O₃), minor-minor (Co vs MnO) serta major-minor (Al₂O₃ vs Cr₂O₃, Fe vs Co, Fe vs MnO, dan SiO₂ vs Co). Sedangkan pada Blok DN pasangan unsur yang berkorelasi sangat kuat yaitu: unsur major-major (Fe vs MgO), minor-minor (Co vs MnO) dan major-minor (Fe vs Co, Fe vs Cr₂O₃, Fe vs MnO, MgO vs Co, dan MgO vs MnO). Hal ini berkaitan dengan posisi masing-masing korelasi distribusi unsur kimia major dan minor tersebut pada zona profil laterit nikel Limonit, Saprolit dan Boulder/Bedrock.

Kata kunci: Analisis korelasi, unsur major-minor, profil laterit nikel, ultrabasa, harzburgit, dunit

DDC:

Dewi Gentana¹, Nana Sulaksana², Emi Sukiyah³, dan Euis T. Yuningsih³
(¹Program Doktorat Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, ²Departemen Geologi Terapan, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, dan ³Departemen Geologi Sains, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran)

ALTERASI HIDROTERMAL GUNUNG RENDINGAN BERDASARKAN ANALISIS PETROGRAFI DAN X-RAY DIFFRACTION (XRD)

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2018 Vol. 13 No. 3 Hal. 177 - 198

Daerah penelitian terletak di daerah panas bumi Gunung Rendingan, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung. Daerah penelitian dipengaruhi oleh Sesar Semangko, mempunyai pola sesar berarah Barat Laut - Tenggara dan Timur Laut – Barat Daya. Penelitian bertujuan untuk mengetahui himpunan mineral alterasi berdasarkan analisis petrografi dan X-Ray Diffraction (XRD). Analisis petrografi digunakan untuk mengetahui mineral alterasi sebagai indikator temperatur dan fluida hidrothermal di daerah penelitian. Analisis XRD dilakukan untuk mengidentifikasi jenis mineral lempung. Berdasarkan analisis petrografi dan XRD pada batuan permukaan di daerah penelitian menghadirkan mineral kelompok lempung yang terdiri dari smektit, illit, serisit dan kaolinit. Hasil analisis petrografi dan XRD terhadap serbuk bor (cutting) dari sumur XD-1, XD-2

dan XD-3 memperlihatkan himpunan mineral alterasi hidrotermal smektit-kaolinit-serisit dan illit-epidot pada sumur XD-1, himpunan mineral serisit-smektit, smektit-illit dan illit-epidot pada sumur XD-2, himpunan mineral smektit-kaolinit dan illit-smektit-epidot pada sumur XD-3. Berdasarkan himpunan mineral alterasi tersebut dapat diperkirakan temperatur bawah permukaan di daerah penelitian berkisar 150°-300°C pada kedalaman 700 – 1900 mKu sebagai zona reservoir. Kehadiran mineral kalk-silikat yaitu epidot bersama wairakit dan prehnit sebagai indikator zona reservoir memiliki temperatur yang baik. Batuan di daerah penelitian memiliki permeabilitas yang baik dengan kehadiran mineral adularia.

Kata kunci: Himpunan Mineral Alterasi, Panas Bumi, Petrografi, Sumatera XRD

DDC:

Dudi Hermawan dan Lano Adhitya Permana
(Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi)

**KEPROSPEKAN PANAS BUMI GUNUNG LAWU
BERDASARKAN KAJIAN VULKANOSTRATIGRAFI**

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2018 Vol. 13 No. 3 Hal. 199 - 213

Gunung Lawu merupakan salah satu kerucut gunungapi di Indonesia yang memiliki keterdapatan manifestasi panas bumi dengan sebaran cukup luas di bagian lerengnya. Untuk mengetahui keprospekan panas bumi daerah Gunung Lawu diperlukan suatu kajian ilmiah yang bisa menjelaskan hubungan antara vulkanisme Gunung Lawu dengan pembentukan sistem panas bumi daerah tersebut. Metode penelitian dalam makalah ini adalah berupa kajian vulkanostratigrafi. Kajian dilakukan dengan menentukan parameter-parameter karakteristik vulkanik Gunung Lawu yang meliputi volume dan pola struktur geologi sebagai data primer, serta umur vulkanisme dan evolusi magma sebagai data sekunder. Hasil kajian menunjukkan bahwa Gunung Lawu memiliki volume gunungapi sebesar 300 km³ yang mengindikasikan keberadaan dapur magma yang cukup besar sebagai sumber panas, dengan vulkanisme termuda berumur 200 ribu tahun yang berada di kisaran umur ideal untuk membentuk sistem panas bumi yang matang. Pola struktur geologi menunjukkan arah struktur yang homogen dengan penyebaran vent radial mengarah ke puncak Gunung Lawu. Intensitas kerapatan patahan dan rekahan tinggi yang mencerminkan adanya zona permeabilitas tinggi terletak di lereng selatan dan barat Gunung Lawu. Dengan karakteristik tersebut, dapat disimpulkan bahwa daerah panas bumi Gunung Lawu memiliki prospek panas bumi yang menarik untuk dikembangkan dan perlu diteliti lebih lanjut, terutama pada lereng selatan dan barat Gunung Lawu.

Kata kunci: Gunung Lawu, vulkanisme, vulkanostratigrafi, sistem panas bumi, prospek

DDC:

Lia Putriyana
(Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Ketenagalistrikan, Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral)

EVALUASI CADANGAN MUNGKIN UNTUK SISTEM PANAS BUMI VULKANIK DENGAN METODE VOLUMETRIK: STUDI AREA KAMOJANG DAN LAHENDONG

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2018 Vol. 13 No. 3 Hal. 215 - 229

Di Indonesia perkiraan sumber daya didasarkan pada SNI 13-6482-2000 mengenai Angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi di Indonesia. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi cadangan mungkin panas bumi menggunakan metode Volumetric – heat stored dengan simulasi Monte Carlo untuk memperoleh probabilitas dari parameter-parameter yang memiliki tingkat ketidakpastian. Studi ini menggunakan analogi lapangan eksisting Kamojang dan Lahendong, yang berada pada jalur vulkanik yang sama dan memiliki kemiripan tatanan geologi, sehingga karakteristik reservoirnya tidak berbeda jauh. Empat parameter yang dibahas untuk mengevaluasi perhitungan cadangan mungkin adalah saturasi air, porositas batuan, recovery factor dan faktor konversi listrik. Hasil perhitungan cadangan mungkin untuk lapangan dominasi air yang diusulkan sebesar 152,73 MW, sedangkan yang menggunakan SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW. Hasil perhitungan untuk lapangan dominasi uap yang diusulkan sebesar 53,62 MW, perbedaan nilainya sangat signifikan dengan hasil perhitungan cadangan mungkin menggunakan SNI 13-6482-2000 sebesar 152,07 MW.

Kata kunci: Evaluasi cadangan mungkin, Sistem panas bumi vulkanik, Metode volumetric – heat stored



Travertine di Golo Lara, Kabupaten Manggarai Barat, Provinsi Nusa Tenggara Timur



Kawah Sikidang, Dieng, Provinsi Jawa Tengah



Travertine di Nampar Macing, Kabupaten Manggarai Barat,
Provinsi Nusa Tenggara Timur



Sampling Gas di Kawah Candradimuka, Dieng, Provinsi Jawa Tengah



Kolam Lumpur Panas di Kawah Sikidang, Dieng, Provinsi Jawa Tengah



Steaming Ground di Wapsalit, Kabupaten Buru, Provinsi Maluku



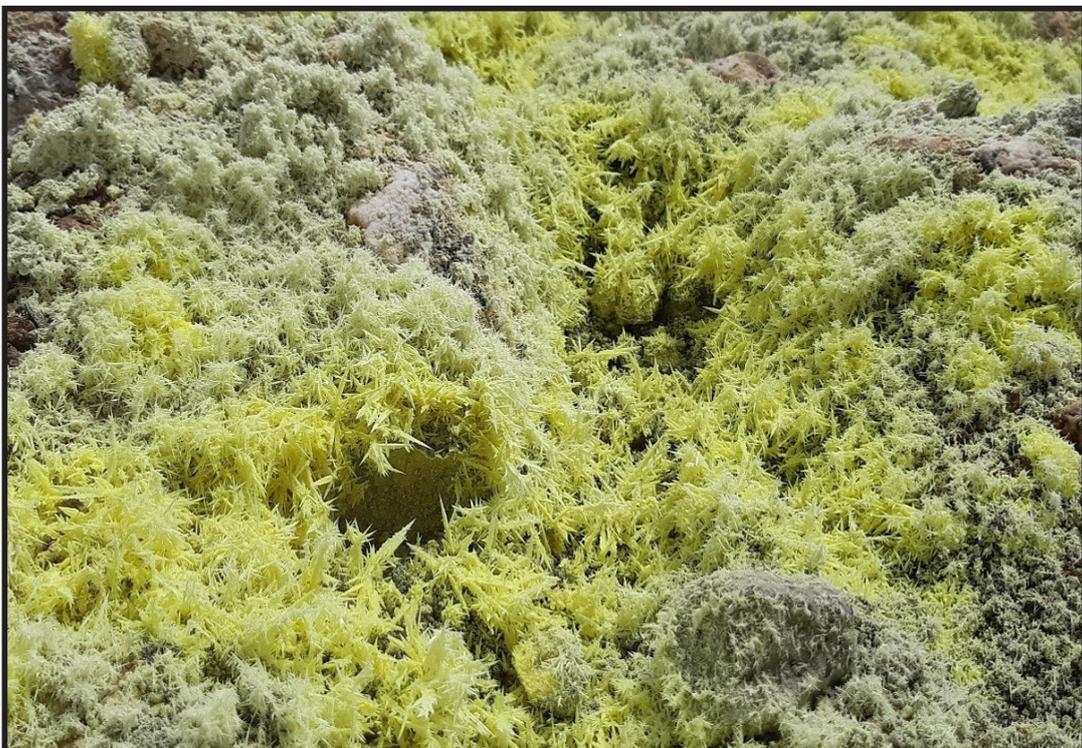
Mata Air Panas di Bukit Itam, Kabupaten Kepahiang, Bengkulu



Solfatar di Kawah Kaba, Kepahiang-Rejang Lebong, Provinsi Bengkulu



Mata Air Mendidih di Kawah Candradimuka, Dieng, Provinsi Jawa Tengah



Endapan Belerang di Kawah Papandayan, Provinsi Jawa Barat

GALERI FOTO



Gas Sampling di Kawah Timbang, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah



Peralatan Pemantauan Gas di Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah



Singkapan Batubara di Air Saka, Desa Rantau Kumpai,
Kabupaten Ogan Komering Ulu, Provinsi Sumatera Selatan



Singkapan Batubara di Air Tras, Desa Rantau Kumpai,
Kabupaten Ogan Komering Ulu, Provinsi Sumatera Selatan



Cebakan Bijih Timah pada Endapan Greisen di Daerah Tikus, Kabupaten Belitung, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung



Kuarsa (Kasiterit-Hematit) dengan Tekstur Sisir di Daerah Parit Tebu, Kabupaten Belitung Timur, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung



Penambangan Timah Primer di Daerah Tikus, Kabupaten Belitung, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung



Endapan Belerang di Gunung Tangkuban Parahu, Kabupaten Bandung Barat, Provinsi Jawa Barat

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 (<i>Title</i>)	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, faxsimile serta email.
II	Abstrak dan <i>Abstract</i>	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 <i>Abstract</i> tercantum di bawah Abstrak; dan berlaku sebaliknya apabila naskah ditulis dalam bahasa Inggris. Disarankan disertai kata kunci/ <i>keyword</i> yang ditulis di bawah Abstrak/ <i>Abstract</i> , terdiri dari 4 hingga 6 kata. <i>Abstract</i> atau abstrak yang ditulis di bawah abstrak atau <i>abstract</i> menggunakan <i>italic font</i> .

PEDOMAN PENULISAN

<p>III</p>	<p>Pendahuluan (<i>Introduction</i>)</p>	<p>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.</p>
<p>IV</p>	<p>Metodologi (<i>Methodology</i>)</p>	<p>Metode yang digunakan harus spesifik dan jelas, mencakup uji-uji hipotesis atau model-model uji statistik, dapat menghimpun data primer/<i>sampling</i>, cara pengukuran dan komputasi.</p>
<p>V</p>	<p>Hasil dan Pembahasan (<i>Results and Discussion</i>)</p>	<p>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. <i>Font</i> huruf/angka untuk keterangan tabel, gambar dan foto berukuran minimum 6 <i>point</i>.</p> <p>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.</p>
<p>VI</p>	<p>Kesimpulan dan Saran (<i>Conclusions and Recommendation</i>)</p>	<p>Berisi kesimpulan dan saran dari hasil uji hipotesis tentang penelitian, dan berisi segitiga konsistensi (masalah, tujuan dan kesimpulan).</p>
<p>VII</p>	<p>Ucapan Terima Kasih (<i>Acknowledgements</i>)</p>	<p>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.</p>
<p>VIII</p>	<p>Acuan (<i>References</i>)</p>	<p>Acuan ditulis dengan menggunakan sistem nama tahun, nama penulis/pengarang yang tercantum didahului oleh nama akhir (<i>surname</i>), disusun menurut abjad dan judul makalah/karya tulis ditulis dengan huruf miring (<i>italic font</i>)</p>

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

Harvey, R.D. dan Dillon, J.W., 1985. *Maceral distribution in Illinois coals 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 substansi 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 Tata Usaha, 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: buletinsdg@gmail.com
OJS: <http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>

SERTIFIKAT

Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan,
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi



Kutipan dari Keputusan Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan,
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia
Nomor: 21/E/KPT/2018, Tanggal 9 Juli 2018
Tentang Hasil Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode I Tahun 2018

Nama Jurnal Ilmiah
Buletin Sumber Daya Geologi
E-ISSN: 2580-1023
Penerbit: Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM

Ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

Akreditasi berlaku selama 5 (lima) tahun, yaitu
Volume I Nomor 1 Tahun 2016 sampai Volume 15 Nomor 3 Tahun 2020

Jakarta, 9 Juli 2018
Direktur Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan



Dr. Muhammad Dimiyati
NIP. 195912171984021001



Alamat Redaksi

Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian Tata Usaha, 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

