

buletin

SUMBER DAYA GEOLOGI

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

Volume 15 No. 3, November 2020



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

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 15	No. 3	Halaman 140 - 218	Bandung November 2020	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 21/E/KPT/2018
--------------------------------	---------	-------	----------------------	--------------------------	--

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

a. *Lattice bladed texture* pada NSD 21; b. *Brecciated texture* pada NSD 7;
c. *Crustiform texture* pada NSD 63; d. *Crustiform-colloform texture* pada NSD 9
(Nada Salsabila Deva, 2020)

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	Eko Suryanto, S.Kom. Resmi Novianti, S.T. Rijal Ahmad Taufik, S.T. Ernawati, S.I.Pust. Rahayu Gesang Kami
Editorial Board	Sumardi, S.T., M.M. Qomariah, S.Kom., M.T. Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si. Ir. Prima Muharam Hilman, M.Sc. Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi Ir. Asep Suryana Ir. Sri Widodo Ir. Teuku Ishlah Ir. Bambang Pardiarto Dr. Siti Sumilah Rita Susilawati, S.T., M.Sc. Ir. Rina Wahyuningsih Fatimah, S.T., M.Sc. Drs. Dedi Kusnadi Indra Sukmayana, S.T.
Peer-Reviewer	Prof. Dr.Ir. Binarko Santoso, M.Sc Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D Prof. Euis Tintin Yuningsih, S.T., M.T., Ph.D Dr. Chairul Nas, M.Sc. Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc. Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T. Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T. Edi Suhanto, S.Si, M.T. Dr. Asep Kurnia Permana, S.T., M.Sc

Alamat sekretariat dan pengiriman naskah

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Bagian 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

Buletin Sumber Daya Geologi kembali hadir di akhir Bulan November 2020 berupa volume.15 nomor.3. Berbeda dengan edisi-edisi sebelumnya, kali ini lima makalah yang hadir mengulas tentang potensi mineral, batubara dan panas bumi hanya di Pulau Sumatra yang tersebar di tiga provinsi, yaitu Sumatra Selatan, Sumatra Barat dan Sumatra Utara.

Makalah pertama menyajikan penggunaan metode polarisasi terinduksi dalam eksplorasi bijih besi di Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatra Barat. Pemodelan 2D dilakukan untuk menghasilkan penampang resistivitas dan chargeabilitas dari setiap lintasan sedangkan pemodelan 3D untuk melihat persebaran zona mineralisasi bijih besi secara vertikal maupun horizontal yang memperlihatkan kemenerusan zona mineralisasi relatif berarah baratdaya-timurlaut dengan volume sebesar 864.000 m³.

Identifikasi karakter alterasi dan variasi tekstur urat kuarsa pada sebuah lubang tambang di Kabupaten Tapanuli Selatan, Provinsi Sumatra Utara merupakan makalah kedua yang hadir. Penyelidikan ini mengungkapkan adanya variasi zona alterasi yang dicirikan dengan kehadiran mineral-mineral ubahan dan beragamnya tekstur urat kuarsa di lokasi tersebut yang ditunjukkan dengan gambar-gambar menarik sebagai bukti terjadinya mineralisasi.

Makalah ketiga berupa estimasi sumber daya batubara di Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. Penyelidikan dilakukan dengan membuat model geologi secara 2D dan 3D yang dipergunakan untuk estimasi sumber daya batubara. Faktor-faktor yang dipertimbangkan meliputi kompleksitas geologi, distribusi kualitas batubara, pemetaan bawah permukaan dan pembuatan model geologi dari hasil kegiatan pengeboran. Didukung oleh pengolahan data dengan menggunakan aplikasi komputer diperoleh estimasi besarnya sumber daya lima lapisan batubara dan total keseluruhan lapisan batubara di wilayah tersebut.

Makalah keempat berupa kajian tentang peluang pembentukan grafit sintetis yang berasal dari batubara yang terpanaskan secara alami akibat pengaruh intrusi batuan beku di Tambang Air Laya, Kabupaten Tanjung Enim, Provinsi Sumatra Selatan.

Sedangkan makalah yang terakhir berupa kajian aliran panas pada sistem fluida di wilayah panas bumi Sorik Marapi, Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Barat. Penentuan pola aliran fluida sangat dibutuhkan sebagai petunjuk bagi kegiatan eksplorasi dan eksploitasi selanjutnya.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi dan jajaran manajemen yang selalu mendukung dalam pengelolaan buletin ilmiah ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para Mitra Bestari yang selalu siap menyumbangkan wawasannya sesuai dengan keahliannya. Saat ini Buletin Sumber Daya Geologi sedang mengikuti proses reakreditasi. Semoga dengan kehadiran yang konsisten dan substansi bahasan yang menarik dan berkualitas, diharapkan kembali memperoleh status terakreditasi dari Kementerian Riset dan Teknologi / Badan Riset dan Inovasi Nasional Republik Indonesia.

Salam sehat, selalu semangat dan terus berkontribusi dalam menulis karya tulis ilmiah.

Hormat Kami

Dewan Redaksi

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

- 140 - 154 **IDENTIFIKASI ZONA MINERALISASI BIJIH BESI MENGGUNAKAN METODE POLARISASI TERINDUKSI DI DAERAH ULUSULITI DAN TANJUNG LIMA KAPAS, SOLOK SELATAN, SUMATRA BARAT**
IDENTIFICATION OF IRON ORE MINERALIZATION ZONE USING INDUCED POLARIZATION METHOD AT ULUSULITI AND TANJUNG LIMA KAPAS AREA, SOUTHERN SOLOK, WEST SUMATRA
Oleh : Maharani Sarastika Bodjawati, Dzil Mulki Heditama, Yudi Aziz Muttaqin
- 156 - 168 **KARAKTERISTIK ALTERASI DAN TEKSTUR URAT KUARSA PADA PIT BARANI, CEBAKAN EMAS MARTABE, KABUPATEN TAPANULI SELATAN, PROVINSI SUMATRA UTARA**
ALTERATION AND QUARTZ-VEIN TEXTURES CHARACTERISTIC AT BARANI PIT OF MARTABE GOLD DEPOSITS, SOUTH TAPANULI REGENCY, NORTH SUMATRA PROVINCE
Oleh : Nada Salsabila Deva, Euis Tintin Yuningsih, Kurnia Arfiansyah Fachrudin, Nur Afrianti Saala, Ade Triyunita
- 170 - 182 **PEMODELAN GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBER DAYA BATUBARA DI PIT “HMG”, TAMBANG BATUBARA BANKO BARAT, SUMATRA SELATAN**
GEOLOGICAL MODELLING AND COAL RESOURCE ESTIMATION IN THE “HMG” PIT, WEST BANKO COAL MINE, SOUTH SUMATRA
Oleh : Adithya Ramadhani Hasibuan, Reinaldi Juniarto, Nurdrajat, Reza Mohammad Ganjar Gani, Dicky Muslim, M. Dwiki Satrio
- 184 - 200 **KARAKTERISTIK BATUBARA TERPENGARUH INTRUSI DI TAMBANG AIR LAYA, SUMATRA SELATAN DAN POTENSINYA SEBAGAI MATERIAL UNTUK PEMBUATAN GRAFIT SINTETIS**
THE CHARACTERISTICS OF HEAT-AFFECTED COAL IN AIR LAYA MINE, SOUTH SUMATRA AND ITS POTENTIAL AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF SYNTHETIC GRAPHITE
Oleh : Arsha Maulana, Ferian Anggara
- 202 - 218 **POLA ALIRAN PANAS BERDASARKAN ANALISIS FLUIDA DAN MINERAL UBAHAN DI DAERAH PANAS BUMI SORIK MARAPI, KABUPATEN MANDAILING NATAL, PROVINSI SUMATRA UTARA**
HEAT FLOW PATTERN BASED ON ANALYSIS OF GEOTHERMAL FLUID AND ALTERATION MINERAL IN SORIK MARAPI REGION, MANDAILING NATAL DISTRICT, NORTH SUMATRA PROVINCE
Oleh : Hisyam Azhar Azizi, Agus Didit Haryanto, Johanes Hutabarat, Dicky Muslim, Dewi Gentana, Ryan Hidayat

ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi

**IDENTIFIKASI ZONA MINERALISASI BIJIH BESI
MENGUNAKAN METODE POLARISASI TERINDUKSI DI DAERAH ULUSULITI
DAN TANJUNG LIMA KAPAS, SOLOK SELATAN, SUMATRA BARAT**

**IDENTIFICATION OF IRON ORE MINERALIZATION ZONE
USING INDUCED POLARIZATION METHOD AT ULUSULITI
AND TANJUNG LIMA KAPAS AREA, SOUTHERN SOLOK, WEST SUMATRA**

Maharani Sarastika Bodjawati¹, Dzil Mulki Heditama², dan Yudi Aziz Muttaqin²

¹Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Gadjah Mada,

²Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
maharani.sarastika.b@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Daerah Ulusuliti dan Tanjung Lima Kapas, Kecamatan Koto Parik Gadang Diateh, Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatra Barat memiliki potensi bijih besi berupa zona mineralisasi yang terbentuk dari adanya batugamping yang diterobos batuan granodiorit. Pengukuran menggunakan metode polarisasi terinduksi dengan konfigurasi dipole-dipole dengan spasi antar elektroda 50 m. Data polarisasi terinduksi yang diukur sebanyak 11 lintasan dengan panjang masing-masing lintasan 1.200 m dan jarak antar lintasan 100 m hingga 300 m. Pemodelan 2D dilakukan untuk menghasilkan penampang resistivitas dan chargeabilitas dari setiap lintasan. Pemodelan 3D dilakukan untuk melihat persebaran zona mineralisasi bijih besi di daerah penelitian baik vertikal maupun horizontal. Pada model resistivitas dan chargeabilitas 2-dimensi, zona mineralisasi bijih besi diperkirakan memiliki nilai resistivitas $>500 \Omega\text{m}$ dan chargeabilitas >150 milisekon. Nilai-nilai tersebut diasosiasikan sebagai mineral-mineral bijih besi hasil dari alterasi hidrotermal yang terbentuk akibat adanya interaksi antara fluida magmatik dan meteorik yang berasal dari batuan granodiorit, kemudian fluida tersebut berinteraksi dengan batugamping. Hasil dari pemodelan 3-dimensi memperlihatkan kemenerusan zona mineralisasi relatif berarah baratdaya-timurlaut dengan volume sebesar 864.000 m^3 .

Kata kunci: bijih besi, chargeabilitas, mineralisasi, polarisasi terinduksi, resistivitas, zona alterasi

ABSTRACT

The Ulusuliti and Tanjung Lima Kapas area, Koto Parik Gadang Diateh District, South Solok Regency, West Sumatra Province has a potential of iron ore form mineralization zone which is formed from the limestone formation intruded by granodiorite. Induced polarization method measurement was carried out in time domain using a dipole-dipole configuration with a space between the electrodes of 50 m. Induced polarization data was measured as many as 11 lines with a length of each line of 1.200 m and a distance between the line of 100 m to 300 m. 2D modeling was carried out to produce resistivity and chargeability sections of each line. 3D modeling was carried out to identify the distribution of the iron ore mineralization zone in the study area, both vertical and horizontal. In the 2D resistivity and chargeability model, the zone of iron ore mineralization is estimated to have a resistivity value $> 500 \text{ ohm.m}$ and a chargeability > 150 milliseconds. These values are might be iron ore minerals as a result of hydrothermal alteration formed due to the interaction between magmatic and meteoric fluids originating from granodiorite rock interacts with limestone. The result of the 3D modeling shows

the continuity of the mineralized zone in a relatively southwest-northeast direction with a volume of 864.000 m³.

Keywords: iron ore, chargeability, mineralization, induced polarization, resistivity, alteration zone

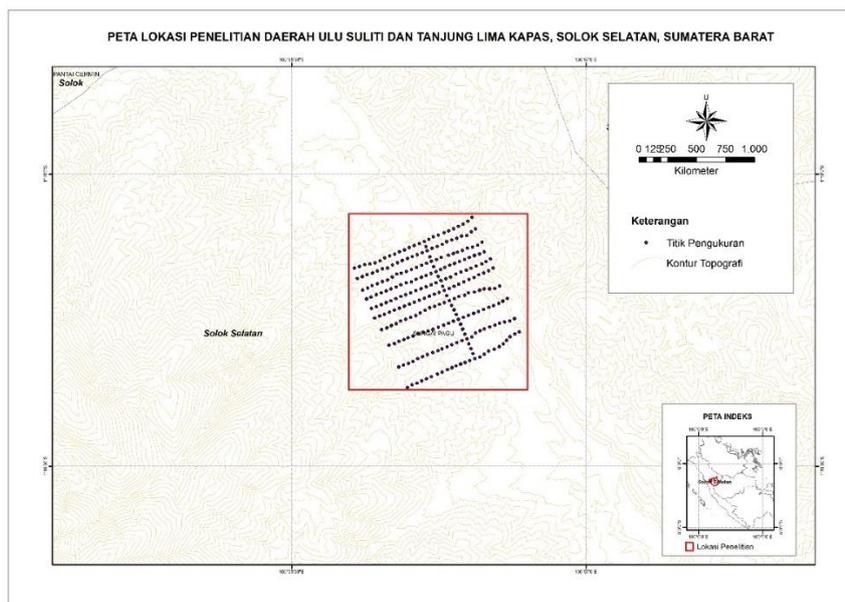
PENDAHULUAN

Indonesia berada pada pertemuan antara tiga lempeng tektonik utama yaitu Lempeng Indo Australia, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Pasifik. Kondisi geografis yang cukup kompleks tersebut mengakibatkan terbentuknya berbagai sumber daya mineral yang potensial (Bemmelen, 1949), salah satunya adalah bijih besi. Berdasarkan data neraca sumber daya mineral logam (Heditama dkk., 2019) diketahui bahwa potensi besi di Indonesia dijumpai dalam empat jenis cebakan/endapan, yaitu besi primer, besi laterit, besi sedimen dan pasir besi.

Lokasi penelitian berada di daerah Ulu Suliti dan Tanjung Lima Kapas, Kecamatan Koto Parik Gadang Diateh, Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatera Barat (Gambar 1). Kabupaten Solok Selatan memiliki potensi sumber daya mineral logam, khususnya logam besi, yang cukup potensial untuk dikembangkan. Hal ini

disebabkan karena daerah Solok Selatan dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar dan aktivitas magmatik, sehingga menghasilkan tubuh-tubuh intrusi batuan beku berupa terobosan batuan granit-granodiorit berumur Kapur Akhir yang menerobos batugamping berumur Perem Awal (Rosidi dkk., 1996). Kondisi geologi tersebut menjadi faktor penunjang proses pembentukan cebakan bijih besi.

Metode polarisasi terinduksi merupakan salah satu metode dalam geofisika, yang tidak jarang menjadi pilihan utama dalam eksplorasi sumber daya mineral. Keunggulan metode ini dibandingkan dengan metode geofisika lainnya adalah kemampuan untuk mendeteksi adanya mineral yang letaknya tersebar (*disseminated*) dan tak teratur karena mineral yang tersebar lebih mudah terpolarisasi akibat arus yang melaluinya. Efek polarisasi tersebut terjadi karena adanya media batuan yang mengandung mineral logam.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Daerah Ulu Suliti dan Tanjung Lima Kapas, Solok Selatan, Sumatera Barat (modifikasi dari Muttaqin, 2014)

Dalam penelitian ini, metode polarisasi terinduksi digunakan untuk membuat model berdasarkan parameter resistivitas dan chargeabilitas sehingga dapat memberikan gambaran kondisi bawah permukaan dan informasi zona sebaran mineralisasi bijih besi pada daerah penelitian.

GEOLOGI

Secara fisiografis, Pulau Sumatra merupakan bagian dari Lempeng Eurasia yang berarah baratlaut. Menurut Van Bemmelen (1949), Pulau Sumatra terdiri dari 6 zona fisiografis meliputi:

- Zona Jajaran Barisan
- Zona Semangko
- Zona Pegunungan Tigapuluh
- Zona Kepulauan Busur Luar
- Zona Paparan Sunda
- Zona Dataran Rendah dan Bukit

Secara umum, daerah penelitian termasuk ke dalam Zona Jajaran Barisan pada zona yang berkaitan dengan peristiwa tumbukan dua lempeng besar yaitu Lempeng Indo-Australia di bagian selatan dan Lempeng Eurasia di bagian utara yang diperkirakan terjadi pada masa 15 juta tahun yang lalu sehingga menyebabkan terjadinya arah gaya relatif utara–selatan yang menghasilkan rangkaian struktur sesar geser berarah baratlaut–tenggara. Rangkaian struktur sesar geser tersebut pada akhirnya membentuk sesar besar Sumatra yang dikenal dengan nama Sesar Mendatar Semangko. Proses pergeseran tersebut kemudian menghasilkan zona lemah yang memungkinkan menjadi jalan keluarnya magma pada aktivitas vulkanisme dan menghasilkan Zona Jajaran Barisan.

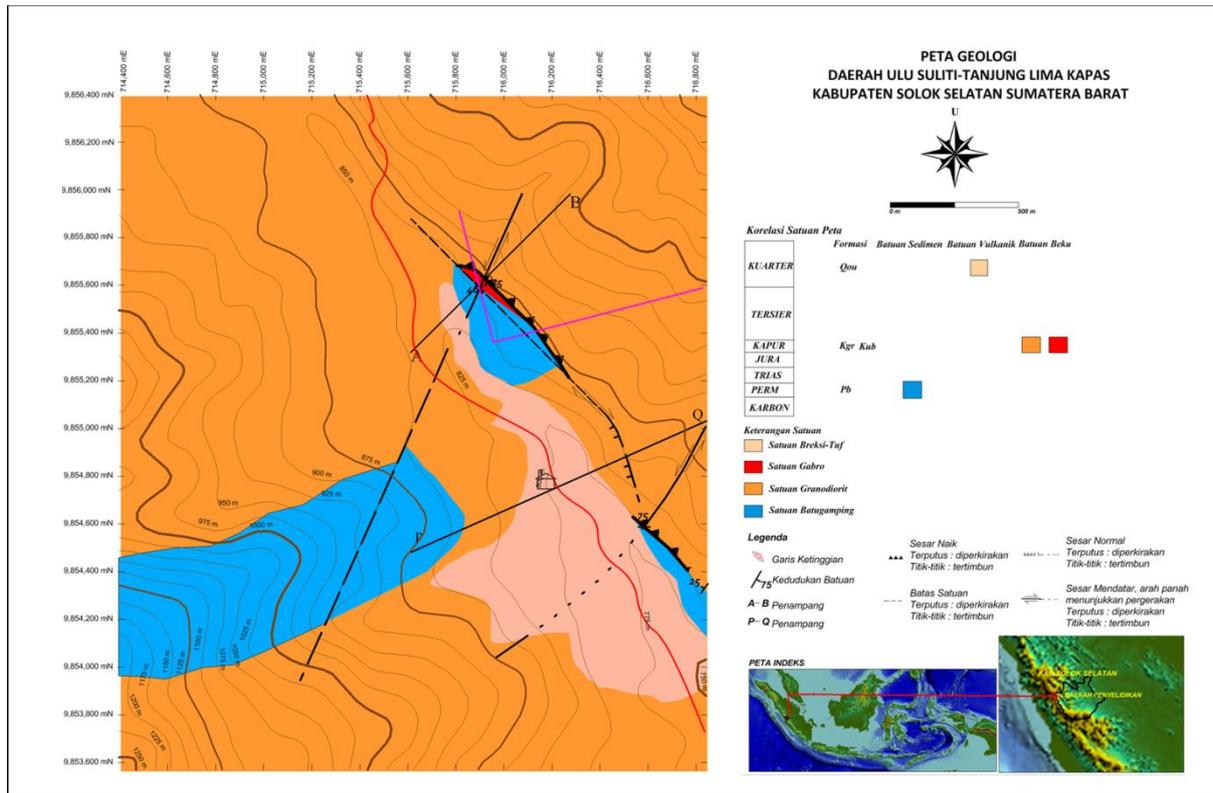
Menurut Franklin (2014), di daerah penelitian terdapat sesar geser mengangan berarah baratlaut–tenggara yang diketahui dari kontak antara gabro dengan granodiorit dan breksiasi pada tuf. Pada daerah penelitian juga terdapat sesar geser mengiri berarah baratdaya–timurlaut yang diketahui dari kontak pada batugamping dengan gabro dan kontak batugamping dengan granodiorit. Pola struktur sesar geser mengiri berarah baratdaya–timurlaut diperkirakan sebagai celah untuk jalannya larutan hidrotermal sehingga terjadi mineralisasi bijih besi bertipe skarn di daerah penelitian.

Stratigrafi pada sekitar daerah penelitian terdiri dari beberapa formasi yang diurutkan dari tua ke muda (Rosidi dkk., 1996) sebagai berikut:

- Formasi Barisan (Pb, Pbl) tersusun atas batugamping, metasedimen, dan batuan metamorf,
- Formasi Siguntur (Ps, Jsl) terdiri atas kuarsit, serpih, dan batu sabak yang sebagian bersentuhan secara tektonik dengan Formasi Barisan, dan
- Formasi Painan (Tomp) terdiri atas batuan Oligo-Miosen berupa gunungapi dan batuan sedimen berumur Miosen Awal.

Menurut Franklin (2014), terdapat empat satuan batuan yang penamaannya didasarkan pada litologi yang paling dominan muncul dengan urutan satuan batuan dari tua ke muda (Gambar 2) sebagai berikut:

- Satuan Batugamping,
- Satuan Granodiorit,
- Satuan Gabro, dan
- Satuan Breksi – Tuf



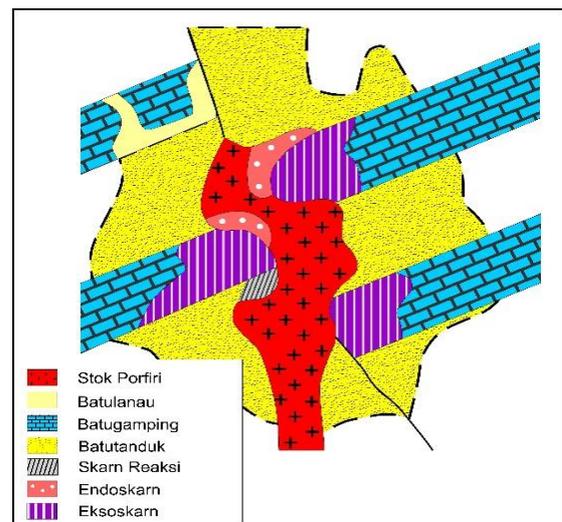
Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Franklin, 2014)

Alterasi dan Mineralisasi

Menurut Franklin (2014), alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian menghasilkan beberapa tipe antara lain :

- a. Mineral Lempung – Oksida Besi, Zona sebaran alterasi hidrotermal tersebut diperkirakan terpusat pada kontak terobosan antara satuan granodiorit – satuan batugamping dan menyebar secara lateral akibat kehadiran struktur-struktur yang terbentuk sebelum atau ketika aktivitas magmatik. Mineral bijih berupa bijih besi hadir pada litologi breksi.
- b. Mineral-mineral alterasi kuarsa – klorit – epidot hadir pada satuan granodiorit dengan mineral bijih berupa bijih besi dan pirit. Penyebaran alterasi hidrotermal tersebut diperkirakan terbentuk di luar kontak terobosan satuan granodiorit – satuan batugamping.

- c. Mineral-mineral alterasi silika – mineral lempung hadir pada satuan granodiorit. Penyebaran alterasi hidrotermal tersebut diperkirakan terbentuk *overprinted* dengan alterasi mineral lempung – oksida besi.



Gambar 3. Perkembangan dari eksoskarn dan endoskarn (modifikasi dari Pirajno, 2009)

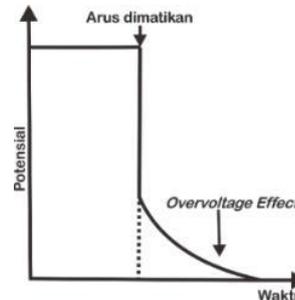
Menurut Franklin (2014) mineralisasi bijih besi di daerah penelitian memiliki tipe skarn. Berdasarkan batuan asalnya (protolith) skarn dibagi menjadi eksoskarn dan endoskarn (Pirajno, 2009). Eksoskarn digunakan untuk menjelaskan protolith yang teralterasi berasal dari batuan sedimen terutama batuan karbonat dalam hal ini berupa batugamping, sedangkan endoskarn digunakan untuk menjelaskan protolith yang berubah berasal dari batuan beku intrusif (Gambar 3).

METODE POLARISASI TERINDUKSI

Metode polarisasi terinduksi merupakan metode geofisika yang dapat digunakan untuk mempelajari keadaan geologi bawah permukaan berdasarkan kemampuan batuan/medium untuk menyimpan muatan listrik. Menurut Reynolds (2011), metode ini dapat digunakan untuk pemetaan keberadaan bijih logam yang tersebar, pencarian air tanah, eksplorasi panas bumi, serta sering digunakan dalam pencarian logam dasar. Metode ini merupakan pengembangan dari metode resistivitas dengan tambahan parameter polarisasi kelistrikan suatu medium atau disebut chargeabilitas (Telford dkk., 1990). Polarisasi terinduksi sendiri merupakan fenomena reorientasi muatan pada suatu medium karena adanya induksi yang mengenainya. Salah satu unsur alam yang memiliki tingkat polarisasi tinggi adalah logam. Oleh karena itu, adanya peristiwa polarisasi biasanya menandakan adanya kandungan logam dalam medium yang diteliti.

Prinsip dasar pengukuran metode polarisasi terinduksi adalah mengukur efek polarisasi yang terjadi pada suatu medium karena pengaruh arus listrik yang melewati medium tersebut. Arus listrik diinjeksikan ke bawah permukaan dengan dua buah elektroda arus (C1 dan C2) dan diterima oleh dua buah elektroda potensial (P1 dan P2). Pada kondisi normal, apabila arus dimatikan maka nilai beda potensial seharusnya bernilai nol, akan tetapi beda

potensial tersebut tidak langsung menjadi nol melainkan meluruh secara perlahan menuju nol yang disebut dengan *overvoltage effect* (Gambar 4).



Gambar 4. Fenomena polarisasi terinduksi (Reynolds, 2011)

Overvoltage effect disebabkan karena terdapat medium yang mengandung mineral logam yang dapat menyimpan arus sesaat dan berperan seperti kapasitor.

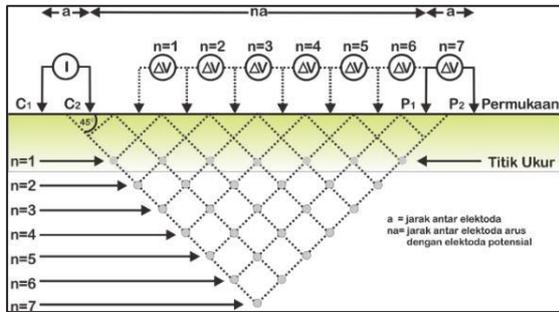
Pengukuran metode polarisasi terinduksi dalam kawasan waktu menggunakan sumber arus DC (searah) yang dialirkan dalam selang waktu tertentu. Nilai chargeabilitas (*M*) tersebut dapat diketahui dengan cara membandingkan potensial sekunder (*V_t*) yang terukur saat arus dimatikan dengan potensial primer (*V₀*) yang terukur saat arus diinjeksikan, sehingga dapat dirumuskan dengan persamaan (1) sebagai berikut:

$$M = \frac{V_t}{V_0} \tag{1}$$

Pengukuran nilai *V_t* sulit dilakukan karena terjadi dalam waktu singkat sehingga cara lain untuk mendapatkan nilai *V_t* dilakukan dengan mengukur waktu peluruhan nilai *V_t* dengan perhitungan besaran luas di bawah kurva peluruhan potensial dengan konsep integral sehingga diperoleh nilai chargeabilitas dengan satuan waktu (milisekon) yang dapat dilihat pada persamaan (2).

$$M_a = \frac{1}{V_0} \int_{t_1}^{t_2} V_t(t) dt = \frac{A}{V_0} \tag{2}$$

dengan V_t potensial sekunder yang terukur saat arus dimatikan pada waktu t_1 hingga t_2 , V_0 potensial primer yang terukur saat arus diinjeksikan, dan A adalah luasan di bawah kurva (Gambar 5).



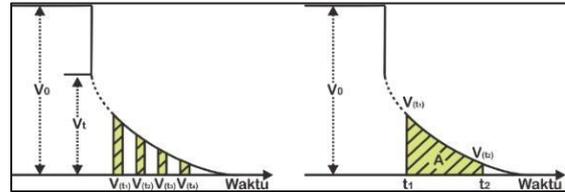
Gambar 5. Ilustrasi beda potensial yang meluruh terhadap waktu ketika arus listrik dimatikan (modifikasi dari Reynolds, 2011)

Konfigurasi yang digunakan disini adalah konfigurasi dipole-dipole (Gambar 6), dengan dua elektroda arus (C1 dan C2) dan dua elektroda potensial (P1 dan P2), yang jarak antar elektroda sejenisnya sama yaitu sebesar a meter. Pasangan elektroda potensial diletakkan di luar elektroda arus dengan kedua pasangan elektroda sejenis tersebut terpisahkan sejauh na , dengan n merupakan faktor perulangan ($n = 1, 2, 3, \dots$) yang semakin besar nilainya maka penetrasi kedalamannya juga semakin besar. Pengukuran dengan konfigurasi dipole-dipole dilakukan dengan memindahkan elektroda potensial sejauh na meter dengan elektroda arus tetap hingga pengukuran n terakhir sehingga didapatkan data secara vertikal. Kemudian elektroda arus dipindahkan sejauh n dengan diikuti pemindahan elektroda potensial hingga lintasan berakhir untuk mendapatkan data secara lateral.

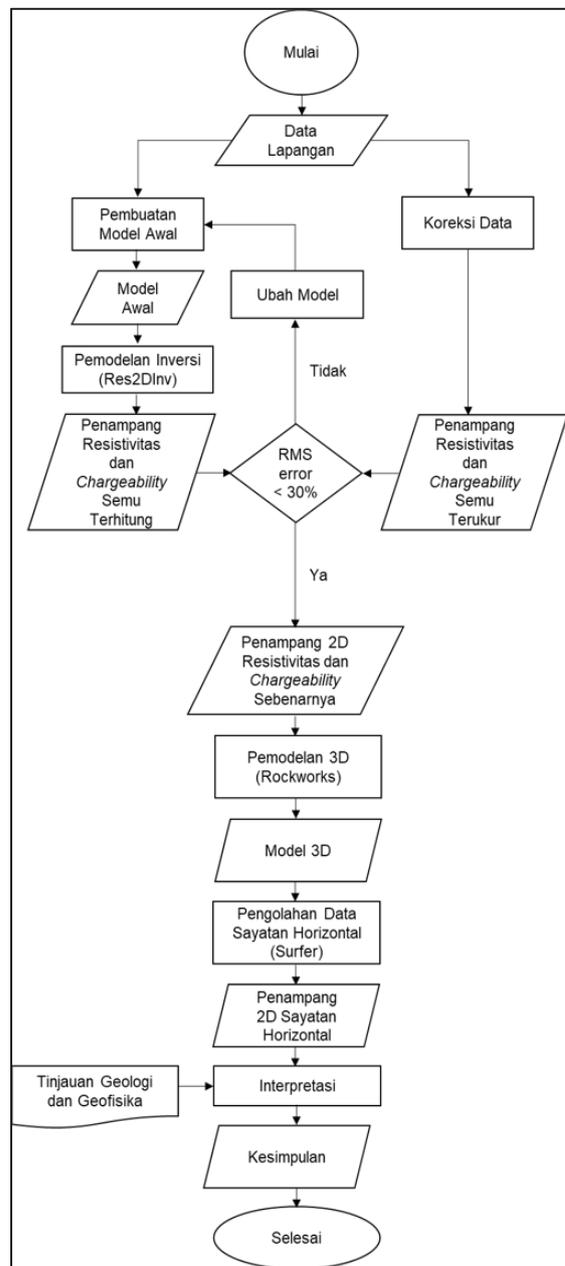
Kegiatan yang dimulai dari pengambilan data lapangan sampai dengan pemodelan, digambarkan dalam diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 7.

Pemodelan 2D dilakukan dengan melakukan proses inversi yang dilakukan terhadap data lapangan dengan tujuan untuk mengestimasi parameter fisis batuan yang tidak diketahui sebelumnya

(Supriyanto, 2007). Parameter yang dihasilkan dari inversi 2D adalah nilai resistivitas sebenarnya dan chargeabilitas sebenarnya.



Gambar 6. Konfigurasi elektroda dipole-dipole (modifikasi dari Loke, 2004)



Gambar 7. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan tinjauan geologi, pembentukan bijih besi di daerah penelitian dikontrol oleh litologi berupa batugamping dan granodiorit yang mempengaruhi alterasi dan mineralisasi. Adanya struktur geologi berupa sesar geser yang berarah baratdaya – timurlaut juga menjadi aspek geologi yang mengontrol adanya endapan skarn besi tersebut. Sesar tersebut berperan sebagai jalan utama fluida hidrotermal untuk naik dan membentuk zona alterasi. Alterasi dan mineralisasi bijih di daerah penelitian terjadi akibat adanya reaksi antara fluida magmatik yang berasal dari batuan intrusi granodiorit yang bereaksi dengan batugamping.

Pada penelitian ini, pengukuran metode polarisasi terinduksi dilakukan sebanyak 11 lintasan dari lintasan A hingga K. Jarak/spasi elektroda 50 m dan $n = 7$. Terdapat 11 lintasan dengan panjang tiap lintasan 1.200 meter (Muttaqin, 2014).

Penentuan daerah yang berpotensi mineralisasi bijih besi dengan metode polarisasi terinduksi, dilakukan dengan menganalisis data berupa nilai resistivitas sebenarnya dan chargeabilitas sebenarnya. Berdasarkan respon resistivitas yang mengukur besarnya tahanan jenis material di bawah permukaan dapat diketahui litologi bawah permukaan. Nilai resistivitas tersebut diharapkan mampu memberikan gambaran zona alterasi yang terjadi akibat naiknya larutan hidrotermal. Nilai resistivitas rendah mengindikasikan litologi yang teralterasi berupa alterasi argilik dengan mineral pengikat berupa mineral lempung seperti smektit, illite, klorit, dan kaolin, sedangkan nilai resistivitas tinggi dapat mengindikasikan keberadaan intrusi batuan beku yang berasosiasi dengan sistem hidrotermal yang membentuk mineralisasi dan cebakan bijih besi. Respon chargeabilitas diperoleh dari respon pengukuran metode polarisasi terinduksi. Apabila terdapat mineral konduktif maka waktu peluruhan akan berlangsung lama karena logam sebagai

medium polarisabel yang dapat menyimpan arus listrik sehingga nilai chargeabilitas relatif lebih tinggi.

Interpretasi dapat dilakukan dengan melihat respon dari nilai resistivitas dan chargeabilitas sehingga zona mineralisasi bijih besi dan intrusi batuan beku yang memberikan respon anomali resistivitas tinggi dapat dibedakan. Selain itu, zona mineralisasi bijih besi dan alterasi mineral lempung yang memberikan anomali chargeabilitas tinggi juga dapat dibedakan.

Pemodelan 2D dibuat dengan penampang dari nilai resistivitas dan chargeabilitas semu hasil pengukuran di lapangan atau biasa disebut *pseudosection* data terukur, kemudian dilakukan proses pemodelan balik yang mengubah model resistivitas dan chargeabilitas semu menjadi model resistivitas dan chargeabilitas sebenarnya sehingga dihasilkan model inversi. Kemudian pemodelan maju dilakukan dengan mengubah model inversi menjadi data yang dinyatakan dalam *pseudosection* terhitung 2D. Pada model yang dihasilkan dari data pengukuran dan model dari data perhitungan dilakukan proses pencocokan. Model ini dapat dikatakan sesuai dengan kondisi bawah permukaan jika nilai *RMS error*-nya $< 30\%$.

Berdasarkan proses inversi, didapatkan rentang nilai resistivitas dari 2,74 ohm.m hingga 5.860 ohm.m dan nilai chargeabilitas dari 0 hingga 810 milisekon yang kemudian dikelompokkan berdasarkan skala rendah, sedang, dan tinggi. Pembagian skala tersebut berdasarkan hasil sebaran nilai resistivitas dan chargeabilitas pada penampang 2D dan juga menggunakan data singkapan di lapangan. Data singkapan yang dijadikan acuan interpretasi adalah lintasan C yang terdapat singkapan bijih besi di titik 900 m dan lintasan E yang terdapat singkapan bijih besi di titik 850 m. Berdasarkan hasil penampang 2D resistivitas dan chargeabilitas pada lintasan C dan lintasan E, terlihat respon mineralisasi yang diduga mengandung bijih besi ditunjukkan dengan nilai resistivitas tinggi dan nilai

chargeabilitas tinggi. Nilai resistivitas dan chargeabilitas dari singkapan bijih besi tersebut kemudian dijadikan acuan untuk penentuan mineralisasi bijih besi yang tidak tersingkap di permukaan.

Menurut Telford (1990), batulempung memiliki resistivitas rendah dari 0 – 100 ohm.m, sedangkan batugamping memiliki resistivitas yang lebih besar dari 50 – 10⁷ ohm.m. Hal ini menjadi alasan batulempung dengan resistivitas 0 – 100 ohm.m dikategorikan pada skala rendah dan batugamping dengan resistivitas 100 – 500 ohm.m dikategorikan pada skala sedang – tinggi.

Menurut Franklin (2014), zona mineralisasi bijih besi ditemukan pada intrusi batuan granodiorit yang menerobos batugamping. Berdasarkan hasil interpretasi pada penampang C, dapat disimpulkan bahwa batuan intrusi granodiorit memiliki nilai resistivitas >500 ohm.m yang diklasifikasikan pada skala tinggi. Respon dari chargeabilitas sendiri menunjukkan nilai yang relatif tinggi dari sekitarnya yaitu >150 milisekon. Hal ini mengakibatkan nilai tersebut diklasifikasikan pada skala tinggi. Pembagian skala dan korelasi dari nilai resistivitas dan chargeabilitas dengan hasil interpretasi dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2 di bawah ini.

Tabel 1. Klasifikasi skala nilai relatif resistivitas dan chargeabilitas

Skala	Resistivitas (ohm.m)	Chargeabilitas (milisekon)
rendah	0 – 100	0 – 50
sedang	100 – 500	50 – 150
tinggi	> 500	> 150

Tabel 2. Korelasi nilai relatif resistivitas dan chargeabilitas dengan interpretasi

Interpretasi	Resistivitas (ohm.m)	Chargeabilitas (milisekon)
Lapisan Soil	Rendah (<100)	Rendah (<50)
Batugamping	Sedang – Tinggi (>100)	Rendah (<50)
Batuan Beku (Gabro, Diorit, dan Granodiorit)	Tinggi (>500)	Rendah – Sedang (0 – 150)

Interpretasi	Resistivitas (ohm.m)	Chargeabilitas (milisekon)
Zona Alterasi Argilik	Rendah – Sedang (0–500)	Tinggi (>150)
Zona Mineralisasi Bijih Besi	Tinggi (>500)	Tinggi (>150)

Proses analisis data menghasilkan penampang 2D yang memberi gambaran, bahwa nilai resistivitas dan chargeabilitas dari daerah penelitian, terdapat 10 lintasan yang teridentifikasi mengandung zona mineralisasi bijih besi yaitu lintasan-lintasan B, C, D, E, F, G, H, I, J, dan K. Adapun interpretasi dari lintasan-lintasan C, E, H, dan K yang mengandung mineralisasi bijih besi tersebut adalah sebagai berikut.

Berdasarkan penampang 2D pada lintasan C (Gambar 8) terlihat bahwa lintasan tersebut berada pada orientasi baratdaya – timurlaut dengan variasi elevasi berkisar antara 700 m hingga 900 m. Pada lintasan ini terdapat singkapan bijih besi yang terletak di titik elektroda 900 m yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas tinggi (>500 Ωm) dan nilai chargeabilitas tinggi (>150 milisekon) pada litologi breksi tuf. Hal ini dapat digunakan sebagai acuan untuk lintasan lain dengan cara membandingkan singkapan yang ada di lapangan dengan nilai anomali yang ditimbulkan dari singkapan tersebut. Oleh karena itu, hasil klasifikasi nilai resistivitas dan chargeabilitas lintasan C digunakan sebagai acuan dalam penelitian.

Berdasarkan respon dari singkapan bijih besi, dapat diketahui respon zona mineralisasi bijih besi yang tidak tersingkap di permukaan berada pada titik 400 m, 600 m, dan 800 m dengan elevasi masing-masing 780 m, 775 m, 760 m. Zona mineralisasi di titik 400 m menerus dari lintasan sebelumnya yaitu lintasan B, sedangkan zona mineralisasi di titik 800 m tersebut menerus ke lintasan selanjutnya yaitu lintasan D.

Pada lintasan C juga terdapat zona alterasi argilik di titik 975 m dengan elevasi 820 m

yang ditunjukkan dengan adanya variasi nilai resistivitas sedang dan nilai chargeabilitas tinggi yang menunjukkan bahwa susunan batuan pada daerah penelitian sebagian besar telah mengalami ubahan. Kenampakan tersebut juga mengindikasikan adanya struktur berupa sesar sebagai jalur yang dilewati fluida hidrotermal yang ditunjukkan dengan pola anomali yang memanjang vertikal. Sesar tersebut diduga sebagai pengontrol terjadinya alterasi di lintasan tersebut. Hal ini sesuai dengan informasi geologi bahwa mineral lempung – oksida besi tersebut berada pada kontak terobosan antara satuan granodiorit dan satuan batugamping yang menyebar secara lateral karena adanya struktur berupa sesar geser yang berarah baratdaya – timurlaut di titik 950 m. Pada lintasan ini juga terdapat singkapan batuan beku di titik 350 m dengan elevasi 880 m yang memberikan respon nilai resistivitas tinggi dan chargeabilitas rendah. Dari penampang 2D, terlihat bahwa singkapan tersebut tidak menerus ke bawah, hal ini diduga karena adanya larutan hidrotermal yang mengisi pori batuan sehingga menimbulkan respon resistivitas tinggi yang diselingi dengan resistivitas rendah yang kemudian mengubah komposisi batuan di bagian bawah dan menyebabkan mineralisasi di titik 400 m. Selain itu, pada titik 1000 m terlihat adanya intrusi batuan beku yang menerus dari lintasan B. Zona intrusi ini berperan penting sebagai sumber fluida hidrotermal yang akan melewati rekahan kemudian mengubah komposisi mineral batuan sampingnya.

Lintasan E (Gambar 9) berada pada orientasi baratdaya – timurlaut dengan elevasi berkisar antara 720 m sampai dengan 920 m. Pada lintasan E terdapat singkapan bijih besi di titik 850 m. Singkapan tersebut memberikan nilai resistivitas tinggi ($>500 \Omega\text{m}$) dan nilai chargeabilitas tinggi (>150 milisekon). Berdasarkan data keberadaan singkapan tersebut, lintasan ini dapat dijadikan acuan untuk lintasan lain yang tidak melewati singkapan. Berdasarkan respon dari singkapan bijih besi, dapat diketahui

respon zona mineralisasi bijih besi yang tidak tersingkap di permukaan berada pada titik 525 m hingga 625 m dengan elevasi 800 m. Keberadaan zona mineralisasi tersebut diduga berkaitan dengan adanya sesar geser yang berada pada titik 700 m sehingga menjadi zona lemah untuk penerobosan magma yang melibatkan batuan samping sehingga menimbulkan bahan cair, seperti cairan magmatik dan metamorfik yang banyak mengandung bijih besi. Zona mineralisasi pada titik tersebut menerus ke lintasan selanjutnya yaitu lintasan F yang faktor pengontrol mineralisasinya juga diduga berupa sesar geser.

Pada lintasan E juga terdapat zona alterasi argilik di titik 850 m dan 975 m dengan elevasi masing-masing 780 m dan 800 m yang ditunjukkan dengan adanya variasi nilai resistivitas rendah dan nilai chargeabilitas tinggi yang menunjukkan bahwa susunan batuan pada daerah penelitian sebagian besar telah mengalami alterasi dan banyak mengandung mineral lempung yang bersifat konduktif sehingga respon resistivitasnya rendah. Selain itu, pada lintasan E juga terdapat batuan beku di titik 200 – 400 m dengan elevasi 780 m dan di titik 925 m dengan elevasi 760 m, yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas tinggi dan chargeabilitas rendah. Nilai resistivitas tinggi tersebut menerus dari lintasan D sampai lintasan F. Pada titik 1000 m, 1050 m, dan 1075 m dengan elevasi 840 m yang ditunjukkan dengan nilai resistivitas sedang – tinggi dan chargeabilitas rendah diinterpretasikan sebagai batugamping. Hal ini sesuai dengan informasi pada peta geologi.

Berdasarkan penampang 2D pada lintasan H (Gambar 10) terlihat bahwa lintasan tersebut berada pada orientasi baratdaya – timurlaut dengan elevasi berkisar antara 750 m dan 950 m. Pada penampang tersebut terdapat zona menarik berupa zona mineralisasi bijih besi yang terdapat di antara titik 75 m sampai 125 m, 225 m sampai 400 m, dan 1.000 m dengan elevasi masing-masing 925 m, 900 m, dan 900 m yang terlihat dengan adanya variasi nilai

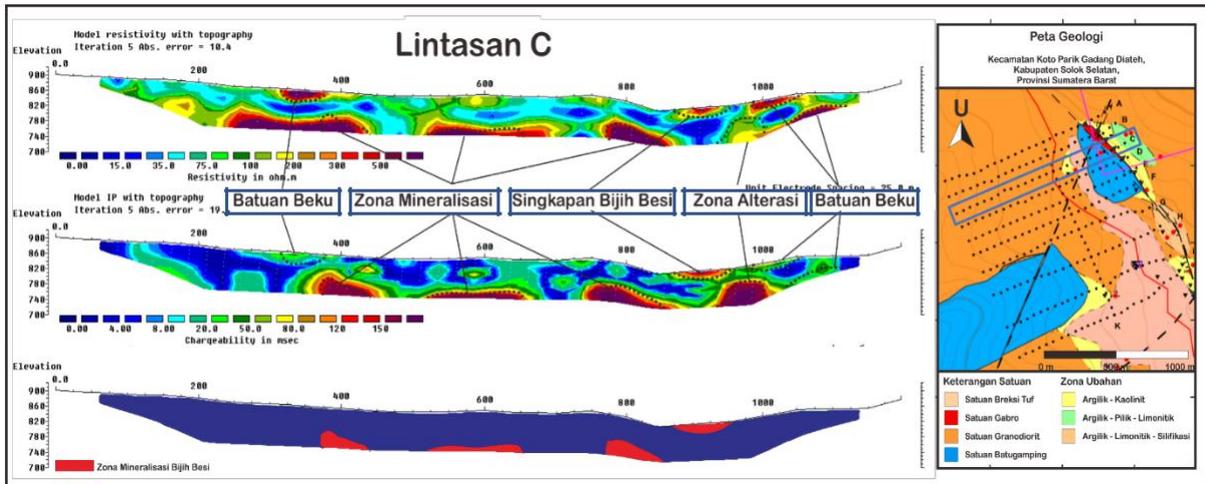
resistivitas tinggi resistivitas ($>500 \Omega\text{m}$) dan nilai chargeabilitas tinggi (>150 milisekon). Keberadaan zona mineralisasi ini menerus ke lintasan selanjutnya yaitu lintasan I yang pada peta geologi menunjukkan litologi yang sama. Zona mineralisasi ini terjadi pada kontak terobosan antara satuan granodiorit dan satuan batugamping. Hal ini dapat menyebabkan mineralisasi bijih besi bertipe skarn. Zona mineralisasi ini sesuai dengan informasi geologi bahwa mineralisasi diduga terjadi akibat adanya sesar pada titik 300 m yang mengontrol proses kontak antara batuan dengan intrusi magma yang menyebabkan masuknya larutan hidrotermal pada pori-pori batuan sehingga menyebabkan proses metasomatisme dan terjadi perubahan menyeluruh terhadap komposisi batuan tersebut.

Pada lintasan H juga terdapat zona alterasi argilik antara titik 625 m sampai titik 725 m dengan elevasi 800 m yang ditunjukkan dengan adanya variasi nilai resistivitas rendah dan nilai chargeabilitas tinggi yang menunjukkan bahwa susunan batuan pada daerah penelitian sebagian besar telah mengalami ubahan dan banyak mengandung mineral lempung yang bersifat konduktif sehingga respon resistivitasnya rendah. Selain itu juga terdapat singkapan batugamping dengan nilai resistivitas tinggi dan chargeabilitas rendah di permukaan sepanjang titik 400 m sampai dengan 600 m dengan elevasi 900 m yang menerus ke lintasan selanjutnya yaitu lintasan I. Dari penampang 2D, terlihat bahwa batugamping tersebut tidak membentuk bodi yang menerus ke bawah, hal ini disebabkan karena adanya larutan hidrotermal yang masuk ke pori-pori batuan sehingga menimbulkan respon resistivitas rendah di bagian bawahnya. Pada zona antara titik 750 m sampai titik 950 m dengan elevasi 800 m juga terdapat respon yang sama yang diinterpretasikan sebagai kemenerusan satuan batugamping.

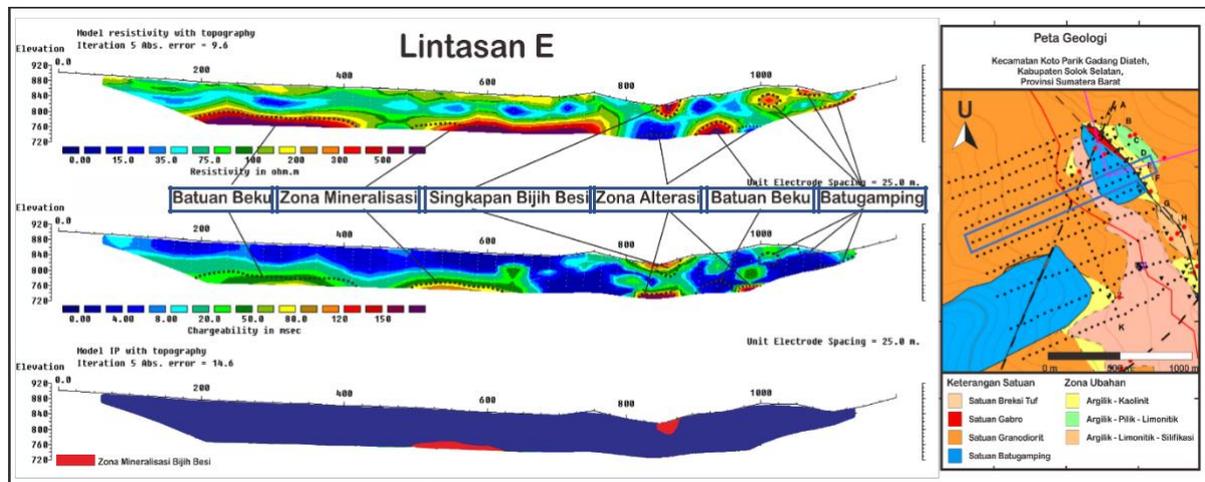
Lintasan K (Gambar 11) berada pada orientasi utara – selatan yang memotong lintasan lainnya dengan variasi topografi

yang relatif datar dan elevasi berkisar antara 700 m dan 860 m. Korelasi antara penampang 2D nilai resistivitas dan chargeabilitas dilakukan untuk mengidentifikasi zona yang dianggap menarik. Selain itu, penampang lintasan K juga dapat digunakan untuk melakukan pencocokan dengan lintasan lainnya mengingat keberadaan lintasan ini yang memotong lintasan lainnya. Pada penampang ini terdapat zona menarik berupa zona mineralisasi bijih besi yang terdapat di titik 400 m dengan elevasi 760 m yang memotong lintasan E di titik 600 m dan memberikan respon yang sama. Pada titik tersebut terlihat adanya variasi nilai resistivitas tinggi ($>500 \Omega\text{m}$) dan nilai chargeabilitas tinggi (>150 milisekon) yang diinterpretasikan sebagai zona mineralisasi. Adanya struktur berupa sesar geser di titik ini diduga menyebabkan masuknya larutan hidrotermal pada pori-pori batuan sehingga menyebabkan proses mineralisasi. Zona mineralisasi juga terdapat pada titik 650 m yang memotong lintasan G di titik 700 m. Lintasan K dan lintasan G tersebut memberikan respon yang sama berupa nilai resistivitas tinggi dan chargeabilitas tinggi untuk zona mineralisasi.

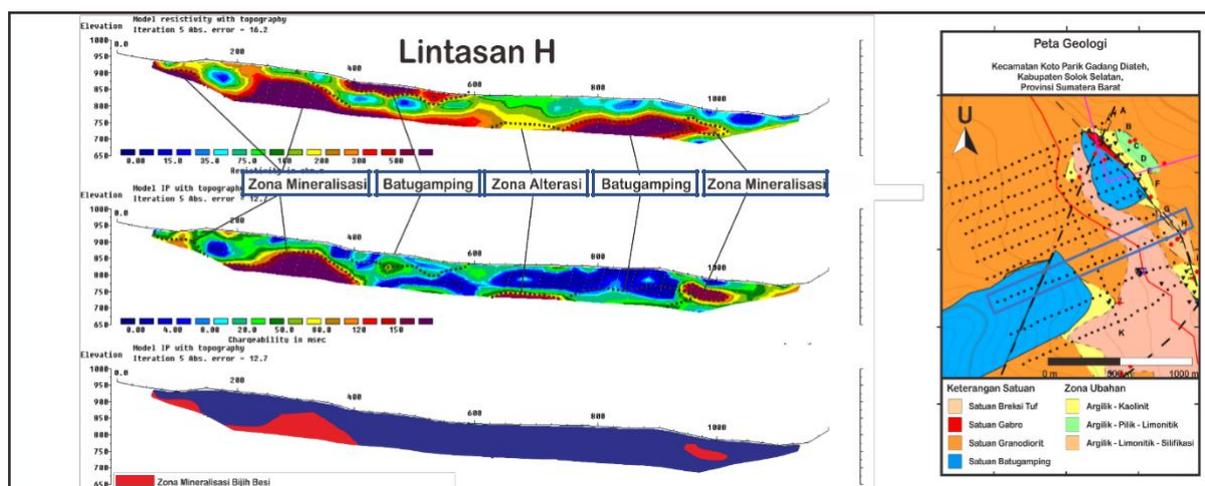
Pada lintasan K juga terdapat batuan beku di sepanjang titik 500 m hingga 650 m dengan elevasi 740 m yang memotong lintasan F di titik 700 m. Pada titik tersebut, respon yang diberikan berupa nilai resistivitas tinggi dan chargeabilitas rendah. Adanya batuan beku ini diperkirakan sebagai sumber fluida hidrotermal untuk proses mineralisasi di sekitarnya yang pada lintasan ini berada pada titik 650 m. Selain itu, pada titik 800 m hingga 1000 m yang memotong lintasan H titik 850 m juga terdapat variasi nilai resistivitas tinggi dan nilai chargeabilitas rendah yang diinterpretasikan sebagai batugamping. Lintasan K dan lintasan H tersebut memberikan respon yang sama, bahwa satuan batugamping ini diperkirakan merupakan kemenerusan dari satuan yang sama antara titik 400 m sampai dengan titik 600 m lintasan H.



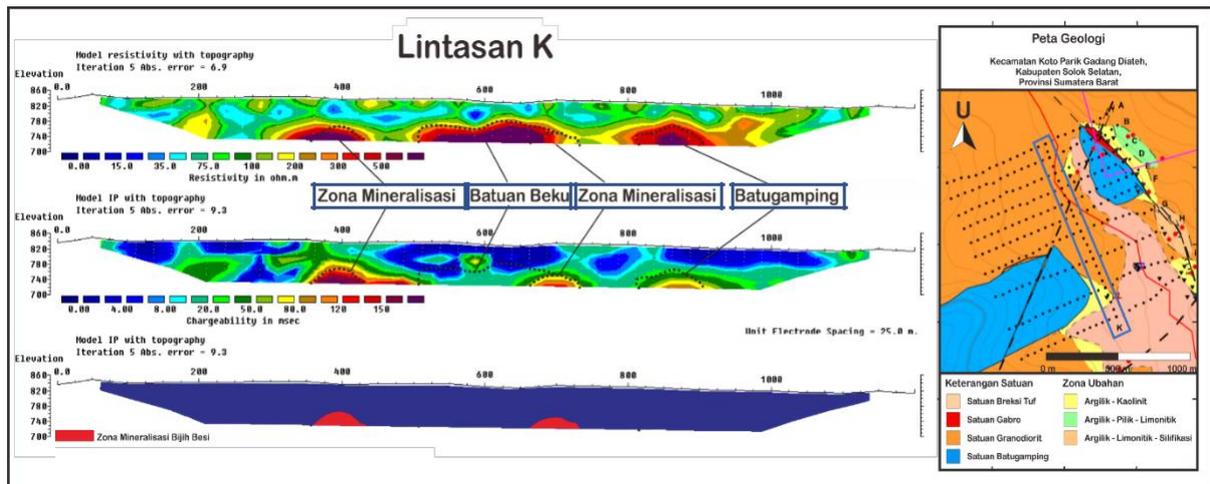
Gambar 8. Hasil interpretasi lintasan C



Gambar 9. Hasil interpretasi lintasan E



Gambar 10. Hasil interpretasi lintasan H



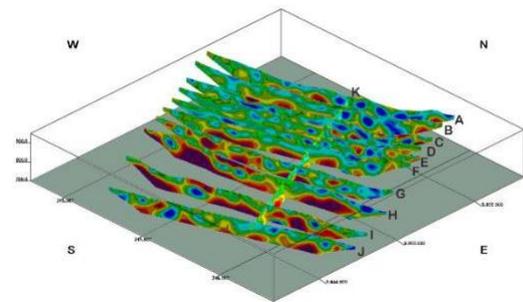
Gambar 11. Hasil interpretasi lintasan K

Setelah melakukan interpretasi hasil pemodelan 2D pada masing-masing lintasan, selanjutnya dilakukan pemodelan data dalam bentuk 3D berdasarkan nilai resistivitas dan nilai. Pemodelan 3D dilakukan untuk menentukan volume sebaran mineralisasi dan melihat kemenerusan zona mineralisasi dari masing-masing lintasan.

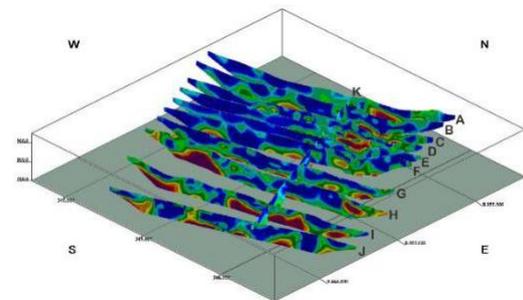
Pada korelasi penampang nilai resistivitas semua lintasan (Gambar 12), diketahui bahwa nilai resistivitas tinggi menerus pada setiap lintasan di bagian barat. Selain itu juga terdapat nilai resistivitas tinggi di bagian timurlaut yang diinterpretasikan sebagai intrusi batuan beku. Adanya intrusi tersebut berperan penting sebagai sumber fluida hidrotermal yang akan melewati rekahan kemudian mengubah komposisi mineral batuan samperinya.

Pada korelasi penampang nilai chargeabilitas semua lintasan (Gambar 13), terlihat bahwa nilai chargeabilitas tinggi berada pada bagian barat yang menerus dari lintasan G hingga lintasan J. Selain itu, di bagian timurlaut juga terlihat nilai chargeabilitas tinggi berada pada kontak antara Satuan Granodiorit dan Satuan Batugamping. Hal ini sesuai dengan informasi geologi bahwa endapan skarn besi terbentuk akibat adanya interaksi antara fluida magmatik dan meteorik yang berasal dari granodiorit

kemudian fluida tersebut berinteraksi dengan batugamping.



Gambar 12. Korelasi penampang nilai resistivitas semua lintasan



Gambar 13. Korelasi penampang nilai chargeabilitas semua lintasan

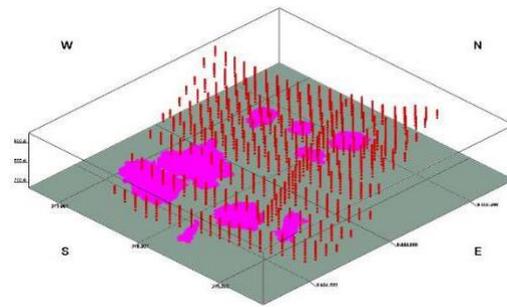
Berdasarkan hasil pemodelan 3D, terlihat adanya kemenerusan yang relatif berarah baratdaya – timurlaut. Kemenerusan tersebut diduga dikontrol oleh sesar geser mengiri yang berada pada daerah penelitian. Hal ini sesuai dengan informasi geologi bahwa mineralisasi terjadi akibat

adanya sesar geser mengiri yang mengontrol proses kontak antara batuan dengan intrusi magma yang menyebabkan masuknya larutan hidrotermal pada pori-pori batuan sehingga menyebabkan proses metasomatisme dan terjadi perubahan menyeluruh terhadap komposisi batuan tersebut.

Selain itu, dapat diketahui juga volume sebaran mineralisasi yang diduga mengandung bijih besi di bawah permukaan (Gambar 14). Estimasi besarnya volume zona mineralisasi di daerah ini hanya difokuskan pada zona endoskarn yang merupakan protolith terubah yang berasal dari batuan beku intrusif. Menurut Gautama (2018), penentuan volume dilakukan dengan cara menggabungkan data resistivitas dan chargeabilitas sebenarnya dari semua lintasan. Dalam penelitian ini nilai resistivitas dibatasi dengan nilai *cut off* $>500 \Omega\text{m}$ dan chargeabilitas >150 milisekon yang diduga sebagai zona terbentuknya mineralisasi bijih besi. Perhitungan volume tersebut didapatkan dalam satuan meter kubik (m^3).

Berdasarkan pengolahan tersebut, didapatkan volume sebaran mineralisasi yang diduga mengandung bijih besi pada daerah penelitian sebesar 864.000 m^3 .

Pembuatan sayatan horizontal bertujuan untuk mengetahui kemenerusan dari resistivitas dan chargeabilitas secara lateral, sehingga dapat diketahui kemenerusan dari zona yang dianggap menarik pada tiap kedalaman. Sayatan horizontal yang ditampilkan meliputi kedalaman 5 m, 25 m, 45 m, 74 m, dan 107 m yang dianggap dapat merepresentasikan zona menarik. Pada sayatan tersebut dilakukan tumpang susun dengan peta geologi guna mengetahui korelasi dari respon zona menarik dengan satuan litologi di daerah penelitian. Sayatan yang dibuat sesuai dengan topografi dari tiap lintasan.



Gambar 14. Korelasi persebaran zona mineralisasi bijih besi semua lintasan

Berdasarkan hasil sayatan per kedalaman (Gambar 15), pada kedalaman 5 m didominasi oleh nilai resistivitas rendah dan chargeabilitas rendah yang dapat diinterpretasikan sebagai lapisan soil. Anomali nilai resistivitas tinggi terlihat berada pada kontak antara satuan granodiorit dengan satuan batugamping dan berada pada jalur sesar geser di bagian baratdaya (lintasan H dan lintasan I). Nilai resistivitas tinggi juga terlihat pada kontak kedua satuan batuan tersebut yang berkorelasi dengan nilai chargeabilitas sedang di bagian timur laut (lintasan C, E). Selain itu juga terdapat nilai resistivitas tinggi dengan nilai chargeabilitas rendah yang hanya terdapat di satu titik saja (lintasan C). Pola anomali resistivitas tinggi pada satuan batugamping tersebut menerus hingga kedalaman 25 m. Nilai chargeabilitas tinggi yang berbentuk spot-spot dari kedalaman sebelumnya tidak menerus hingga kedalaman 25 m.

Pada kedalaman 45 m, nilai resistivitas tinggi mendominasi satuan batugamping di bagian barat daya dan satuan breksi tuf (lintasan G, lintasan H dan lintasan I). Sedangkan nilai chargeabilitas tinggi teramati pada satuan granodiorit (lintasan dan breksi tuf (lintasan H). Hal ini sesuai dengan informasi geologi bahwa alterasi mineral lempung dan oksida besi dengan teramati pada satuan breksi tuf. Mineral lempung dan oksida besi tersebut hadir menggantikan matriks dan fragmen serta tuf.

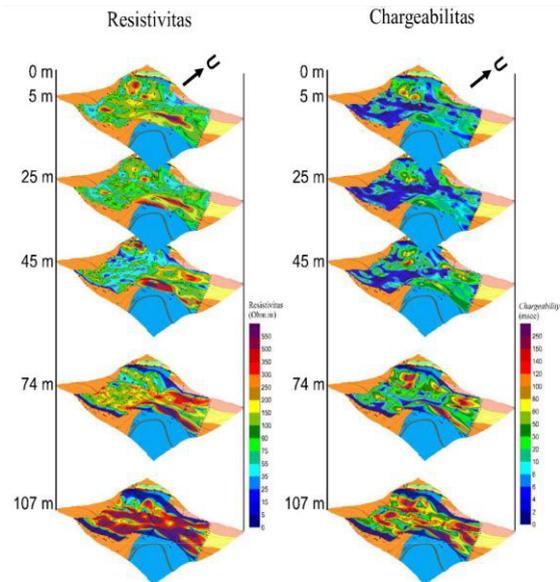
Pada kedalaman 74 m, respon resistivitas tinggi yang menerus dari kedalaman 45 m berkorelasi dengan nilai chargeabilitas tinggi yang diinterpretasikan sebagai zona mineralisasi. Zona tersebut berada pada kontak antara satuan granodiorit dengan satuan batugamping dan berada pada jalur sesar geser di bagian barat daya (lintasan H, I) dan di bagian timur laut (lintasan C, D). Adanya sesar tersebut diduga menjadi pengontrol mineralisasi. Sesar tersebut berperan untuk jalan masuknya larutan hidrotermal pada pori-pori batuan sehingga menyebabkan proses metasomatisme dan terjadi perubahan menyeluruh terhadap komposisi batuan tersebut. Nilai resistivitas tinggi juga terdapat pada satuan breksi tuf (lintasan G, lintasan H dan lintasan, I). Korelasi dengan nilai chargeabilitas tinggi berada pada spot-spot tertentu satuan breksi tuf (lintasan I).

Pada kedalaman 107 m, nilai resistivitas tinggi yang mendominasi daerah penelitian berkorelasi dengan nilai chargeabilitas tinggi yang menerus dari kedalaman 74 m. Pada kedalaman ini, nilai chargeabilitas terlihat menyebar secara lateral sepanjang sesar geser yang berarah baratdaya – timurlaut.

Respon tersebut sesuai dengan zona alterasi yang tertera pada peta geologi. Nilai chargeabilitas yang tinggi dapat disebabkan oleh banyaknya mineral lempung sebagai mineral terubahkan oleh proses alterasi. Berdasarkan hasil sayatan horizontal yang dikorelasikan dengan peta geologi, zona anomali resistivitas dan chargeabilitas tinggi yang mengindikasikan zona mineralisasi bijih besi banyak ditemukan pada satuan batugamping dan satuan granodiorit di bagian baratdaya dan timurlaut. Anomali yang diduga sebagai sebaran bijih besi tersebut jumlahnya semakin banyak seiring dengan bertambahnya kedalaman.

Berdasarkan pemodelan 3D, didapatkan potensi zona mineralisasi bijih besi pada area baratdaya cenderung lebih banyak jika dibandingkan dengan area timurlaut. Untuk keperluan eksploitasi di daerah

penelitian maka disarankan untuk memfokuskan kegiatan pertambangan pada area baratdaya dan timurlaut karena dari kedua area tersebut teramati adanya mineral logam sulfida (bijih besi, pirit, kalkopirit, malakit) yang dapat dijadikan petunjuk lokasi keterdapatn bijih besi yang diperkuat dengan data geofisika.



Gambar 15. Sayatan penampang resistivitas dan chargeabilitas per kedalaman

KESIMPULAN

Persebaran zona mineralisasi bijih besi berarah baratdaya – timurlaut dengan jumlah yang semakin bertambah seiring bertambahnya kedalaman dan diduga dikontrol oleh sesar geser mengiri di daerah penelitian.

Zona mineralisasi bijih besi ditunjukkan dengan nilai resistivitas relatif tinggi (>500 Ωm) dan chargeabilitas tinggi (>150 milisekon) pada zona endoskarn. Hasil perhitungan volume sebaran mineralisasi yang diduga mengandung bijih besi pada zona endoskarn tersebut mencapai sebesar 864.000 m³.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Pusat Sumber

Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang telah menyediakan waktu, tempat, dan data untuk melakukan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim survei Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang telah memberikan masukan dalam penelitian ini. Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu sehingga makalah ini dapat terselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Franklin, 2014, *Prospek untuk Menentukan Wilayah Pengeboran Eksplorasi Logam Besi dan Logam Lainnya di Ulu Suliti dan Tanjung Lima Kapas, Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatra Barat*, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.

Gautama, I.F.Y., Heditama, D.M., Muttaqin, Y.A., 2018, *Potensi Zona Urat Kuarsa Berdasarkan Analisis Geofisika dengan Metode Polarisasi Terinduksi di Daerah Olat Tanah Merah-Plampang, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat*, Buletin Sumber Daya Geologi Volume 13 Nomor 1.

Heditama, D.M., Sunuhadi, D.N., Muksin, I., 2019, *Pemutakhiran Data dan Neraca Sumber Daya Mineral*, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung.

Loke, M.H., 2004, *Tutorial : 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*, Geotomo Software Malaysia.

Muttaqin, Y.A., 2014, *Survei Polarisasi Terimbis (IP) dan Geomagnet Daerah Ulu Suliti dan Tanjung Lima Kapas, Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatra Barat*, Pusat Sumber Daya, Bandung.

Pirajno, F., 2009, *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*, Springer – Geological Survey of Western Australia, Perth, Australia Barat.

Reynolds, J.M., 2011, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Willey-Blackwell, Chichester.

Rosidi, H.M.D., Tjokrosapoetro, S., Pendowo, B., Gafoer, S., Suharsono, 1996, *Peta Geologi Lembar Painan Sumatra*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Supriyanto, 2007, *Analisis Data Geofisika: Memahami Teori Inversi*, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Depok.

Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, E., 1990, *Applied Geophysics*, Cambridge University Press, Cambridge.

Van Bemmelen, R.W., 1949, *The Geology of Indonesia*, vol. 1A, General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes, ed. 2nd, Martinus Nijhoff, The Hague, Netherlands.

Diterima	: 4 September 2020
Direvisi	: 28 September 2020
Disetujui	: 28 November 2020

**KARAKTERISTIK ALTERASI DAN TEKSTUR URAT KUARSA PADA PIT BARANI,
CEBAKAN EMAS MARTABE, KABUPATEN TAPANULI SELATAN,
PROVINSI SUMATRA UTARA**

**ALTERATION AND QUARTZ-VEIN TEXTURES CHARACTERISTIC AT BARANI PIT OF
MARTABE GOLD DEPOSITS, SOUTH TAPANULI REGENCY,
NORTH SUMATRA PROVINCE**

**Nada Salsabila Deva¹, Euis Tintin Yuningsih¹, Kurnia Arfiansyah Fachrudin¹,
Nur Afrianti Saala², dan Ade Triyunita²**

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran,

²PT. Agincourt Resources Martabe

nada16005@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Pit Barani merupakan bagian dari wilayah kontrak karya PT Agincourt Resources yang terletak di Kelurahan Aek Pining, Kecamatan Batangtoru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatra Utara. *Pit Barani* berupa tambang terbuka, dengan tipe cebakan epitermal berupa urat-urat yang menjadi tempat konsentrasi lebih banyak unsur logam. Penelitian bertujuan untuk mengetahui karakteristik alterasi dan variasi tekstur urat kuarsa yang banyak terdapat pada daerah *Pit Barani* dan mengidentifikasi tekstur urat kuarsa pembawa mineralisasi yang ekonomis. Pengambilan conto batuan dilakukan pada saat pemetaan *pit* dan identifikasi mineral alterasi menggunakan analisis laboratorium berupa *analytical spectral devices* (ASD), serta analisis geokimia untuk mengetahui kadar unsur Au, Ag, dan Cu. Hasil penelitian menunjukkan zona alterasi yang berkembang terdiri dari zona alterasi argilik (kaolinit+illit+smektit), argilik lanjut (kuarsa+kaolinit+dikit), dan silisifikasi (kuarsa+kalsedon+kaolinit). Tekstur urat kuarsa yang berkembang pada daerah penelitian terdiri dari masif, *crustiform*, *crustiform-colloform*, *brecciated*, *bladed*, dan *saccharoidal*. Tekstur urat kuarsa pembawa mineralisasi dengan kadar emas tinggi berupa *crustiform-colloform*, *banded* diikuti oleh *massive quartz oxide*, dan *lattice bladed*. Urat kuarsa tersebut berasosiasi dengan mineral lempung kaolinit+dikit dengan tingkat oksidasi sedang sampai tinggi, serta berasosiasi dengan sulfida abu-abu yang mengandung kadar tertinggi mencapai Au 76,65 ppm dan Ag 34 ppm.

Kata kunci: alterasi, argilik lanjut, *crustiform-colloform banded*, mineralisasi, tekstur kuarsa

ABSTRACT

Barani Pit is part of the PT Agincourt Resources Contract of Work, located in Aek Pining Village, Batangtoru District, South Tapanuli Regency, North Sumatra. The Barani Pit is an open pit mine, with epithermal deposit type in the form of veins which host for more concentration of metal elements. This study aims to find out the alteration characteristics and texture variations of quartz veins that are abundant in the Barani Pit area and to identify the texture of quartz veins carrying economic mineralization. The pit mapping method is used to get samples, and alteration mineral identification using analytical spectral devices (ASD), as well as geochemical analysis to determine grade content of Au, Ag, and Cu elements. The results showed that the developing alteration zone consisted of argillic (kaolinite+illite+smectite), advanced argillic (quartz+kaolinite+dickite), and silicification (quartz+chalcedony+kaolinite). Quartz textures of the veins that developed in the study area consisted of massive quartz, crustiform, crustiform-colloform, brecciated, bladed, and saccharoidal. The texture of mineralization bearing veins with high grade gold content were crustiform-colloform, banded,

followed by massive quartz oxide, and lattice bladed. These veins are associated with kaolinite + dickite clay minerals, moderate to high oxidation states, and are associated with grey sulphides containing high grade up to Au 76.65 ppm and Ag 34 ppm.

Keywords: alteration, advanced argillic, crustiform-colloform, banded, mineralization, quartz texture

PENDAHULUAN

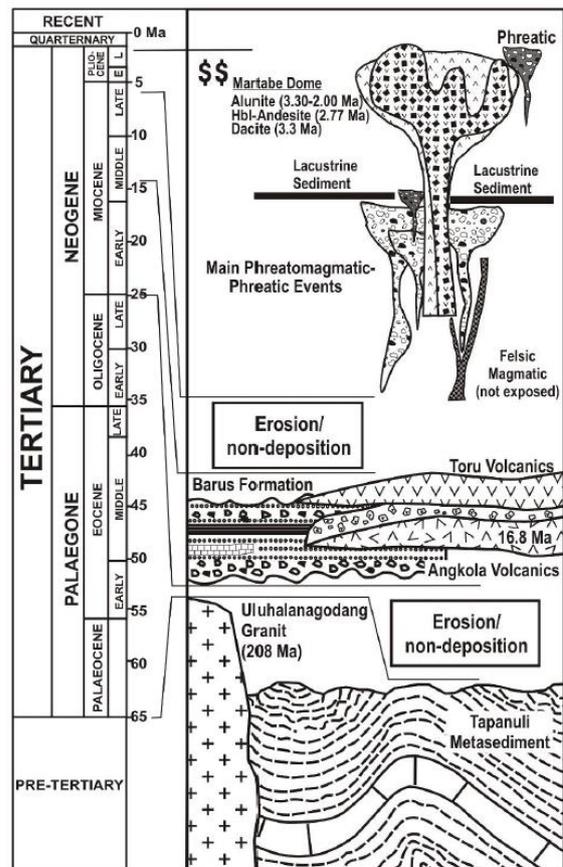
Daerah penelitian berada pada *Pit Barani* yang merupakan tambang emas terbuka pada wilayah kontrak karya PT Agincourt Resources di Kecamatan Batang Toru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatra Utara. Wilayah Martabe terletak pada fisiografi Barisan Barat, yang meliputi zona subduksi pada bagian barat dan Bukit Barisan pada bagian timur di Sumatra Utara. Wilayah ini terletak dalam Sistem Sesar Sumatra yang secara lokal dikenal sebagai Sesar Sibolga dan Sesar Angkola-Gadis, serta zona pengangkatan secara struktural pada batuan meta-sedimen, batuan sedimen, vulkanoklastik, dan batuan vulkanik. Aktivitas tektonik diperkirakan sebagai penyebab terbentuknya endapan hidrotermal, magmatisme multi fase, pembentukan breksi freatik dan freatomagmatik serta cebakan emas Martabe.

Pit Barani terletak pada bagian selatan wilayah kontrak karya, endapan ini memiliki tipe mineralisasi berupa urat sebagai tempat konsentrasi lebih banyak unsur logam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tipe alterasi dan tekstur urat kuarsa pembawa mineralisasi pada daerah penelitian.

GEOLOGI REGIONAL

Wilayah Martabe terletak pada cekungan busur depan dengan zona subduksi pada bagian barat dan vulkanisme aktif di sepanjang sisi timur Bukit Barisan. Magmatisme multifase dan periode sedimentasi berlangsung pada daerah ini. Menurut Sutopo (2013) stratigrafi daerah ini dapat dibagi menjadi beberapa unit utama yaitu : meta-sedimen karbonan kelompok Tapanuli Paleozoikum, Granit Uluhala Nagodang Mesozoikum, Sedimen

Barus-Vulkanik Angkola Tersier, Kubah Dasit-Andesit dan Kompleks Diatreme Tersier Akhir (Gambar 1).



Gambar 1. Stratigrafi daerah Martabe (Sutopo, 2013)

Patahan utama pada wilayah Martabe ditafsirkan dari kelurusan dan dari pemetaan dengan arah barat-laut, utara-barat-laut hingga utara-timurlaut dan timur-timurlaut (Davies, 2002).

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian meliputi pemetaan *pit*, pengambilan contoh batuan permukaan dan bawah permukaan, analisis spektral, dan analisis geokimia. Pemetaan *pit* dilakukan dengan

memetakan singkapan batuan, alterasi dan mineralisasi, serta pengamatan tekstur urat kuarsa. Saat pemetaan lapangan, dilakukan pengambilan contoh batuan untuk kemudian dilakukan analisis spektra dan analisis geokimia. Pengambilan contoh batuan dan urat kuarsa pada bawah permukaan diambil dari tujuh lubang bor batuan inti.

Analisis spectral yang dilakukan berupa *Analytical Spectral Device* (ASD) mempergunakan alat *portable* yang dilakukan di Laboratorium Eksplorasi PT Agincourt Resources, untuk mengidentifikasi mineral lempung dan mineral yang mengandung gugus (OH), dengan pembacaan harga panjang gelombang setiap mineral yang dikenai sinar *infrared* pada sensor. Analisis geokimia yang digunakan berupa uji *fire assay*, untuk mengetahui kandungan unsur logam ekonomis pada batuan, khususnya Au, Ag, dan Cu. Uji *fire assay* dilakukan di Laboratorium Eksplorasi PT Agincourt Resources terhadap 55 contoh batuan dan urat kuarsa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian dibedakan menjadi lima satuan batuan dengan urutan dari tua ke muda, yaitu: satuan batupasir, satuan konglomerat, satuan breksi vulkanik, dan satuan breksi freatomagmatik (Gambar 2).

Satuan Batupasir

Litologi terdiri atas batupasir, dan setempat terdapat perselingan batupasir dengan batulanau. Batupasir halus berwarna abu-abu muda sampai abu-abu kuning kemerahan, ukuran butir pasir halus sampai pasir sedang, membundar, terpilah baik, kemas tertutup, pola alterasi *selective pervasive* sampai *pervasive*, intensitas alterasi sedang. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit dan dikit, mineral oksida hematit dan gutit, serta terdapat pirit pada beberapa tempat (Gambar 3a).

Satuan Konglomerat

Litologi terdiri atas perselingan konglomerat dengan batupasir. Konglomerat berwarna abu-abu tua kecoklatan, fragmen berupa kuarsa berbutir kasar, batupasir dan batulanau, dengan matriks batupasir. Bentuk fragmen membundar tanggung sampai menyudut tanggung, ukuran fragmen berangkal sampai butiran, terpilah buruk, dan kemas terbuka. Pola alterasi *selective pervasive*, dengan intensitas alterasi sedang sampai tinggi, silisifikasi, dan pada beberapa bagian teroksidasi sedang. Mineral oksida berupa hematit dan gutit (Gambar 3b).

Satuan Breksi Vulkanik

Breksi vulkanik berwarna putih kemerahan sampai putih merah kecoklatan. Monomik, andesitik klastik dengan matriks tuf. Bentuk fragmen menyudut sampai membundar tanggung, ukuran fragmen berangkal sampai kerikil, terpilah buruk, dan kemas terbuka. Batuan sudah teroksidasi kuat, pola alterasi *selective pervasive* sampai *pervasive*, intensitas alterasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dikit, dan mineral oksida hematit dan gutit (Gambar 3c).

Satuan Breksi Freatomagmatik

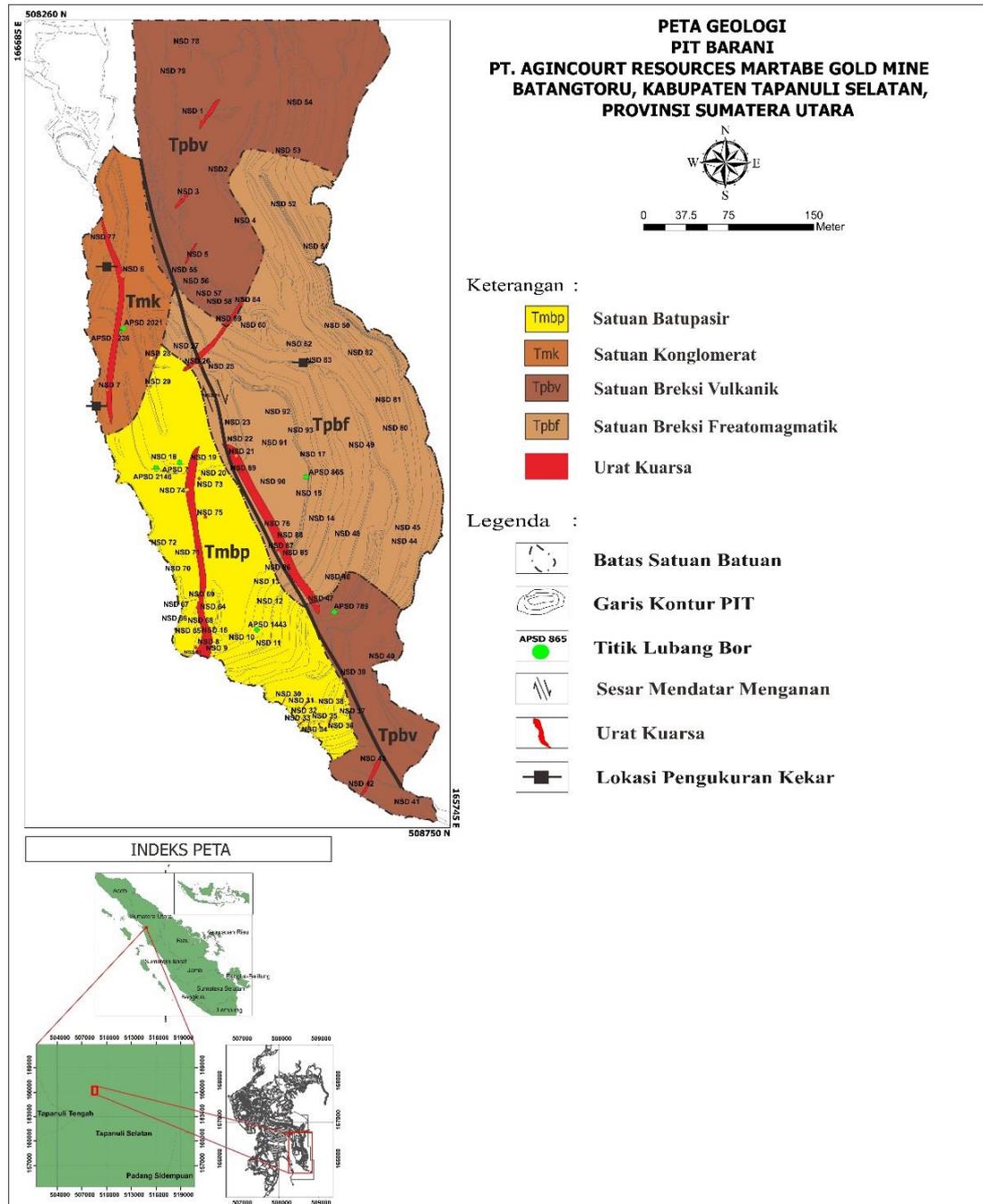
Breksi freatomagmatik berwarna abu-abu sampai merah kecoklatan. Fragmen berupa kuarsa, batuan andesitik, klastik vulkanik, dengan matriks pasiran. Bentuk fragmen menyudut sampai membundar tanggung, ukuran fragmen bongkah sampai kerakal, terpilah buruk, dan kemas terbuka. Tingkat oksidasi sedang sampai kuat, pola alterasi *selective pervasive* sampai *pervasive*, dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat. Alterasi mineral lempung berupa illit, smektit, kaolinit, dan dikit, dan mineral oksida jarosit, hematit, dan gutit. Pada beberapa tempat terdapat *accretionary ball* (Gambar 3d).

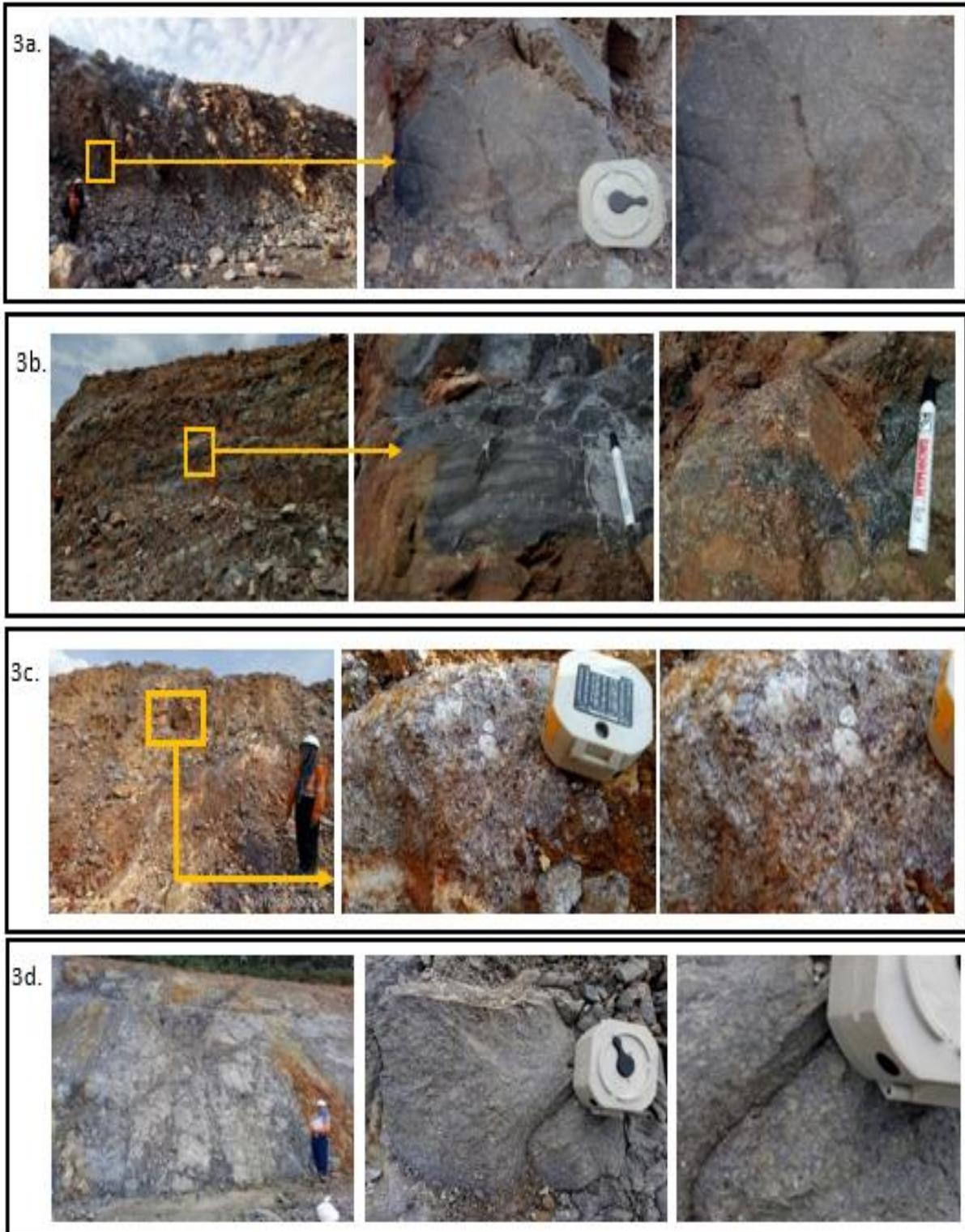
Zonasi Alterasi Daerah Penelitian

Berdasarkan pemetaan lapangan dan analisis ASD dari beberapa contoh batuan,

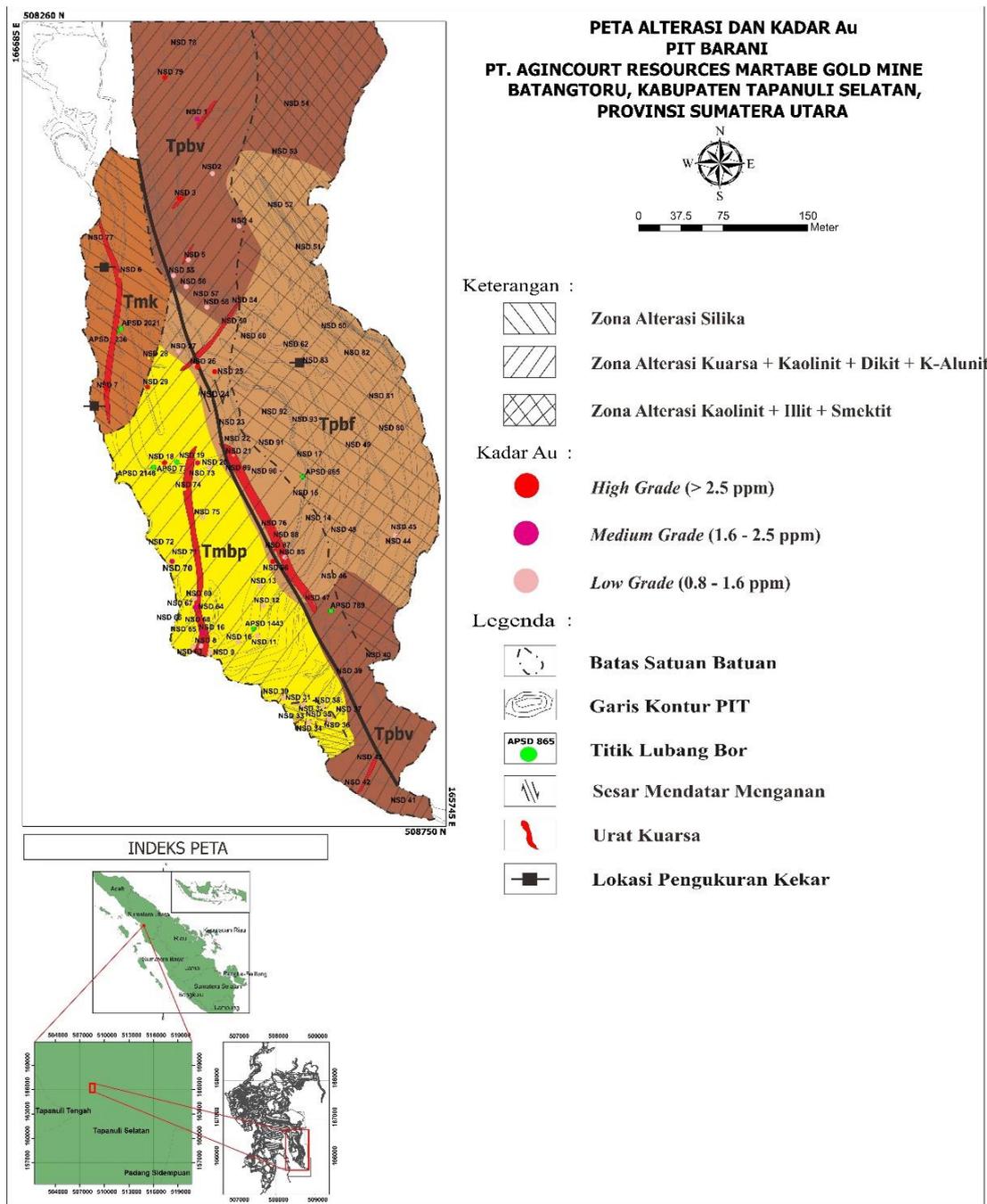
menunjukkan mineral lempung berupa kaolinit, illit, smektit, dan *minor* alunit sebagai penciri suatu zona alterasi yang terdapat pada daerah penelitian. Zona alterasi yang berkembang pada daerah

penelitian terbagi menjadi tiga, yaitu : zona alterasi silika, zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit+k-alunit, dan zona alterasi kaolinit+illit+smektit (Gambar 4).





Gambar 3. Singkapan batuan yang terdapat pada *Pit Barani*.
 3a. Batupasir pada titik pengamatan NSD 18,
 3b. Konglomerat pada titik pengamatan NSD 6,
 3c. Breksi vulkanik pada titik pengamatan NSD 01,
 3d. Breksi freatomagmatik pada titik pengamatan NSD 82.



Gambar 4. Peta sebaran zona alterasi dan kadar Au pada *Pit Baran*.

Zona Alterasi Silika

Zona alterasi silika berwarna abu-abu sampai abu-abu tua kecoklatan, mineral alterasi berupa kuarsa dan kalsedon, terjadi penambahan atau masuknya silika oleh larutan hidrotermal (Gambar 5a). Mineralisasi pada zona alterasi ini berupa diseminasi pirit halus dan urat kuarsa. Tingkat oksidasi lemah sampai sedang, dengan mineral oksida berupa gutit dan hematit. Zona alterasi ini dibandingkan

dengan zona alterasi silisifikasi yang terbentuk pada temperatur 150° – 200°C (Hedenquist, dkk, 1998), dengan kondisi pH <2 (Corbet and Leach, 1997).

Analisis ASD yang dilakukan pada conto batuan permukaan NSD 31, litologi batupasir silisifikasi menunjukkan mineral silika dan mineral oksida berupa gutit (Gambar 6a).

Zona Alterasi Kuarsa+Kaolinit+Dikit+K-Alunit

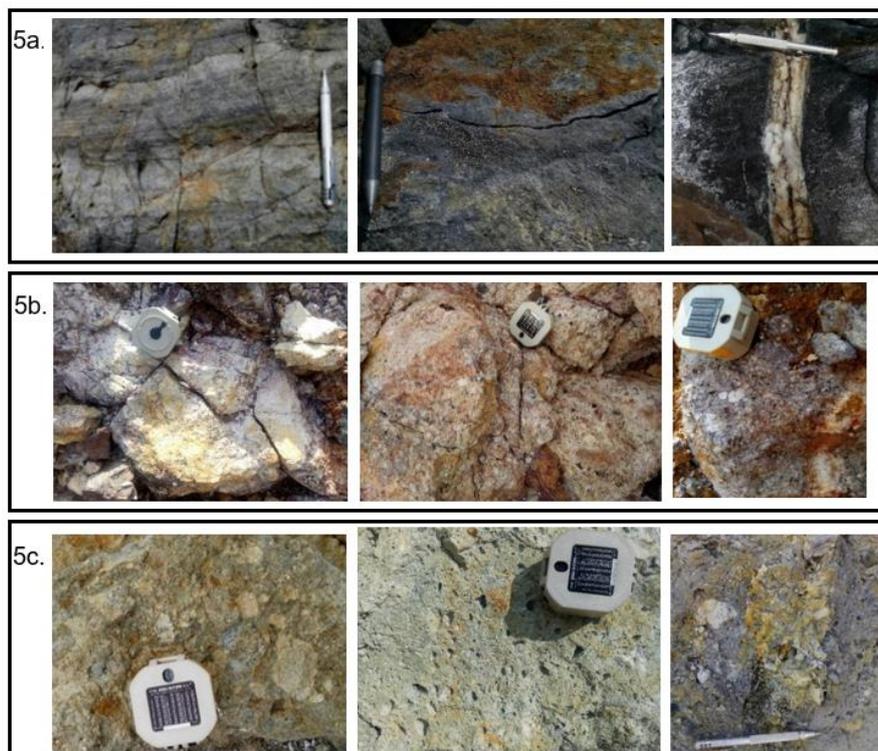
Zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit+k-alunit terdiri dari batuan berwarna putih keabuan sampai abu-abu kemerahan, mineral alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dicit, dan setempat alunit (Gambar 5b). Mineralisasi pada zona alterasi ini berupa diseminasi pirit, sulfida abu-abu, dan urat kuarsa. Tingkat oksidasi sedang sampai kuat, dengan mineral oksida berupa gutit dan hematit. Zona alterasi ini dibandingkan dengan zona alterasi argilik lanjut yang terbentuk pada temperatur 150° – 200°C (Hedenquist, dkk, 1998), dengan kondisi pH asam yaitu 4 (Corbet and Leach, 1997).

Analisis ASD dilakukan pada conto batuan permukaan NSD 70 litologi batupasir dan NSD 16 litologi breksi freatomagmatik. Pada litologi breksi freatomagmatik menunjukkan mineral lempung berupa

kaolinit terkristalisasi baik dan k-alunit. Sedangkan pada litologi batupasir menunjukkan mineral lempung berupa kaolinit terkristalisasi baik, dicit, serta mineral oksida berupa hematit dan gutit (Gambar 6b).

Zona Alterasi Kaolinit+Iilit+Smektit

Zona alterasi kaolinit+ilit+smektit terdiri dari batuan berwarna abu-abu muda sampai abu-abu kekuningan, mineral alterasi berupa mineral lempung kaolinit, ilit, dan smektit (Gambar 5c). Mineralisasi pada zona alterasi ini berupa diseminasi pirit dan urat kalsit setempat. Tingkat oksidasi sedang sampai kuat, dengan mineral oksida berupa jarosit dan beberapa tempat limonit. Zona alterasi ini dibandingkan dengan zona alterasi argilik yang terbentuk pada temperatur 150° – 250°C (Hedenquist, dkk, 1998), dengan kondisi pH 4-6 (Corbet and Leach, 1997).



Gambar 5. Batuan teralterasi pada daerah penelitian. 5a. Alterasi silika yang terdapat pada litologi perselingan batupasir dengan konglomerat dan litologi batupasir yang telah mengalami silisifikasi, terdapat pirit dan setempat urat kuarsa pada titik pengamatan NSD 6, 5b. Alterasi kuarsa+kaolinit+dikit+k-alunit yang terdapat pada litologi breksi vulkanik pada NSD 2, 5c. Alterasi kaolinit+ilit+smektit yang terdapat pada litologi breksi freatomagmatik pada NSD 81

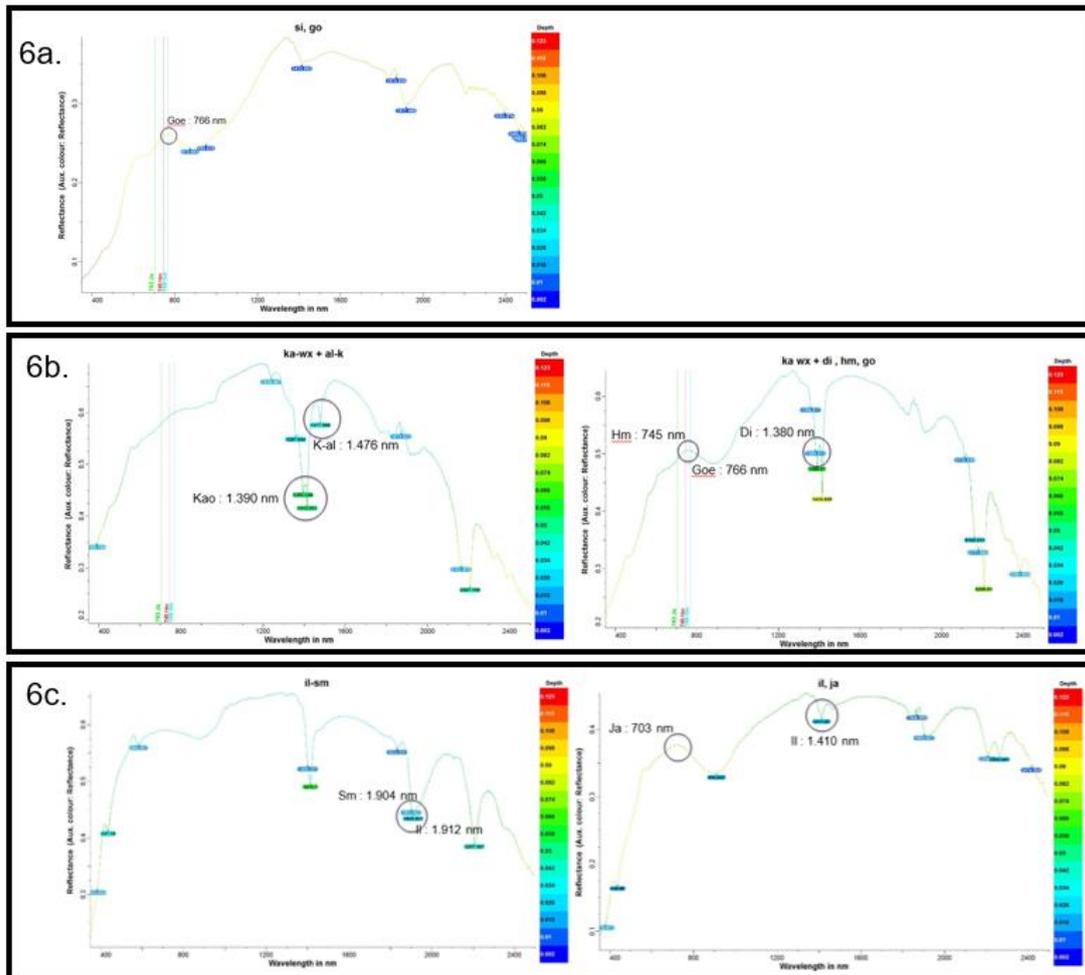
Analisis ASD yang dilakukan pada conto batuan permukaan NSD 48 litologi breksi freatomagmatik menunjukkan mineral lempung berupa illit dan smektit, serta mineral oksida berupa jarosit (Gambar 6c).

Karakteristik Tekstur Urat Kuarsa Pada Pit Barani

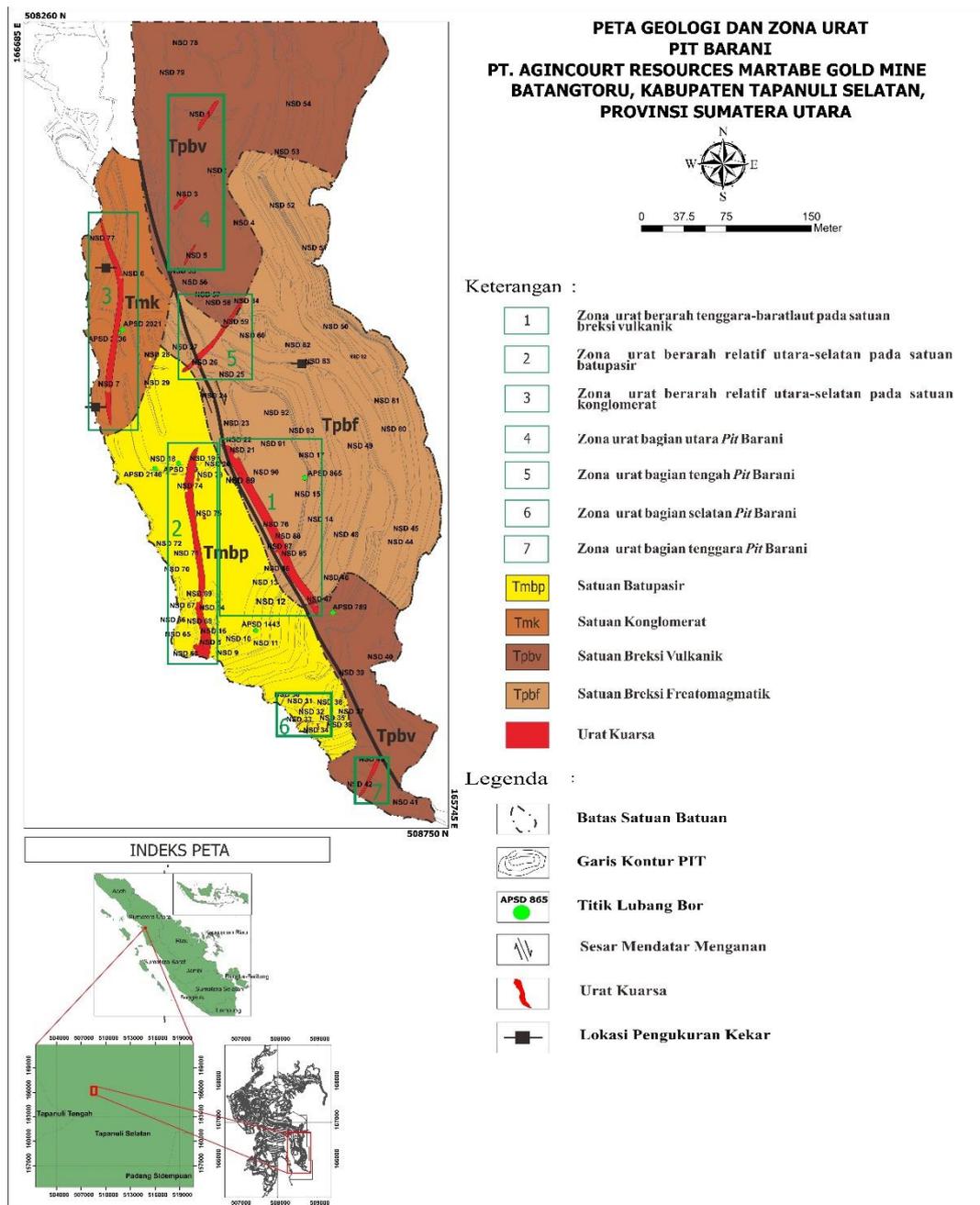
Pengambilan dan pengamatan conto urat dilakukan pada permukaan Pit Barani dan beberapa titik lubang bor yang telah ditentukan. Pada Pit Barani terdapat tujuh zona urat (Gambar 7). Arah urat pada daerah penelitian mengikuti segmen patahan dari Sistem Sesar Sumatra yang berarah tenggara-baratlaut.

Zona Urat berarah tenggara-baratlaut pada satuan breksi vulkanik dan breksi freatomagmatik

Urat memiliki arah umum N170°E, dengan *dip* 72°. Dimensi urat dengan panjang mencapai 15 m dan lebar 8 m. Urat kuarsa terdapat pada litologi breksi vulkanik dan breksi freatomagmatik dengan intensitas alterasi kuat, pola alterasi *pervasive* sampai *selective pervasive*, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dikit, k-alunit, mineral oksida berupa hematit, gutit, dan setempat jarosit. Tekstur kuarsa yang berkembang adalah tekstur *crustiform banded quartz with oxide*, dan *crustiform-colloform* yang terdapat pada dinding Pit Barani.



Gambar 6. Spektrum pembacaan mineral lempung. 6a. Menunjukkan mineral gutit pada titik pengamatan NSD 31, 6b. Mineral kaolinit terkristalisasi baik, dikit, k-alunit, hematit, dan gutit pada titik pengamatan NSD 70 dan NSD 16, 6c. Mineral illit, smektit, dan jarosit pada titik pengamatan NSD 48



Gambar 7. Peta geologi dan zona urat pada Pit Barani

Zona urat berarah relatif utara – selatan pada satuan batupasir

Urut memiliki arah umum N195°E, dengan *dip* 75°. Dimensi urat dengan panjang mencapai 9 m dan lebar 3 m. Urut kuarsa terdapat pada litologi batupasir dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat, pola alterasi *pervasive* sampai *selective pervasive*, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dikit, k-alunit, mineral oksida berupa hematit dan gutit. Tekstur

kuarsa yang berkembang adalah tekstur *custiform banded* dan *crustiform-colloform* yang terdapat pada bagian dinding Pit Barani.

Zona urat berarah relatif utara – selatan pada satuan konglomerat

Urut memiliki arah umum N170°E, dengan *dip* 42°. Dimensi urat dengan panjang mencapai 12 m dan lebar 5 m. Urut kuarsa terdapat pada litologi perselingan batupasir dan konglomerat dengan intensitas alterasi

lemah sampai sedang, pola alterasi *pervasive*, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi silisifikasi, mineral oksida berupa hematit dan gutit. Tekstur kuarsa yang berkembang adalah *brecciated*, *saccharoidal*, dan *massive oxide quartz* yang terdapat pada dinding *Pit Barani*.

Urut bagian utara *Pit Barani*

Urut pada bagian utara memiliki arah umum N210°E, dengan *dip* 68°. Dimensi urut dengan panjang 4,2 m dan lebar 2,2 m, dan *veinlets* dengan lebar maksimum 30 cm. Urut kuarsa terdapat pada litologi breksi vulkanik dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat, pola alterasi *selective pervasive* sampai *pervasive*, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dikit, k-alunit, mineral oksida berupa hematit dan gutit, setempat terdapat mineral jarosit. Tekstur kuarsa yang berkembang adalah *custiform banded quartz with oxide* dan terdapat *bladed quartz* pada dinding *Pit Barani*.

Urut bagian tengah *Pit Barani*

Urut pada bagian tengah *Pit Barani* memiliki arah umum N210°E, dengan *dip* 65°. Dimensi panjang urut mencapai 4,2 m dan lebar 2,2 m, serta terdapat *veinlets* dengan dimensi maksimum 10 cm. Urut kuarsa terdapat pada litologi breksi vulkanik dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat, pola alterasi *pervasive* sampai intens, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit dan dikit, mineral oksida berupa hematit dan gutit. Tekstur kuarsa masif pada dinding *Pit Barani*.

Urut bagian selatan *Pit Barani*

Urut pada bagian selatan *Pit Barani* memiliki arah umum N210°E, dengan *dip* 65°. Dimensi panjang urut mencapai 4,2 m dan lebar 2,2 m. Urut kuarsa terdapat pada litologi batupasir dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat, pola alterasi *pervasive* sampai intens, intensitas oksidasi sedang sampai kuat. Alterasi berupa mineral lempung kaolinit, dikit, mineral oksida didominasi oleh hematit dan

gutit. Tekstur kuarsa yang dijumpai adalah masif dan *massive oxide quartz* pada dinding *Pit Barani*.

Urut bagian tenggara *Pit Barani*

Urut pada bagian tenggara *Pit Barani* memiliki arah umum N210°E, dengan *dip* 65°. Dimensi panjang mencapai 4,2 m dan lebar 2,2 m. Urut kuarsa terdapat pada litologi breksi vulkanik yang sudah mengalami alterasi dengan intensitas alterasi sedang sampai kuat, pola alterasi *pervasive*, intensitas oksidasi sedang sampai kuat, mineral oksida didominasi oleh hematit, gutit, dan setempat jarosit, sedangkan mineral lempung berupa kaolinit dan dikit. Tekstur kuarsa yang dijumpai adalah masif pada dinding *Pit Barani*.

Urut kuarsa pada daerah penelitian terdapat pada alterasi silisifikasi (zona alterasi silika) dan argilik lanjut (zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit), dimana proses penambangan dominan dilakukan pada zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit (argilik lanjut), oksidasi yang berkembang pada zona alterasi tersebut memiliki tingkat oksidasi sedang sampai kuat, dengan mineral oksida berupa hematit, gutit, dan setempat jarosit.

Hasil pengamatan tekstur yang dilakukan dari pengamatan permukaan pada lapangan dan beberapa titik lubang bor menunjukkan tekstur urut yang cukup beragam. Hasil pengamatan megaskopis menunjukkan tekstur mulai dari masif, *crustiform banded*, *crustiform-colloform*, *brecciated*, *lattice bladed*, dan *saccharoidal*.

• Masif

Kenampakan tekstur masif mencirikan adanya pengendapan larutan silika hidrotermal yang homogen tanpa adanya tekstur lain seperti *banding dan* rekahan (Dong, dkk, 1995). Urut kuarsa masif berwarna putih, putih kecoklatan, komposisi mineral terdiri dari kuarsa, mengalami oksidasi yang cukup tinggi, mengandung Au 95 ppm, Ag 2 ppm dan Cu 4 ppm (Gambar 8a).

- *Crustiform*

Tekstur ini memiliki kenampakan perlapisan yang simetris, sempit, dan berulang hingga beberapa sentimeter (Dong, dkk, 1995). Hal ini mengindikasikan adanya perbedaan tekstur, proporsi mineral atau warna. Tekstur *Crustiform* berwarna putih kekuningan sampai krem dengan komposisi mineral kuarsa dan kalsedon yang mengandung kadar mencapai Au 8.76 ppm, Ag 1 ppm, dan Cu 16 ppm (Gambar 8e).

- *Crustiform – Colloform*

Tekstur *crustiform* memiliki kenampakan perlapisan yang simetris, sempit, dan berulang. Sebagai indikasi adanya perubahan pada kondisi fluida hidrotermal saat pembentukan urat, sehingga akan membentuk tekstur mineral seperti ukuran butir, warna, dan proporsi mineral yang berbeda. Tekstur *colloform* mengindikasikan larutan silika berupa gel dari mineral kalsedon yang memiliki butir sangat halus (Dong, dkk, 1995). Tekstur *crustiform-colloform* berwarna putih keabu-abuan sampai krem kecoklatan, komposisi mineral kuarsa, kuarsa mikrokristalin, kalsedon, dan lineasi sulfida abu-abu, setempat sudah mengalami oksidasi dengan kandungan kadar tinggi mencapai Au 76,65 ppm, dan Ag 34 ppm (Gambar 8 c,d).

- *Brecciated*

Rekahan pada batuan sampling diakibatkan oleh pertemuan fluida bersuhu tinggi dengan fluida yang bersuhu lebih rendah yang menyebabkan tekanan menjadi tinggi dan menghancurkan batuan sampling yang dilewatinya (Dowling dan Morrison, 1990). Tekstur terbreksikan berwarna abu-abu kecoklatan, komponen berupa batupasir, batulempung, dengan matriks kuarsa. Kadar yang didapatkan pada tekstur terbreksikan Au 0,92 ppm, Ag 2 ppm, dan Cu 4 ppm (Gambar 8f).

- *Bladed*

Tekstur *lattice bladed* tergolong tekstur pergantian, menurut Morrison, dkk, (1990) tekstur ini erat kaitannya dengan kondisi

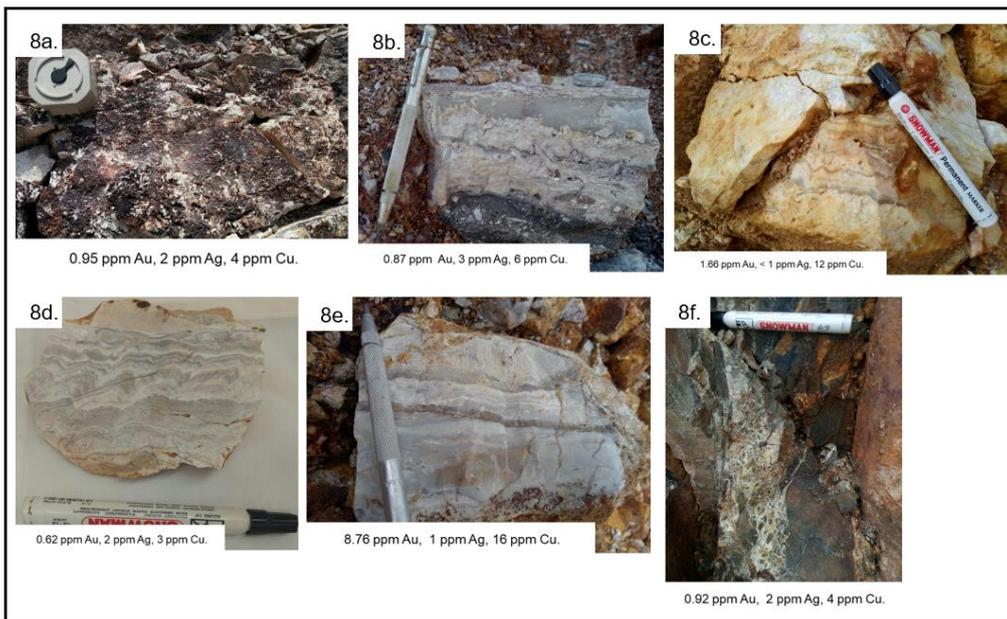
boiling yang terjadi pada suatu sistem geotermal. Proses penggantian berkaitan dengan terjadinya pencampuran fluida meteorik bersuhu lebih rendah dengan CO₂ yang dibebaskan dari larutan hidrotermal ketika mengalami pendidihan. Tekstur *bladed* berwarna putih sampai coklat tua, berupa kuarsa akibat kondisi *boiling* dengan kadar Au 0,87 ppm, Ag 3 ppm, dan Cu 6 ppm (Gambar 8b).

Tekstur urat pada daerah penelitian terbagi menjadi dua yaitu, tekstur pertumbuhan primer dan tekstur penggantian. Tekstur pertumbuhan primer dicirikan dengan tekstur masif, *crustiform*, dan *crustiform-colloform*, sedangkan tekstur penggantian dicirikan dengan tekstur *lattice bladed*, dan *saccharoidal*.

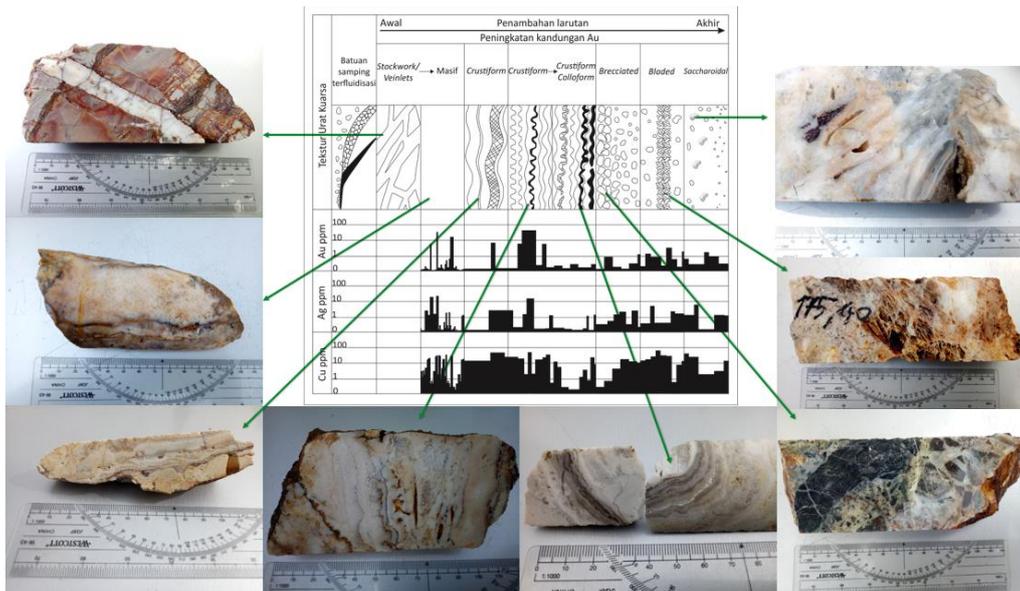
Tekstur masif mengindikasikan proses pembentukan yang terjadi dalam satu kali periode. Secara umum, setiap proses dapat menyebabkan perubahan kondisi dan terbentuk *crustiform* secara sederhana. Proses tersebut termasuk pendinginan, pencampuran dua fluida, dan reaksi antara fluida dengan batuan sampling. Untuk menghasilkan *banding crustiform* yang kompleks diperlukan banyak perubahan berulang dalam komposisi mineralnya atau penurunan tekanan, dimana penurunan tekanan ini akan memungkinkan cairan mendidih, mengakibatkan hilangnya gas, pendinginan, kelarutan pH, presipitasi mineral lain dan *gangue*. Tekstur *colloform* disebabkan oleh adanya kristalisasi dari gel silika, dimana mengalirnya atau berpindahnya zat pengotor yang sangat lambat dibandingkan dengan laju pertumbuhan kristal, kemudian melekat pada batuan sampling atau urat kuarsa. Tekstur *crustiform-colloform* terjadi akibat banyaknya perubahan berulang dalam komposisi mineralnya, penurunan tekanan, yang akan memungkinkan cairan mendidih, mengakibatkan terjadinya presipitasi mineral lain dan *gangue*. Tekstur *saccharoidal* merupakan hasil dari penggantian kalsit yang didistribusikan secara acak yang akhirnya saling mengikat dan membentuk tekstur *saccharoidal*.

Variasi tekstur urat pada daerah penelitian merepresentasikan proses-proses hidrotermal tertentu selama pembentukan endapan bijih (Gambar 9). Tahap awal terbentuknya endapan hidrotermal dicirikan dengan pembentukan urat-urat kuarsa bertekstur masif. Tahap pertengahan dicirikan dengan pembentukan urat yang diawali dengan tekstur *crustiform*, kemudian *crustiform-colloform*, dan diakhiri

dengan tekstur terbreksikan. Mineralisasi terutama Au-Ag terjadi secara efektif pada tahap ini. Endapan hidrotermal tahap akhir dicirikan dengan pembentukan tekstur *bladed*, dan *saccharoidal*. Tahap supergen dicirikan dengan proses penggantian akibat oksidasi mineral yang terbentuk, tahap ini diinterpretasikan sebagai tahap terakhir dari proses mineralisasi di daerah penelitian.



Gambar 8. Tekstur urat kuarsa pada *Pit Barani*, 8a. Kuarsa masif yang terdapat pada titik pengamatan NSD 7, 8b. *Bladed texture* pada NSD 21, 8c-d. *Crustiform-colloform texture* pada NSD 9 dan NSD 69, 8e. *Crustiform texture* pada NSD 63, dan 8f. *Brecciated texture* pada NSD 7



Gambar 9. Urutan tahap terbentuknya endapan hidrotermal pada daerah penelitian

KESIMPULAN

Zona alterasi yang berkembang pada daerah penelitian dikelompokkan menjadi 3 zona alterasi, yaitu zona alterasi silika yang dibandingkan dengan zona alterasi silisifikasi, zona alterasi kuarsa + kaolinit + dikit + k-alunit yang dibandingkan dengan zona alterasi argilik lanjut, dan zona alterasi kaolinit + illit + smektit yang dibandingkan dengan zona alterasi argilik. Mineralisasi yang hadir di daerah penelitian yaitu pirit, mineral oksida (jarosit, gutit, dan hematit), dan berdasarkan analisis geokimia terdapat emas, perak, tembaga, yang berasosiasi dengan urat kuarsa.

Tekstur dengan kadar Au-Ag tertinggi sebagai salah satu pengontrol pembawa mineralisasi terdapat pada tekstur *crustiform-colloform*. Tekstur *crustiform-colloform* berada pada zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit+k-alunit, tingkat oksidasi sedang sampai tinggi, serta berasosiasi dengan sulfida abu-abu. Kadar yang dihasilkan mencapai Au 76,65 ppm dan Ag 34 ppm.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak PT Agincourt Resources Martabe Gold Mine, tim Departemen *Mine Geology*, dan tim Departemen Eksplorasi untuk akses data, serta Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran untuk proses administrasi pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

Alderton Conrad. 2017. Description and Comparison of the Martabe Deposits. *Martabe Deposits Final, Internal Report Martabe*, p. 20 – 24.

Anonim. 1996. Sandi Stratigrafi Indonesia, Komisi Sandi Stratigrafi Indonesia. Ikatan Ahli Geologi Indonesia, 14 h.

Anonim. 2009. AusSpec Workshop: *Spectral Analysis and its Application to Exploration and Mining*. AusSpec International, internal presentation.

Corbett, J.G., and Leach, T.M., 1997, *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, mineralization*: Society of Economic Geologist Special Publication, v.6, p. 98 – 102.

Davies, B., 2002. Report on the structural review of the Martabe project, Newmont Horas Nauli, internal memorandum, p 5.

Dong, G., Morrison., G and Jaireth., S., 1995. *Quartz Texture in Epithermal Veins, Queensland – Classification, Origin, and Implication*: Economic Geology, vol 90, p. 1841 – 1856.

Dowling, K. and Morrison, G. W., 1990. *Application of quartz textures to the classification of gold deposits using North Queensland examples*: Economic Geology, pp 342 – 355.

Hedenquist JW, Arribas A Jr, Reynolds TJ.1998. *Evolution of an intrusioncentered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines*. Economic Geology, 93 (4) p 373-404.

Morrison, G., Guoyi, D., dan Jaireth, S., 1990. *Textural Zoning in Epithermal Quartz Veins*. Klondike Exploration Services, p. 35.

Sutopo Bronto, 2013. *The Martabe Au-Ag High-Sulfidation Epithermal Deposits, Sumatra, Indonesia: Implications for Ore Genesis and Exploration*. University of Tasmania: Australia, p. 332.

Diterima	: 17 Agustus 2020
Direvisi	: 12 September 2020
Disetujui	: 28 November 2020

**PEMODELAN GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBER DAYA BATUBARA DI PIT “HMG”,
TAMBANG BATUBARA BANKO BARAT, SUMATRA SELATAN**

**GEOLOGICAL MODELLING AND COAL RESOURCE ESTIMATION IN THE “HMG” PIT,
WEST BANKO COAL MINE, SOUTH SUMATRA**

**Adithya Ramadhani Hasibuan¹, Reinaldi Juniarto², Nurdrajat¹,
Reza Mohammad Ganjar Gani¹, Dicky Muslim³, dan M. Dwiki Satrio⁴**

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

²Departemen Teknik Geologi, UPN Veteran

³Program Pascasarjana, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

⁴Departemen Eksplorasi dan Geoteknik, PT Bukit Asam Tbk
adit.ar7@gmail.com dan d.muslim@unpad.ac.id

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara yang memiliki banyak deposit batubara, dan salah satu deposit terbesar ada di Pulau Sumatra. Tambang batubara Bukit Asam memiliki sejarah yang panjang sejak zaman Belanda. Wilayah penelitian ini berada di area tambang batubara Bukit Asam yang secara administratif terdapat di daerah Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatra Selatan. Makalah ini menggunakan pemodelan geologi 2D dan 3D untuk memperkirakan sumber daya batubara di PIT “HMG” di tambang batubara tepi barat. Empat puluh delapan data lubang bor eksplorasi PT Bukit Asam digunakan dalam penelitian ini. Data tersebut dianalisis dan diinterpretasi ulang untuk mengidentifikasi karakteristik batubara, mengorelasikan lapisan batubara, dan menyusunnya guna membuat model geologi bawah permukaan. Dalam upaya penentuan sumber daya batubara di kawasan ini terdapat beberapa teknik analisis (kriteria atau parameter) yang meliputi analisis kompleksitas geologi, analisis distribusi kualitas batubara, pemetaan bawah permukaan untuk mengamati geometri sebaran lapisan batubara dan pembuatan model geologi dari hasil kegiatan pengeboran. Objek penelitian yaitu lapisan batubara A1, A2, B1, B2, dan C dengan kategori peringkat bituminus B zat terbang tinggi berdasarkan klasifikasi ASTM. Distribusi lapisan batubara menunjukkan kecenderungan relatif tenggara-baratlaut. Klasifikasi atau estimasi sumber daya berdasarkan SNI 5015 : 2011 menunjukkan wilayah kajian termasuk dalam kompleksitas geologi dengan gugus geologi sederhana dengan jarak informasi sumber daya teraka $1.000 < X \leq 1.500\text{m}$, tertunjuk $500 < X \leq 1.000\text{m}$, dan terukur $X \leq 500\text{m}$. Dari pemodelan geologi dan perhitungan dengan metode sirkular diperoleh perkiraan sumber daya batubara total sebesar 155.085.529 ton, dengan rincian sumber daya per lapisan batubara adalah lapisan A1 sebesar 28.543.893 ton, lapisan A2 sebesar 31.199.799 ton, lapisan B1 sebesar 38.638.462 ton, lapisan B2 sebesar 15.790.222 ton, dan lapisan C sebesar 40.913.153 ton. Total sumber daya batubara sebesar 155,085,529 ton.

Kata kunci: batubara, estimasi sumber daya batubara, model geologi, batubara Banko Barat

ABSTRACT

Indonesia is a country that has a lot of coal deposits, and one of the largest deposits is in Sumatra Island. The Bukit Asam coal mine has had a long history beginning with the Dutch colonial period. Administratively, location of the studied area is located in the area of Bukit Asam coal mine, Tanjung Enim area, Muara Enim Regency, South Sumatra Province. This paper provides the 2D and 3D geological modelling to estimate coal resources in the “HMG” PIT of West Banko Coal Mine. Forty-eight exploratory drill holes data from PT Bukit Asam were used in this study. There were reanalysed and reinterpreted to identify coal characteristics, correlate coal seams, and compile to create subsurface geological models. In an effort to

determine coal resources in this area, there were some analytical techniques (criteria or parameter), including geological complexity analysis, coal quality distribution analysis, subsurface mapping to observe the geometry of coal seam distribution and making geological models from the results of drilling activities. The studied objects are seams A1, A2, B1, B2, and C with rank of high volatile B bituminous based on the ASTM Classification. The coal seams distribution shows relatively southeast-northwest trends. Resources classification or estimation in this paper is based on SNI 5015 : 2011, in which the study area is included in the geological complexity of simple geological groups with the distance of inferred resource information $1,000 < X \leq 1,500m$, designated $500 < X \leq 1,000m$, and measured $X \leq 500m$. From geological modelling and the Circular Method, estimated coal seam A1 resource is 28,543,893 tons, A2 seam is 31,199,799 tons, seam B1 is 38,638,462 tons, seam B2 is 15,790,222 tons, and seam C is 40,913,153 tons. The total coal resources are 155,085,529 tons.

Keywords: coal, coal resources estimation, geological model, west Banko coal

PENDAHULUAN

Kemajuan bidang industri semakin meningkat dengan adanya penemuan-penemuan bahan tambang, baik logam maupun bukan logam. Dalam rangka untuk mendukung perkembangan tersebut, perlu dilakukan kegiatan penyelidikan geologi umum, baik peninjauan umum maupun penyelidikan eksplorasi. Hasil penyelidikan yang dilakukan dapat menunjukkan potensi yang dapat dikembangkan, dan selanjutnya kegiatan survei ditingkatkan melalui kegiatan penyelidikan rinci untuk membuktikan keberadaan sumber daya batubara di daerah tersebut.

Saat ini, PT Bukit Asam Tbk (PTBA) yang memiliki izin usaha pertambangan (IUP) di daerah Tanjung Enim telah melakukan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi. Kegiatan tersebut membutuhkan banyak data geologi untuk memetakan keterdapatan dan penyebaran sumber daya batubara. Kegiatan eksplorasi meliputi pemetaan geologi dan pengeboran eksplorasi. Hasil kegiatan ini diharapkan dapat memberi data yang akurat dan lengkap terkait sumber daya batubara yang dapat digunakan untuk perencanaan dan pengembangan wilayah tambang yang dioperasikan untuk keberlangsungan bisnis perusahaan tersebut.

Dalam menyusun perencanaan tambang di wilayah tersebut diperlukan informasi mengenai sumber daya batubara, sehingga dilakukan pemodelan geologi dan

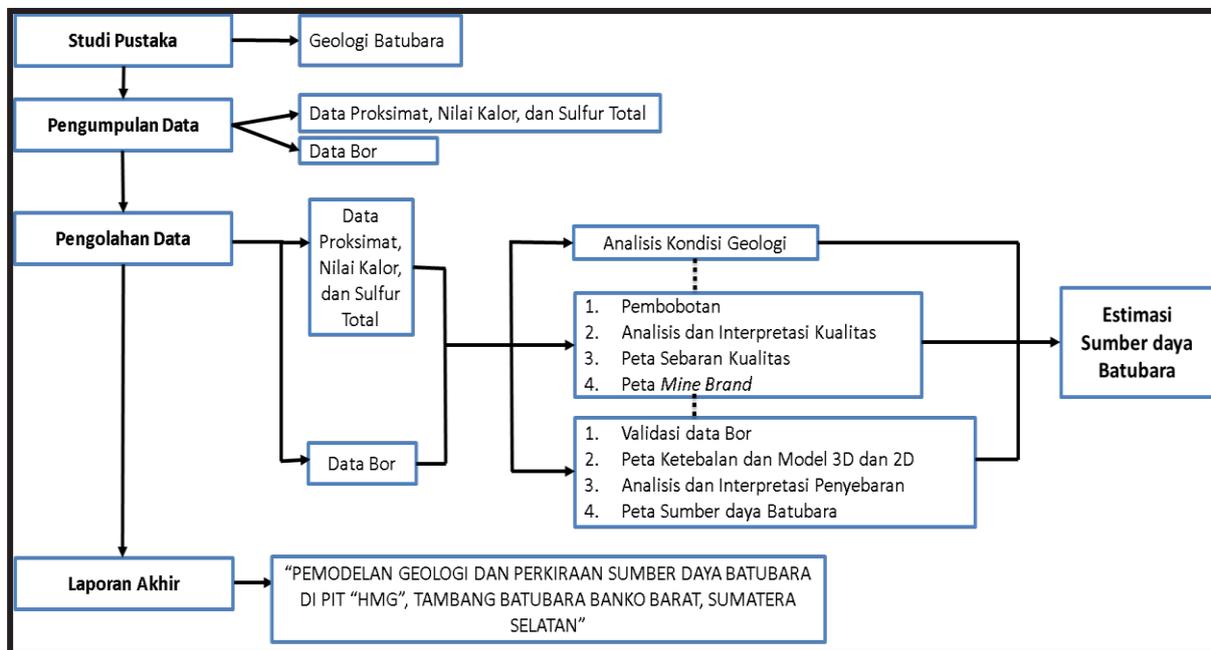
perhitungan sumber daya di tambang batubara Banko Barat. Hal ini dilakukan sebagai upaya untuk memberikan informasi yang representatif untuk pengoperasian tambang lebih lanjut. Makalah ini menyajikan model endapan batubara dengan mempertimbangkan berbagai kriteria yang meliputi kompleksitas geologi seperti struktur, stratigrafi, sedimentologi secara terintegrasi. Selanjutnya, model endapan batubara tersebut dijadikan dasar dalam mengestimasi sumber daya batubara dan penyusunan perencanaan tambang.

METODOLOGI

Metode penelitian yang diterapkan dalam penelitian ini meliputi tahapan persiapan, pengumpulan data, dan pengolahan serta analisis data. Tahap persiapan meliputi studi literatur, perumusan masalah dan pembatasan masalah (Gambar 1). Pada tahap pengumpulan data, banyak menggunakan data yang disediakan oleh perusahaan berupa data mentah. Data mentah yang didapatkan mencakup data hasil analisis laboratorium berupa data kualitas batubara, proksimat, total sulfur, dan nilai kalori batubara. Data hasil pengeboran, litologi batubara dan ketebalan batubara juga didapatkan melalui hasil analisis proses *coring* dan *logging* pada Tahun 2019 dengan batasan area yang ditentukan PTBA pada IUP Banko Barat. Tahap pengolahan data merupakan tahap dengan data yang telah dikumpulkan disusun menjadi basis data

dan diolah dengan *software Minescape 5.7, Surfer 13, Corel Draw X7, ArcGIs 10.4, Microsoft Excel, dan Microsoft Word* untuk mendapatkan hasil tujuan penelitian. Dalam hal ini, yang menjadi basis data yaitu kualitas batubara, survei, dan litologi yang didapatkan pada tahap sebelumnya. Keluaran pengolahan data berupa hasil pemodelan geologi dari bentuk 2D dan 3D, penentuan peringkat batubara berdasarkan standardisasi ASTM D-338 Tahun 1993, peta sebaran sumber daya hingga estimasi sumber daya batubara.

Perhitungan sumber daya batubara untuk menentukan estimasi sumber daya batubara dilakukan dengan standardisasi SNI 5015 : 2011 pada lapisan batubara A1, A2, B1, B2, dan C. Penentuan kompleksitas geologi dilakukan berdasarkan aspek-aspek sedimentasi, tektonik, dan variasi kualitas batubara pada daerah penelitian (Tabel 1). Setelah menentukan kondisi geologi (sederhana, moderat, kompleks), radius jarak titik informasi dapat diketahui untuk mengestimasi sumber daya batubara (Tabel 2).



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Tabel 1. Klasifikasi kompleksitas geologi berdasarkan SNI 5015 : 2019

Parameter	Kondisi Geologi		
	Sederhana	Moderat	Kompleks
I.A. Sedimentasi	Sedikit bervariasi	Bervariasi	Sangat bervariasi
1. Variasi Ketebalan	Ribuan meter	Ratusan meter	Puluhan meter
2. Kesenambungan	Hampir tidak ada	Beberapa	Banyak
3. Percabangan			
I.B. Tektonik	Tidak ada	Jarang	Rapat
1. Sesar	Ada, landai	Terlipat sedang	Terlipat kuat
2. Lipatan	Tidak ada	Berpengaruh	Sangat berpengaruh
3. Intrusi	Landai	Sedang	Terjal
4. kemiringan			
II. Variasi Kualitas	Sedikit bervariasi	Bervariasi	Sangat bervariasi

Tabel 2. Kriteria jarak titik informasi menurut kondisi geologi

Kondisi Geologi	Kriteria	Sumber Daya		
		Tereka	Terunjuk	Terukur
Sederhana	Jarak titik informasi (m)	$1.000 < x \leq 1.500$	$500 < x \leq 1.000$	$x \leq 500$
Moderat	Jarak titik informasi (m)	$500 < x \leq 1.000$	$250 < x \leq 500$	$x \leq 250$
Kompleks	Jarak titik informasi (m)	$200 < x \leq 400$	$100 < x \leq 200$	$x \leq 100$

Sumber: SNI 5015 : 2011

GEOLOGI

Secara regional, keterbentukan geologi di daerah penelitian termasuk dalam Cekungan Sumatra Selatan (Gambar 2). Secara khusus, daerah ini terletak di Subcekungan Palembang Selatan. Secara tektonik, Cekungan Sumatra Selatan telah mengalami empat kali orogenesis (Yarmanto, 1977), yakni pada zaman Mezosoikum Tengah, Jura Awal-Kapur Awal, Kapur Akhir-Tersier Awal, Plio-Pleistosen. Setelah orogenesis terakhir dihasilkan kondisi struktur geologi regional seperti terlihat pada saat ini, yaitu:

- Zone Sesar Semangko, merupakan hasil tumbukan antara Lempeng Sumatra Hindia dan Pulau Sumatra. Tumbukan ini menimbulkan sesar geser menganan di antara keduanya.
- Perlipatan dengan arah utama baratlaut-tenggara, sebagai hasil efek gaya kopel Sesar Semangko.
- Sesar-sesar yang berasosiasi dengan perlipatan dan sesar-sesar Pra-Tersier yang mengalami peremajaan.

Setelah mengalami interaksi antara pergerakan Lempeng Hindia-Australia dengan Lempeng Mikro Sunda, Cekungan Sumatra Selatan yang merupakan cekungan busur belakang ini terbagi menjadi empat subbagian (Pulunggono, 1984), yaitu:

- Subcekungan Jambi
- Subcekungan Palembang Utara
- Subcekungan Palembang Tengah
- Subcekungan Palembang Selatan

Stratigrafi Regional Cekungan Sumatra Selatan

Stratigrafi Cekungan Sumatra Selatan dari tua ke muda terdiri dari (Gambar 3):

- Kelompok Pra-Tersier Batuan Dasar, batuan Pra-Tersier yang terdiri atas batuan malihan dan batuan beku berumur Mesozoikum diinterpretasikan sebagai batuan dasar dari cekungan Tersier yang ada di daerah penelitian. Satuan batuan dasar ini telah mengalami aktivitas tektonik dan vulkanik, yaitu pensesaran, perlipatan, dan penerobosan.
- Formasi Lahat
Formasi ini diendapkan pada lingkungan darat, ditandai oleh kehadiran tuf akibat aktivitas vulkanik. Batuan penyusun formasi ini terdiri atas konglomerat, batupasir, batulempung, tuf, breksi dan terkadang terdapat lapisan batubara tipis.
- Formasi Talang Akar
Formasi ini diendapkan pada lingkungan laut dangkal sampai fluviatil yang dicirikan dengan terendapkannya batulanau, batupasir, dan sisipan batubara. Pada bagian tengah terdapat serpih yang diendapkan berdekatan dengan lingkungan laut. Kandungan material pasir pada formasi ini semakin bertambah mendekati tepi cekungan.
- Formasi Baturaja
Formasi ini diendapkan pada lingkungan darat sampai laut dangkal

pada Miosen Awal. Formasi ini tersusun oleh batugamping terumbu, batugamping pasir, batugamping serpih, serpih gampingan, napal dengan kandungan fosil foraminifera, koral, dan moluska.

- **Formasi Gumai**
Formasi ini diendapkan pada lingkungan laut dalam, dengan hampir seluruh bagian cekungan digenangi air laut. Litologi penyusun formasi ini meliputi batupasir gampingan, serpih gampingan kaya akan foraminifera pada bagian bawah dan sisipan batugamping tipis pada bagian tengah dan atas. Umur formasi ini adalah Miosen Awal- Miosen Tengah.
- **Formasi Air Benakat**
Formasi ini disusun oleh litologi serpih gampingan kaya akan foraminifera dengan sisipan batugamping pada bagian bawah dan semakin ke atas diendapkan sisipan batupasir yang banyak mengandung glaukonit, dengan kehadiran batupasir semakin ke atas semakin besar. Pada bagian atas ditemukan sisa-sisa tumbuhan dan batubara Kladi yang merupakan batas Formasi Air Benakat dan Formasi Muara Enim.
- **Formasi Muara Enim**
Diendapkan pada lingkungan pengendapan laut dangkal, dataran delta, dan non-marine. Batuan penyusun formasi ini adalah batupasir, batulanau, batulempung, dan batubara, seringkali pada beberapa bagian atas formasi terdapat tuf atau batulempung tufan.
- **Formasi Kasai**
Diendapkan pada lingkungan darat, dengan ketebalan batuan antara 500m sampai 1.000m, berumur Miosen Akhir-Pliosen Bawah. Batuan penyusunnya berupa perselingan konglomerat, batupasir tufan, tuf dan batulempung tufan dengan kandungan

moluska air tawar dan fosil kayu yang tersilisifikasi.

Sedimentasi yang terjadi di Cekungan Sumatra Selatan berlangsung pada dua fase, yaitu transgresif dan regresif (Jackson, 1961).

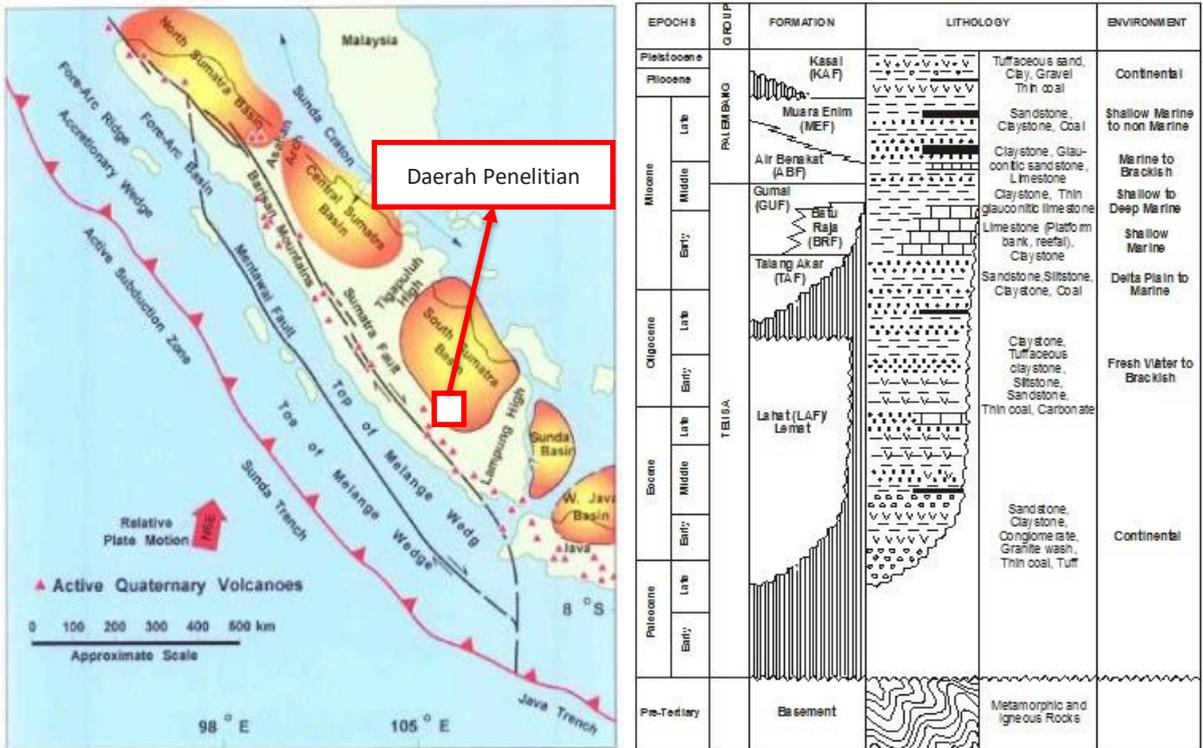
Struktur Regional Cekungan Sumatra Selatan

Menurut beberapa ahli geologi, pola struktur geologi Cekungan Sumatra Selatan umumnya terdapat dua faktor utama, yaitu:

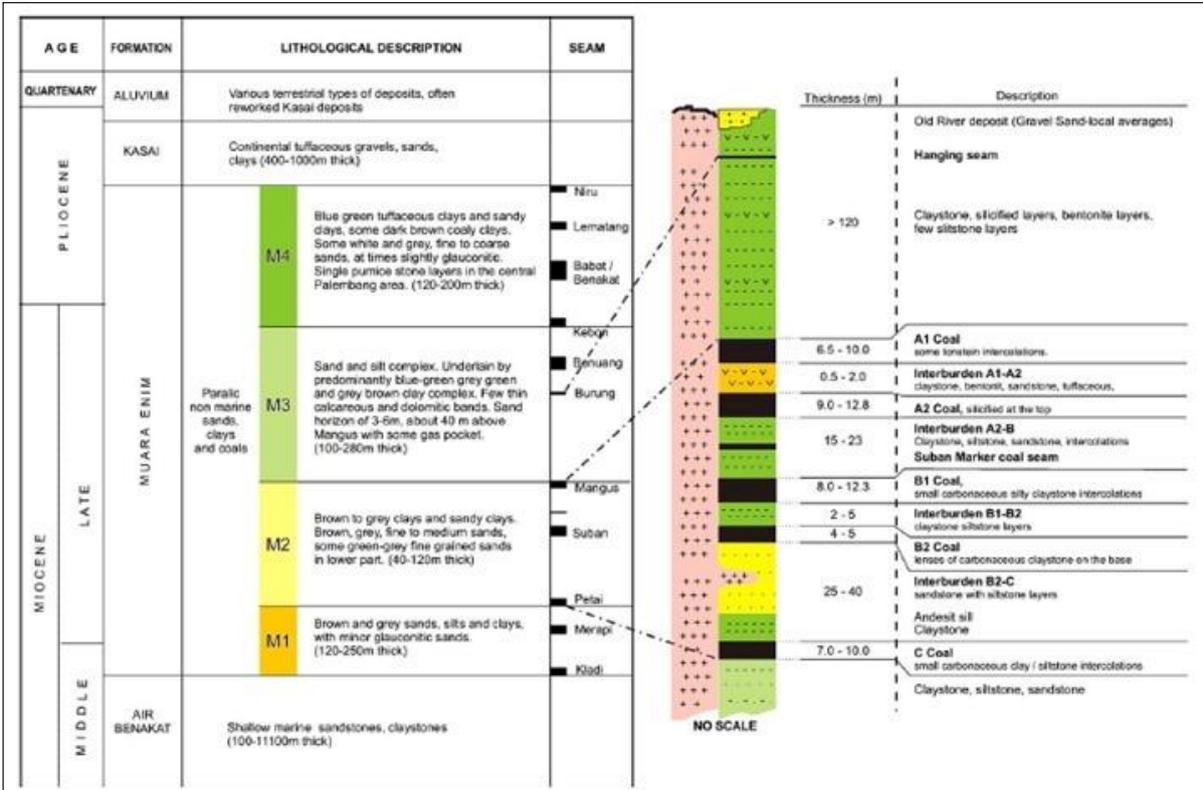
- Batuan dasar Pra-Tersier yang membentuk *half graben*, *horst* dan blok sesar (De Coster, 1974; Pulunggono dkk., 1992).
- Pola struktur berarah baratlaut-tenggara dan struktur depresi di timurlaut yang keduanya terbentuk sebagai akibat orogenesis Plio-Plistosen (De Coster, 1974; Sardjito dkk., 1991).

Perkembangan struktur geologi pada cekungan ini dibagi dalam empat periode (Pulunggono dan Cameron,-1984), yaitu:

- **Akhir Jura-Awal Kapur**
Pada zaman ini, tektonik yang terjadi berupa kompresi. Arah tren utama struktur geologi pada periode ini adalah barat baratlaut-timur menenggara.
- **Akhir Kapur-Oligosen**
Pada periode ini struktur geologi yang berkembang berupa peregangan dengan arah tren utara-selatan.
- **Oligosen-Pliosen**
Periode ini merupakan fase tenang yaitu tidak ada pergerakan pada dasar cekungan.
- **Pliosen-Plistosen**
Pada periode ini struktur geologi yang berkembang berupa kompresional dan sesar-sesar pada dasar cekungan yang mengalami reaktivasi, sehingga terjadi pengangkatan dan pembentukan antiklinorium di Sumatra Selatan.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian pada Cekungan Sumatra Selatan (kiri) dan stratigrafi regional (modifikasi dari Heidrick dan Aulia, 1993; Jackson, 1961; de Coster 1974)



Gambar 3. Stratigrafi Formasi Muara Enim dan tata nama lapisan batubara (modifikasi dari Shell Mijnbouw, 1978, dalam Susilawati dan Ward, 2006).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas Batubara

- Peringkat lapisan batubara A1
Lapisan batubara A1 memiliki nilai lembab total rata-rata sebesar 23,37%, nilai lembab melekat 12,73%, nilai abu rata-rata 4,49 % (adb) nilai zat terbang rata-rata 40,27% (adb), nilai karbon tertambat rata-rata 42,52% (adb), nilai sulfur total rata-rata 0,51% (adb) dan 0,44% (ar), dan nilai kalori rata-rata 5.967,15 kkal/kg (adb) dan 5.238,03 kkal/kg (ar).

Apabila diklasifikasikan menurut ASTM D388-19 tahun 2004 nilai kalori 13.046,11 btu/lb merupakan batubara peringkat bituminus B zat terbang tinggi. Perbandingan antara zat terbang dengan karbon tertambat menghasilkan nilai rasio bahan bakar bernilai 0,93 menunjukkan bahwa lapisan batubara ini masih tergolong cukup bagus untuk pembakaran. Kandungan sulfur lapisan batubara ini menunjukkan angka rata-rata yang rendah 0,51% (adb) menurut Hunt dkk. (1996).

- Peringkat lapisan batubara A2
Lapisan batubara ini memiliki nilai lembab total rata-rata sebesar 24,04%, nilai lembab melekat 12,89% (adb), nilai abu rata-rata 3,78% (adb), nilai zat terbang rata-rata 39,74% (adb), nilai karbon tertambat rata-rata 43,57% (adb), nilai sulfur total rata-rata 0,32% (adb) dan 0,38% (ar), dan nilai kalori rata-rata 6.008,37 kkal/kg (adb) dan 5.237,79 kkal/kg (ar).

Apabila diklasifikasikan menurut ASTM D388-19 Tahun 2004 nilai kalori 13.028 btu/lb, lapisan batubara ini berperingkat bituminus B zat terbang tinggi. Perbandingan antara zat terbang dengan karbon tertambat menghasilkan nilai rasio bahan bakar bernilai 1,10. Hasil ini menunjukkan bahwa lapisan batubara ini masih tergolong cukup bagus untuk

pembakaran. Kandungan sulfur lapisan batubara A2 menunjukkan angka rata-rata yang rendah 0,32% (adb) menurut Hunt dkk. (1996).

- Peringkat lapisan batubara B1
Lapisan batubara ini memiliki nilai lembab total rata-rata sebesar 24,53% (adb), nilai lembab melekat 13,35% (adb), nilai abu rata-rata 3,89% (adb) nilai zat terbang rata-rata 39,64% (adb), nilai karbon tertambat rata-rata 43,09% (adb), nilai sulfur total rata-rata 0,34% (adb) dan 0,29% (ar), dan nilai kalori rata-rata 6.030,56 kkal/kg (adb) dan 5.251,68 kkal/kg (ar).

Apabila diklasifikasikan menurut ASTM D388-19 Tahun 2004, nilai kalori 13.169,04 btu/lb berperingkat batubara bituminus B zat terbang tinggi. Perbandingan antara zat terbang dengan karbon tertambat menghasilkan nilai rasio bahan bakar bernilai 1,09. Hasil ini menunjukkan bahwa lapisan batubara ini masih tergolong cukup bagus untuk pembakaran. Kandungan sulfur lapisan batubara B1 menunjukkan angka rata-rata yang rendah 0,34% (adb) menurut Hunt dkk. (1996).

- Peringkat lapisan batubara B2
Lapisan batubara ini memiliki nilai lembab total rata-rata sebesar 25,15% (adb), nilai lembab melekat 12,96% (adb), nilai abu rata-rata 5,74% (adb) nilai zat terbang rata-rata 38,67% (adb), nilai karbon tertambat rata-rata 43,17% (adb), nilai sulfur total rata-rata 1,02% (adb) dan 0,88% (ar), dan nilai kalori rata-rata 5.919,76 kkal/kg (adb) dan 5.084,72 kkal/kg (ar).

Apabila diklasifikasikan menurut ASTM D388-19 Tahun 2004, nilai kalori 13.239,58 btu/lb berperingkat batubara bituminus zat terbang tinggi. Perbandingan antara zat terbang dengan karbon tertambat menghasilkan nilai rasio bahan bakar bernilai 1,12. Hasil ini menunjukkan

bahwa lapisan batubara ini masih tergolong cukup bagus untuk pembakaran. Kandungan sulfur lapisan batubara B2 menunjukkan angka rata-rata yang tinggi 1,02% (adb) menurut Hunt dkk. (1996).

- Peringkat lapisan batubara C
Lapisan batubara ini memiliki nilai lembab total rata-rata sebesar 23,96% (adb), nilai lembab melekat 12% (adb), nilai abu rata-rata 4,16% (adb), nilai zat terbang rata-rata 40,36% (adb), nilai karbon tertambat rata-rata 43,47% (adb), nilai sulfur total rata-rata 0,99% (adb) dan 0,86% (ar), dan nilai kalori rata-rata 6.178,56 kkal/kg (adb) dan 5.339,18 kkal/kg (ar).

Apabila diklasifikasikan menurut ASTM D388-19 Tahun 2004, nilai kalori 13.381,84 btu/lb merupakan batubara berperingkat bituminus B zat terbang tinggi. Perbandingan antara zat terbang dengan karbon tertambat menghasilkan nilai rasio bahan bakar bernilai 1,08. Hasil ini menunjukkan bahwa lapisan batubara ini masih tergolong cukup bagus untuk pembakaran. Kandungan sulfur dalam lapisan batubara ini menunjukkan angka rata-rata yang sedang 0,99% (adb) menurut Hunt dkk.(1996).

Model dan Geometri Penyebaran Lapisan Batubara

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data survei pengeboran dan data hasil *well logging* yang berisi lapisan batubara dan kedalamannya di setiap lubang bor. Pengambilan data pada daerah penelitian dilakukan pada 48 titik pengeboran, dengan kedalaman yang cukup bervariasi antara 43 meter sampai dengan 274 meter. Berdasarkan log akhir

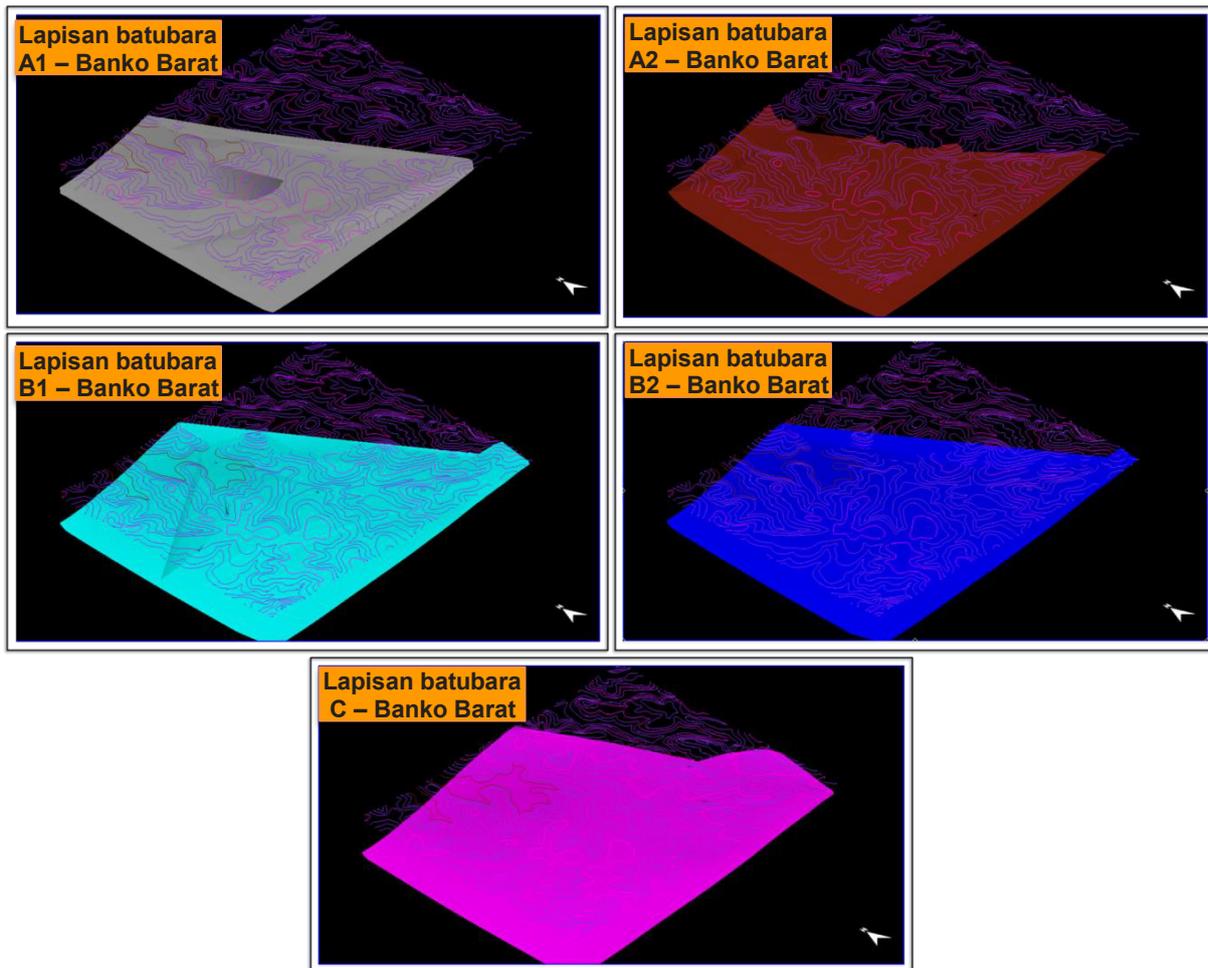
pada 48 sumur pengeboran tersebut, didapatkan lima lapisan batubara: A1, A2, B1, B2, dan C berdasarkan urutan temuda dan juga karakteristik masing-masing dari setiap lapisannya. Data tersebut dapat dikorelasikan satu sama lain untuk merekonstruksi suatu model 3D penyebaran batubara dari tiap lapisan batubara. Dimensi *software Minescape 5.7* menggambarkan pola penyebaran endapan batubara setiap lapisan batubara.

Penampang 2D lapisan batubara

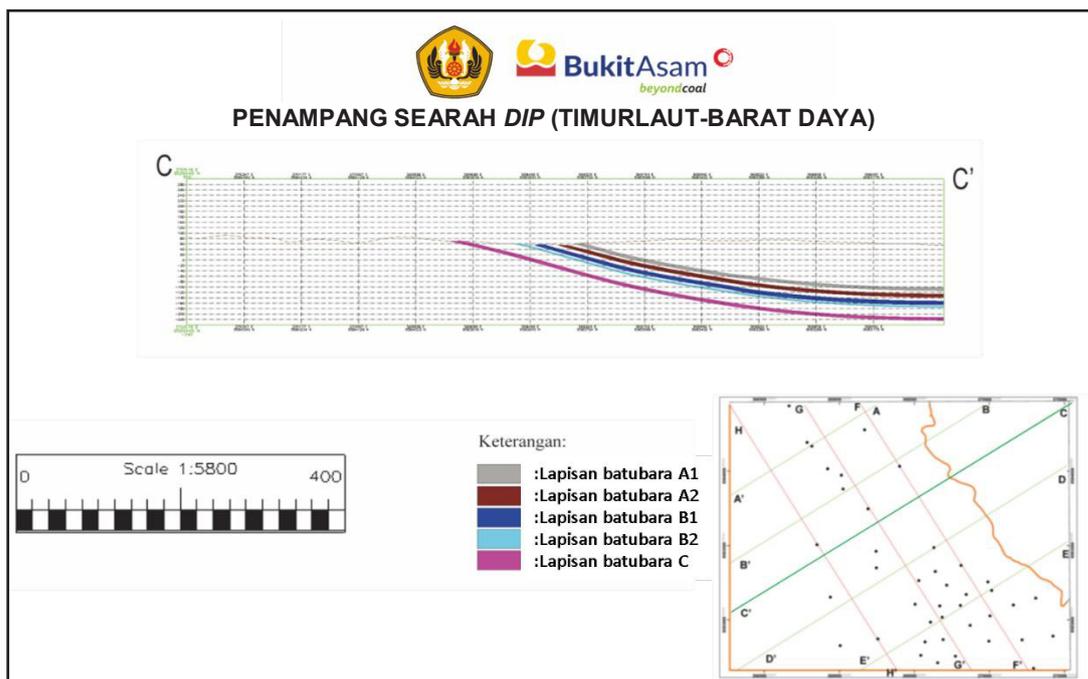
Dari data kedalaman dan sebaran 48 sumur pengeboran, kemudian dibuat garis sayatan. Garis penampang dengan kemiringan lapisan batuan berarah timurlaut-barat daya (Gambar 5). Sayatan C-C' berarah timurlaut-barat daya dibentuk garis penampang dengan menggunakan *software Minescape 5.7*, dan menghasilkan model 2D penyebaran batubara. Hasil penarikan ini menghasilkan pemodelan pola penyebaran endapan batubara. (Gambar 5).

Pemodelan lapisan batubara diperoleh hasil bahwa lapisan batubara pada area penambangan di IUP Banko Barat ini memiliki lima lapisan batubara, yaitu A1, A2, B1, B2, C dengan arah umum kemenerusan penyebaran batubara searah lapisan batubara, yaitu relatif timurlaut-baratdaya. Dari hasil ini, dapat dilihat bahwa daerah penelitian berada di sebuah struktur geologi berupa lipatan.

Sayatan berarah timurlaut–baratdaya dibuat dan diperoleh hasil pemodelan bahwa lapisan batubara pada area penambangan di IUP Banko Barat ini memiliki lapisan batubara A1, A2, B1, B2, C dengan arah umum kemiringan lapisan batubara kearah baratdaya sedangkan penyebaran batubara menunjukkan arah relatif baratlaut ke tenggara.



Gambar 4. Model 3D tiap lapisan batubara A1, A2, B1, B2 dan C di daerah penelitian Tambang Banko Barat



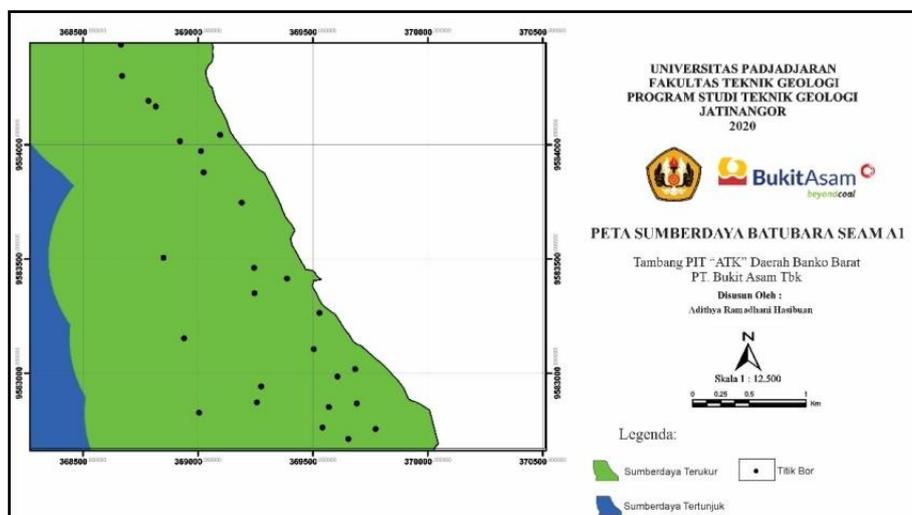
Gambar 5. Penampang searah kemiringan lapisan batuan

Estimasi Sumber Daya Batubara

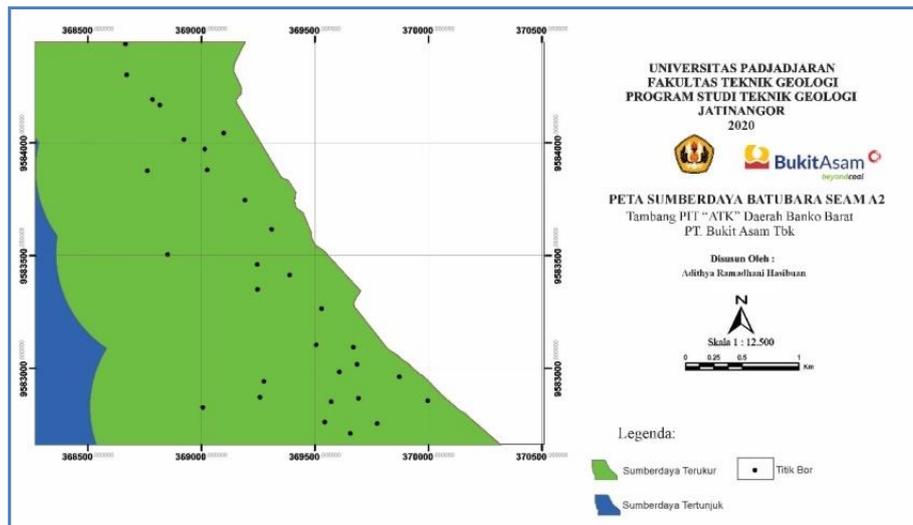
Mengacu pada pedoman pelaporan, sumber daya, dan cadangan batubara (SNI 5015 : 2011), penghitungan sumber daya pada daerah penelitian yaitu kompleksitas geologi sederhana. Selanjutnya, penghitungan sumber daya batubara menggunakan jarak titik informasi untuk menentukan sumber daya terukur, tertunjuk, tereka. Jarak titik informasi (m) menurut kondisi geologi sederhana untuk estimasi sumber daya batubara tereka $1.000 < x \leq 1.500$, tertunjuk $500 < x \leq 1.000$, terukur $X \leq 500$.

- Estimasi sumber daya lapisan batubara A1
Lapisan batubara A1 (Gambar 8) memiliki sumber daya batubara terukur 25.945.466 ton, tertunjuk 2.598.427 ton, dan terdapat 0 ton pada sumber daya tereka. Hasilnya, jumlah sumber daya lapisan batubara A1 sebesar 28.543.893 ton dengan luas area 2.157.100 m².
- Estimasi sumber daya lapisan batubara A2
Lapisan batubara A2 (Gambar 9) memiliki sumber daya batubara terukur 28.600.796 ton, tertunjuk 2.599.003 ton, dan terdapat 0 ton pada sumber daya tereka (Gambar 7). Hasilnya, sumber daya batubara lapisan batubara A2 sebesar 31.199.799 ton dengan luas area 2.286.800 m².

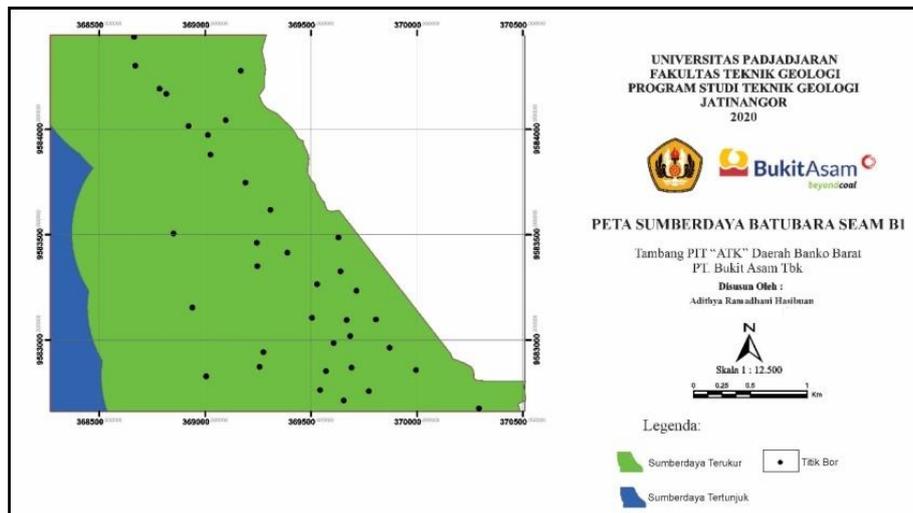
- Estimasi sumber daya lapisan batubara B1
Lapisan batubara B1 (Gambar 10) memiliki sumber daya batubara terukur 35.238.089 ton, tertunjuk 3.400.373 ton, dan terdapat 0 ton pada sumber daya tereka (Gambar 8). Hasilnya, sumber daya batubara lapisan batubara B1 sebesar 38.638.462 ton dengan luas area 2.648.700 m².
- Estimasi sumber daya lapisan batubara B2
Lapisan batubara B2 (Gambar 11) memiliki sumber daya batubara terukur 14.665.106 ton, tertunjuk 1.125.116 ton, dan terdapat 0 ton pada sumber daya tereka (Gambar 9). Hasilnya, sumber daya lapisan batubara B2 sebesar 15.790.222 ton dengan luas area 2.716.600 m².
- Estimasi sumber daya lapisan batubara C
Lapisan batubara C (Gambar 10) memiliki sumber daya batubara terukur 38.564.377 ton, tertunjuk 2.348.776 ton, dan terdapat 0 ton pada sumber daya tereka. Hasilnya, sumber daya lapisan batubara C sebesar 40.913.153 ton dengan luas area 3.190.300 m².



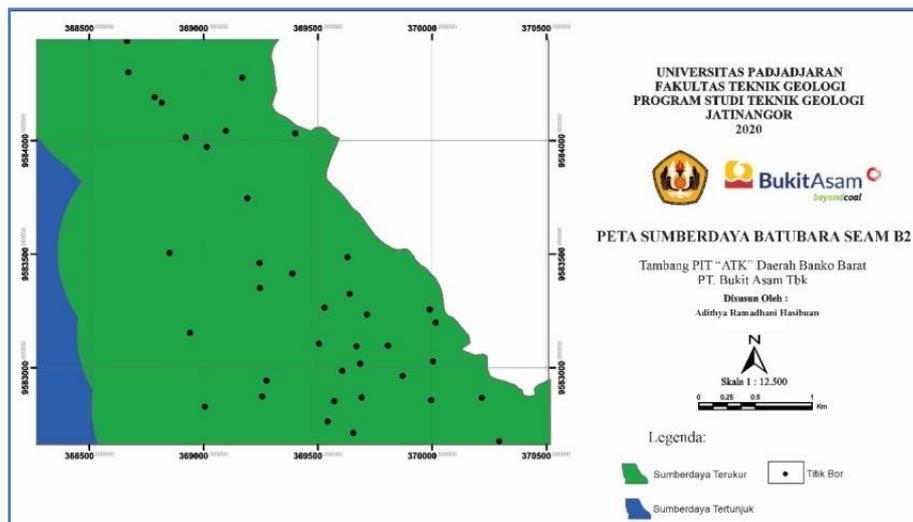
Gambar 6. Peta sumber daya lapisan batubara A1



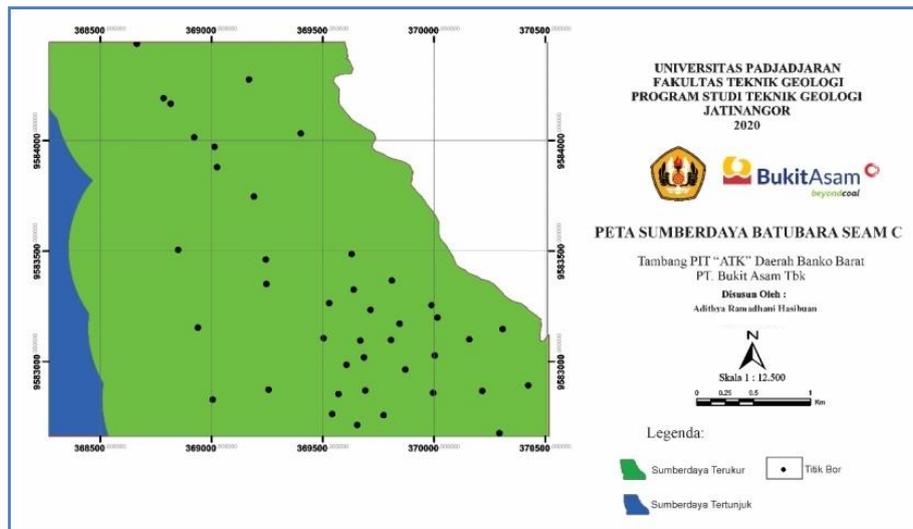
Gambar 7. Peta sumber daya lapisan batubara A2



Gambar 8. Peta sumber daya lapisan batubara B1



Gambar 9. Peta sumber daya lapisan batubara B2



Gambar 10. Peta sumber daya lapisan batubara C

KESIMPULAN

Dari model geologi yang dibuat, diketahui daerah penelitian tersusun atas lima lapisan batubara, yaitu A1, A2, B1, B2, dan C. Arah penyebaran dari kelima lapisan batubara tersebut relatif sama, yaitu barat-laut-tenggara N140°E-N148°E.

Berdasarkan hasil dari uji kualitas batubara berdasarkan ASTM D388-19 Tahun 2004, peringkat lapisan batubara A1, A2, B1, B2, dan C adalah bituminus B zat terbang tinggi. Nilai kalori berkisar antara 13.000 btu/lb-14.000 btu/lb.

Estimasi sumber daya batubara untuk lapisan batubara A1 adalah 28.543.893 ton, A2 adalah 31.199.799 ton, B1 adalah 38.638.462 ton, B2 adalah 15.790.222 ton, dan C adalah 40.913.153 ton. Total sumber daya batubara secara keseluruhan sebesar 155.085.529 ton.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Manajemen PT Bukit Asam, Tbk yang telah mengizinkan penggunaan data untuk penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

Anggayana, K., 1999, Genesa Batubara. Institut Teknologi Bandung, Bandung.

ASTM D-338, 2004, *Annual Book Of Standards "Classification Of Coal By Rank"*

Badan Standardisasi Nasional, 2015, Standar Nasional Indonesia (SNI) 5015 – 2011 Pedoman Pelaporan Sumber daya dan Cadangan Batubara.

Badan Standardisasi Nasional, 2019, Standar Nasional Indonesia (SNI) 5015 – 2019 Pedoman Pelaporan Sumber daya dan Cadangan Batubara.

Blake, 1989, *The Geological Regional and Tectonic of South Sumatra Basin*. Jakarta: Proceeding 11th IPA.

de Coster, G. L, 1974, *The geology of the central and south Sumatra basins*.

Heidrick, T. L. and Aulia, K., 1993, *A Structural and Tectonic Model of The Coastal Plains Block, Central Sumatra Basin, Indonesia. Proceedings Indonesian Petroleum Association, 22nd Annual Convention, IPA93-1.1-179 Jakarta*.

- Hunt, J. M., 1996, *Petroleum Geochemistry and Geology*, 2nd edn.: W. H. Freeman, New York, NY
- Koesoemadinata, R. P., 1981, *Stratigraphy and Sedimentation: Ombilin Basin, Central Sumatra (West Sumatra Province)*. Jakarta: Proceedings 10th Annual Convention IPA.
- Pulunggono, A and Cameron, N. R. 1984, *Sumatran microplates, their characteristics and their role in the evolution of the Central and South Sumatra basins*. Jakarta : Proceedings 13th Annual Convention IPA.
- Pulunggono, A., Haryo, A. and Kosuma, C. G. 1992, *Pre-Tertiary and Tertiary Fault Systems as a framework of the South Sumatra Basin; A study of SAR-MAPS. Proceedings Indonesian Petroleum Association. 21th Annual Convention*
- Van Bemmelen, R. W., 1949, *Report on the volcanic activity and volcanological research in indonesia during the period 1936–1948*. *Bulletin Volcanology*. Springer.
- Susilawati, R. and Ward, C. R., 2006, *Metamorphism of mineral matter in coal from the Bukit Asam deposit, South Sumatra, Indonesia" International Journal of Coal Geology*, Vol. 68, pp. 171-195.
- Sukandarrumidi, 1995, *Batubara dan gambut*. Gadjah Mada University Press.
- Ward, C. R. and Ruiz, I. S., 2008, *Introduction to Applied Coal Petrology, (in Applied Coal Petrology, The role of petrology in coal utilization; Ruiz-Suares & Creling, J.A, Ed.)*.
- Wiznu dan Nazirman, 1997, *Geologi Regional Sumatra Selatan*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Diterima	: 15 September 2020
Direvisi	: 7 Oktober 2020
Disetujui	: 30 November 2020

KARAKTERISTIK BATUBARA TERPENGARUH INTRUSI DI TAMBANG AIR LAYA, SUMATRA SELATAN DAN POTENSINYA SEBAGAI MATERIAL UNTUK PEMBUATAN GRAFIT SINTETIS

THE CHARACTERISTICS OF HEAT-AFFECTED COAL IN AIR LAYA MINE, SOUTH SUMATRA AND ITS POTENTIAL AS AN ALTERNATIVE SOURCE OF SYNTHETIC GRAPHITE

Arsha Maulana¹ dan Ferian Anggara^{2,3}

¹Program Studi S1, Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, UGM

²Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, UGM

³Pusat Kajian Sumberdaya Bumi Non-konvensional, Fakultas Teknik, UGM

ferian@ugm.ac.id

ABSTRAK

Grafit dapat diaplikasikan dalam berbagai macam kegunaan misal sebagai material tahan panas, baterai, dan elektroda. Material grafit bisa didapat melalui grafit sintesis yang berasal dari batubara antrasit yang terpanaskan pada suhu di atas 2000°C. Kondisi batubara yang terpanaskan secara alami dapat ditemui pada batubara yang terpengaruh intrusi batuan beku di Tambang Air Laya (TAL), Tanjung Enim, Sumatra Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik batubara terpengaruh intrusi batuan beku dan potensinya sebagai material untuk pembentukan grafit sintesis. Empat sampel batubara yang berasal dari 4 seam dengan jarak bervariasi terhadap intrusi diambil dan dipreparasi untuk dilakukan analisis sayatan poles, *random vitrinite reflectance* (R_{vr}), proksimat, *X-Ray Diffractometry* (XRD), *Total Carbon* (TC), *Total Organic Carbon* (TOC), *Total Inorganic Carbon* (TIC), serta analisis *micro-Raman spectroscopy*. Batubara terpengaruh intrusi batuan beku di lokasi penelitian mengalami kenaikan *vitrinite reflectance* dan kandungan *fixed carbon* (karbon tertambat) serta penurunan nilai *moisture* (kadar lengas) dan *volatile matter* (zat terbang) seiring berkurangnya jarak terhadap tubuh intrusi. Batubara seam A1 berperingkat *low volatile bituminous coal* (%Ro= 2,01%) yang memiliki jarak terdekat dengan tubuh intrusi memiliki derajat pembatubaraan dan kandungan presentase mineral tertinggi. Batubara seam A1 memiliki banyak asosiasi mineral lempung yang dijumpai seperti ilit, smektit, dan rektorit sehingga dapat meningkatkan derajat kristalinitas dalam proses pembatubaraan dan akan mempermudah pada proses pembentukan grafit sintesis dalam proses selanjutnya.

Kata kunci: Batubara, Intrusi, Tambang Air Laya, Karakteristik Batubara, Grafit

ABSTRACT

Graphite can be applied in various uses for example as a heat resistant materials, batteries, and electrodes. Graphite material can be obtained from synthetic graphite which produced from anthracite coal that is heated at 2000°C or above. Naturally heat affected coal can be found in Tambang Air Laya (TAL), Tanjung Enim, South Sumatra where the coal is affected by the presence of igneous intrusion. According to these conditions, it is important to conduct the research to determine the characteristics of heat affected coal and its potential as an alternative source of synthetic graphite. Four samples of heat affected coal obtained from four seams with varying distances to the body of igneous intrusion are prepared for several analyses, namely petrographic, random vitrinite reflectance (R_{vr}), proximate, X-Ray Diffractometry (XRD), Total Carbon (TC), Total Organic Carbon (TOC), and Total Inorganic Carbon (TIC), as well as micro-Raman spectroscopy. The heat affected coal shows the tendency of increasing vitrinite reflectance and fixed carbon content and decreasing moisture and volatile matter towards the igneous intrusion body. The heat affected coal (A1 Coal) with

the closest distance to the igneous intrusion body has the highest rank (low volatile bituminous coal; %Ro= 2,01%) and mineral percentage. A1 Coal is associated with mineral lempung such as illite, smectite, and rektorit that can increase the degree of crystallinity in the process of coalification and that would catalyze the formation of synthetic graphite in the next process.

Keywords: Coal, Intrusion, Tambang Air Laya, Coal Characteristics, Graphite

PENDAHULUAN

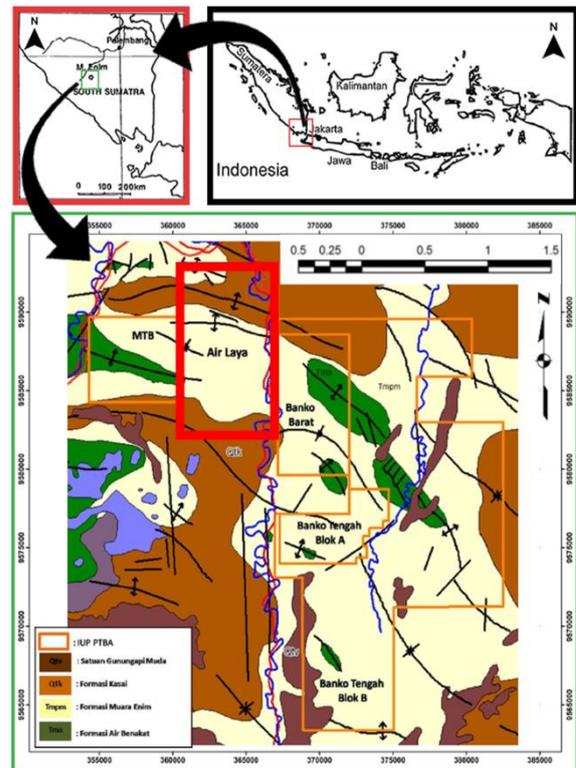
Pemanfaatan grafit global sejak 2013 meningkat terus tiap tahunnya (Simandl *et al.*, 2015). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kondisi ekonomi global serta dampaknya terhadap industri yang menggunakan grafit (Olson, 2015). Grafit merupakan material yang dapat diaplikasikan dalam berbagai macam kegunaan misal sebagai material tahan panas, baterai, dan elektroda.

Grafit terbentuk sebagai hasil dari tahapan metamorfisme kontak maupun regional dari sedimen yang kaya akan material organik. Grafit memiliki banyak kegunaan terutama pada bidang industri (Chung, 2002). Untuk mencukupi kebutuhan grafit dunia, *petroleum coke* merupakan material karbon yang biasa digunakan sebagai grafit sintetis. Berdasarkan penelitian Franklin (1951) dan Oberlin & Terriere (1975) diketahui bahwa antrasit dapat tergrafitisasi dengan mudah apabila terpanaskan pada temperatur di atas 2000 °C. Oleh karena itu, batubara dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan grafit sintetis.

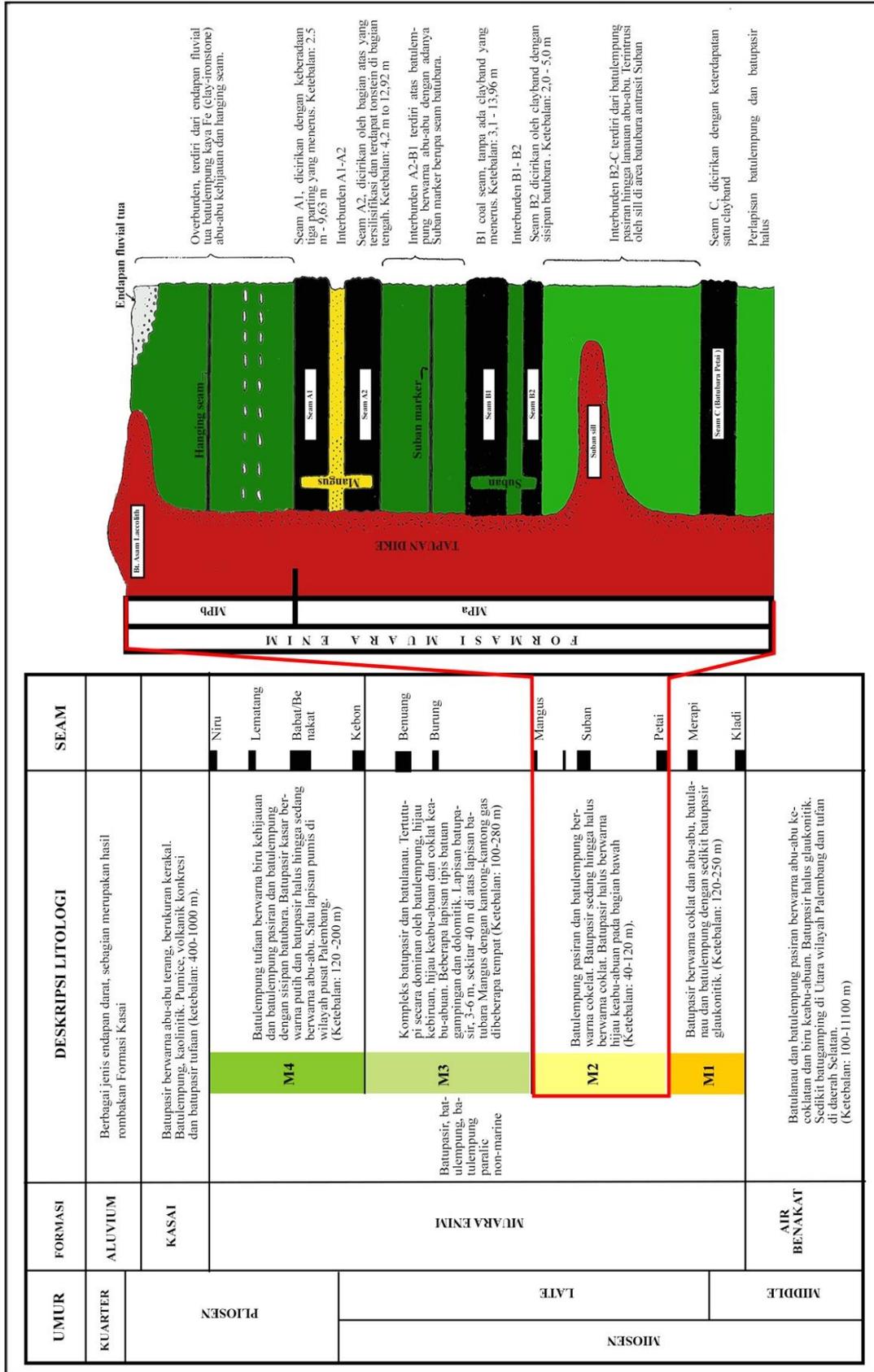
Batubara yang terpanaskan secara alami akibat pengaruh intrusi batuan beku sehingga peringkatnya naik dapat di jumpai di lapangan Tambang Air Laya (TAL), Sumatra Selatan (Gambar 1). Batubara di lokasi penelitian termasuk dalam Formasi Muara Enim (Gambar 2). Temperatur kontak intrusi batuan beku yang hadir di lapangan TAL berkisar antara 700-750°C (Amijaya dan Littke, 2005). Intrusi ini memberikan panas dengan temperatur tinggi sehingga dapat mempengaruhi karakteristik awal dari batubara (Pujobroto,

1997). Berdasarkan Levine (1993) dikatakan bahwa intrusi batuan beku yang hadir dapat memberikan efek panas yang diberikan sehingga menyebabkan adanya peningkatan derajat pembatubaraan atau peningkatan peringkat batubara di lokasi tertentu baik secara lokal ataupun secara regional yang salah satu contohnya terjadi pada batubara Cekungan Narragganset, Rhode Island (Lyons and Chase, 1981).

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik batubara terpengaruh intrusi batuan beku di TAL dan potensinya sebagai material untuk pembuatan grafit sintesis.



Gambar 1. Peta indeks lokasi penelitian, Lokasi penelitian berada pada Tambang Air Laya (dimodifikasi dari Pujobroto, 1997)



Gambar 2. Ringkasan stratigrafi Formasi Muara Enim dan kolom stratigrafi Tambang Air Laya (TAL) (dimodifikasi dan disarikan dari Shell Mijnbouw, 1978)

GEOLOGI

Daerah penelitian berada di Cekungan Sumatra Selatan yang merupakan cekungan busur belakang yang terbentuk akibat ekstensi timur-barat pada Pre-Tersier hingga Tersier Awal (de Coster, 1974; Daly *et al.*, 1987).

Berdasarkan Pujobroto and Hutton (2000) terdapat tiga tubuh intrusi utama yang bersifat andesitik yang berada di sekitar TAL. Tiga intrusi tersebut adalah: 1) Intrusi *dike* Bukit Asam; 2) Intrusi *sill* Suban; dan 3) kerucut vulkanik atau *vertical parasitic cone*. Intrusi tersebut hadir ketika Plio-Pleistosen (Darman dan Sidi, 2000).

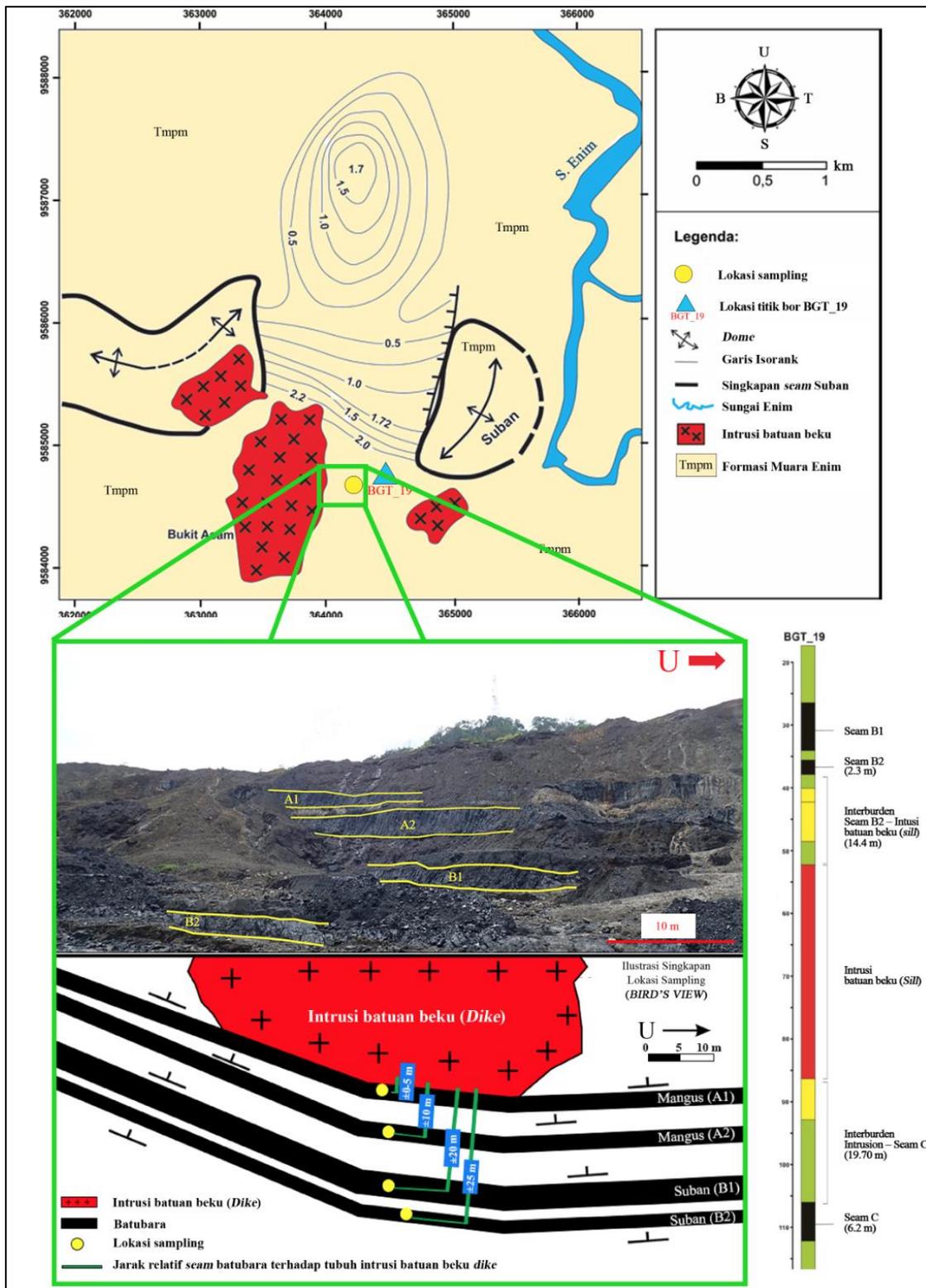
Batubara pada TAL merupakan bagian dari Formasi Muara Enim yang terendapkan ketika Miosen Akhir – Pliosen Awal (de Coster, 1974). Terdapat tiga lapisan batubara yang dinilai ekonomis yang tersusun oleh batubara berlitotipe *banded bright*: Mangus (A1, A2) *seam*, Suban (B1, B2) *seam*, dan Petai (C) *seam* (Shell Mijnbouw, 1978). Secara umum, batubara di TAL dapat dibagi menjadi dua yakni, 1) Batubara normal; dan 2) Batubara terpengaruh intrusi batuan beku. Batubara normal (VR_{max} sekitar 0,40%–0,50%) adalah batubara yang mengalami tahapan pembatubaraan dengan tahapan *burial* atau pembebanan yang normal sedangkan batubara terpengaruh intrusi (VR_{max} 0,60% – 2,70%) merupakan batubara yang mengalami pembatubaraan secara cepat akibat hadirnya panas dari intrusi batuan beku secara tiba-tiba sehingga mengalami perubahan karakteristik seperti kenaikan derajat pembatubaraan atau peringkat dari batubara tersebut (Daulay *et al.*, 2000; Pujobroto and Hutton, 2000).

METODOLOGI

Pengambilan sampel batubara dengan metode *bulk sampling* dilakukan di Tambang

Air Laya (TAL) pada *seam* batubara A1 (1 sampel), A2 (1 sampel), B1 (1 sampel), dan B2 (1 sampel) dengan interval jarak pengambilan terhadap tubuh intrusi *dike* yang sudah ditentukan. Sampel A1 memiliki jarak terdekat ($\pm 0-5$ m) terhadap kontak tubuh intrusi *dike* dan secara berurutan hingga sampel batubara B2 yang memiliki jarak terjauh (± 25 m). Dilakukan pula akuisisi data log yang didapat dari sumur bor BGT_19 PT Bukit Asam (Persero), Tbk yang terletak 100 m di Timur dari titik pengambilan sampel (Gambar 3). Deskripsi makroskopis tiap sampel di lapangan digunakan sebagai data acuan awal untuk melihat perubahan karakteristik fisik dari batubara yang dipengaruhi intrusi.

Tiap sampel yang diperoleh dipreparasi untuk sayatan poles serta analisis proksimat. Analisis petrografi batubara mengacu pada ASTM-D2799-05a (2005) dan identifikasi maseral dilakukan berdasarkan ICCP System 1994 (1998) untuk vitrinit, ICCP (2001) untuk inertinit, dan Pickel *et al.*, (2017) untuk liptinit. Analisis proksimat dilakukan sesuai dengan ASTM Standards D3172-13 (2013) untuk memperoleh nilai *ash yield* (kadar abu), *moisture* (kadar lengas), *volatile matter* (kadar zat terbang), dan *fixed carbon* (karbon tertambat). Analisis *random vitrinite reflectance* (R_{vr}) atau reflektansi *vitrinite* dilakukan dengan mengikuti rekomendasi dari ISO 7404-5 (2009) dan analisis *micro-Raman Spectroscopy* dilakukan untuk mengetahui derajat pembatubaraan atau peringkat batubara. Analisis *X-ray diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi mineralogi yang hadir dengan mengacu pada Chen (1997). Analisis *total carbon* (TC), *total inorganic carbon* (TIC), dan *total organic carbon* (TOC) menggunakan Elementar Soli TOC® cube (Girard, 2001) juga dilakukan untuk seluruh sampel penelitian.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian dan ilustrasi singkapan (PT. Bukit Asam Tbk., 2012) yang menunjukkan jarak relatif pengambilan sampel dengan tubuh intrusi dike serta data log BGT_19 yang diberikan menunjukkan hadirnya intrusi sill pada kedalaman 14 m di bawah B2 (PT. Bukit Asam Tbk., 2010)

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Karakteristik Makroskopis

Berdasarkan hasil observasi secara makroskopis, sampel batubara (A1, A2, B1, dan B2) di lokasi penelitian memiliki litotipe *bright banded coal*. Batubara A1 yang memiliki jarak terdekat dengan kontak intrusi dicirikan dengan dijumpainya deformasi berupa struktur kolumnar yang hadir diakibatkan adanya metamorfisme kontak. Bukti adanya intrusi juga terekam pada lapisan *interburden* berupa batupasir antara *seam* A1 dan A2 yang mana lapisan yang berkontak langsung dengan terobosan intrusi tersebut mengalami pengerasan tekstur yang merupakan implikasi dari *baking effect* atau efek panggang yang diakibatkan intrusi (Gambar 4).

Karakteristik Petrografi

Hasil analisis maseral dan mineral (Gambar 5) menunjukkan bahwa seluruh sampel batubara penyusunnya didominasi oleh vitrinit (85,8-93,3%), liptinit lebih sedikit (2,5-7%) serta lebih sulit diamati, kemudian diikuti inertinit (1,8-6%), dan *mineral matter* (1,1-2,23%), sebagian besar berupa mineral lempung, pirit, dan kuarsa (Tabel 1). Pada kenampakan mikroskopis batubara A1 sudah menunjukkan banyaknya pori serta struktur vesikel yang menjadi indikasi devolatilisasi (Gambar 6). Struktur ini sangat jarang dijumpai pada sampel A2, B1, dan B2 yang memiliki jarak yang lebih jauh dari tubuh intrusi *dike*.

Pada Tabel 1 juga ditampilkan hasil analisis *random vitrinite reflectance* (R_v) dari tiap sampel. Nilai yang didapat juga digunakan untuk menentukan peringkat masing-masing sampel batubara. Batubara A1 mencapai 2,01% *mean random reflectance* (*low volatile bituminous coal*), A2 mencapai 1,68% (*medium volatile bituminous coal*), B1 mencapai 1,27% (*high volatile bituminous coal*), dan B2 memiliki nilai 1,88% (*low volatile bituminous coal*).

Analisis Proksimat

Hasil analisis proksimat tiap sampel (Tabel 1) menunjukkan bahwa *ash yield* (kadar abu) tiap sampel senilai 2,1-4,2%, kandungan *moisture* (kadar lengas) 2,9-4,1%, kandungan *volatile matter* (kadar zat terbang) 7,8-29,1%, dan *fixed carbon* (karbon tertambat) 65,5-88,8%.

Identifikasi *mineral matter*

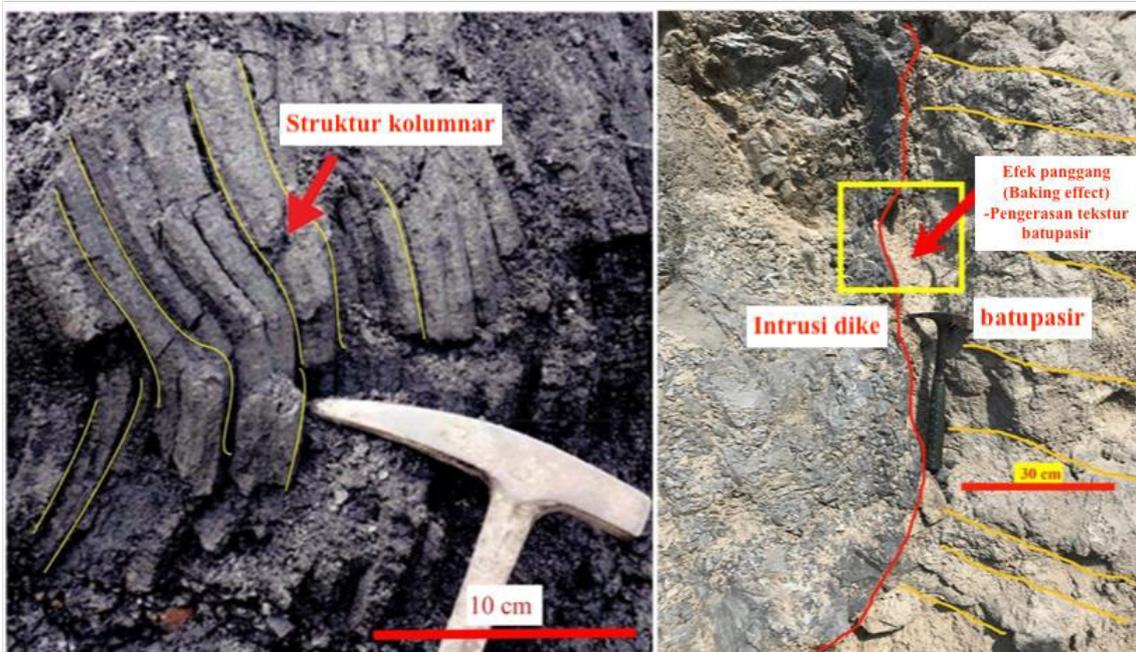
Berdasarkan hasil pengamatan petrografi (Tabel 1) diketahui bahwa batubara A1 memiliki kandungan mineral sebesar 2,23%, A2 memiliki 1,1%, B1 memiliki 1,5% dan B2 dengan 1,2%.

Analisis XRD (Gambar 7) digunakan untuk mendukung data petrografi serta mengidentifikasi kehadiran mineral yang kurang dapat diamati secara visual menggunakan mikroskop. Berdasarkan identifikasi nilai d serta 2θ (Gambar 7), mineralogi batubara tiap sampel disarikan pada Tabel 1. Smektit, illit, dan rektorit merupakan mineral yang teridentifikasi pada A1 dan seiring bertambahnya jarak terhadap intrusi, mineral ilite dan rektorit jarang atau bahkan tidak ditemui. Pada analisis XRD mineral grafit hanya teridentifikasi pada batubara A1 dan B2. Analisis XRD untuk menentukan kehadiran grafit pada batubara mempunyai tingkat akurasi atau tingkat kepercayaan data yang ada tidak terlalu tinggi sehingga diperlukan analisis pendukung lainnya seperti analisis TIC untuk melihat kandungan karbon inorganik dan juga analisis *micro-Raman spectroscopy* untuk mengetahui derajat pembatubaraan tiap sampel.

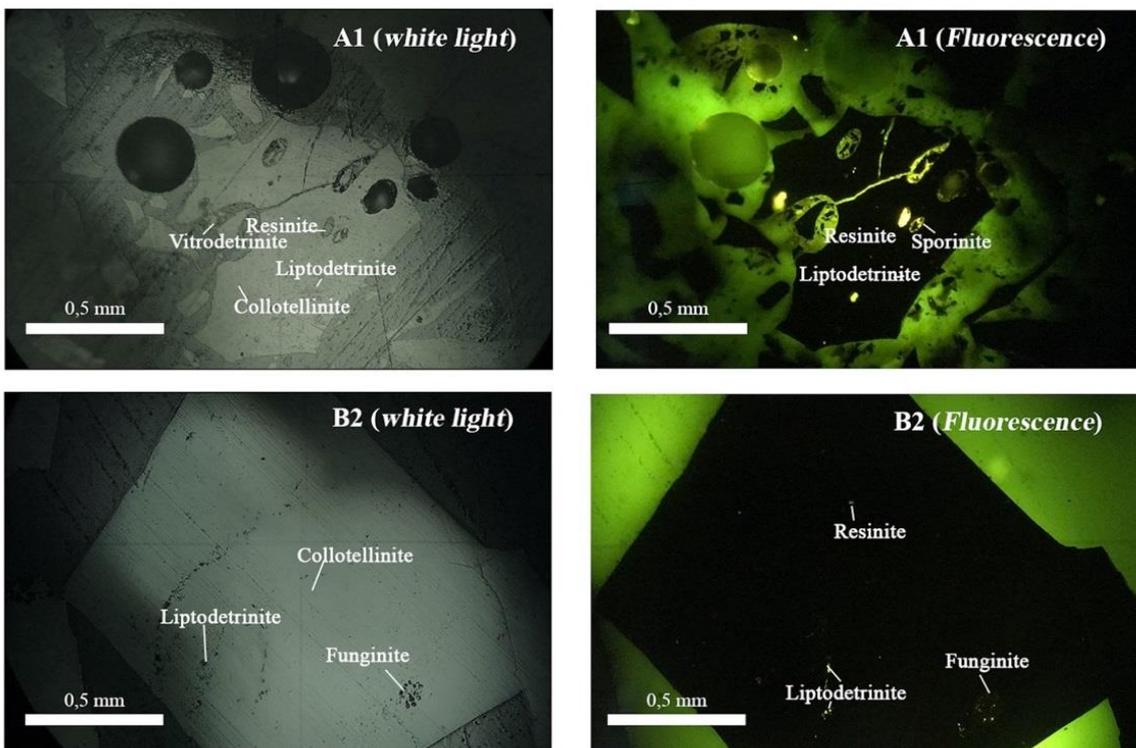
Hasil analisis TC, TIC, dan TOC ditampilkan pada Tabel 1. Berdasarkan hasil tersebut diketahui B2 (jarak terjauh terhadap intrusi *dike*) memiliki kandungan TIC yang tertinggi senilai 6,01% sedangkan A1 yang memiliki jarak terdekat dengan intrusi memiliki nilai 3,42%. Masing-masing sampel juga diuji dengan analisis *micro-Raman spectroscopy*. Pada Gambar 8 tampak dua gelombang

yakni D dan G yang mendekati nilai sekitar 1360 dan 1590 cm^{-1} . Kedua gelombang ini digunakan untuk mengetahui derajat pembatubaraan yang dialami tiap sampel

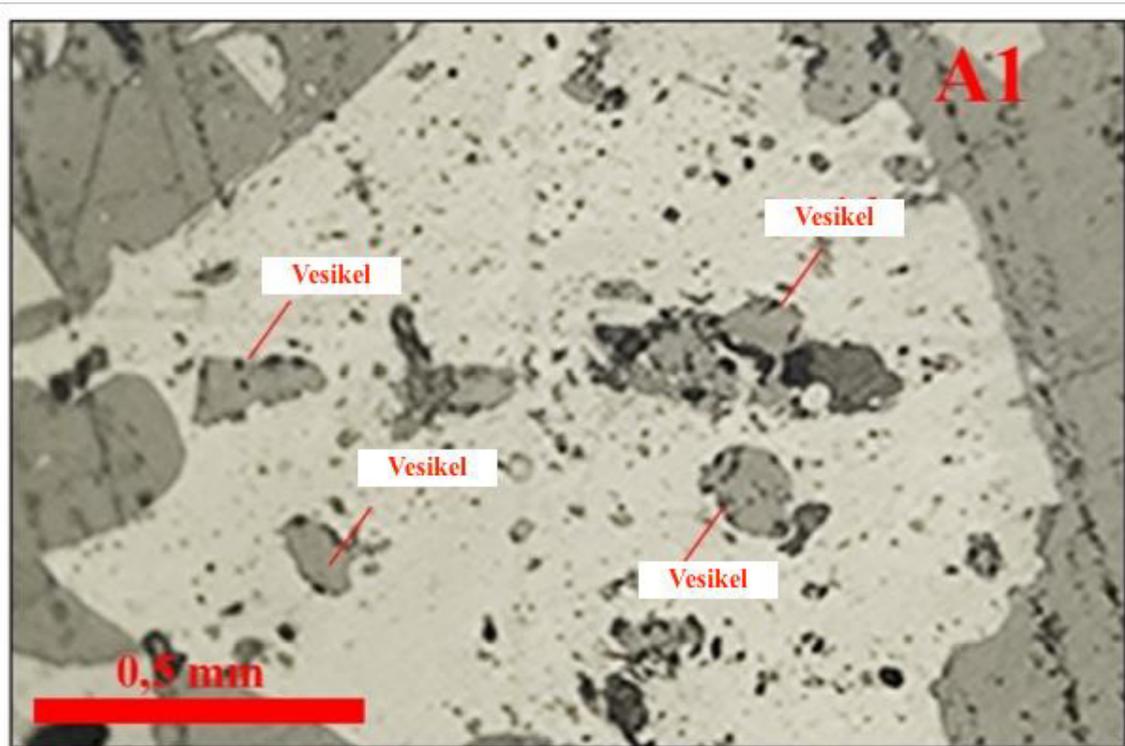
batubara serta digunakan juga untuk dapat mendukung data lain dalam pengidentifikasian potensi kandungan grafit pada batubara lokasi penelitian.



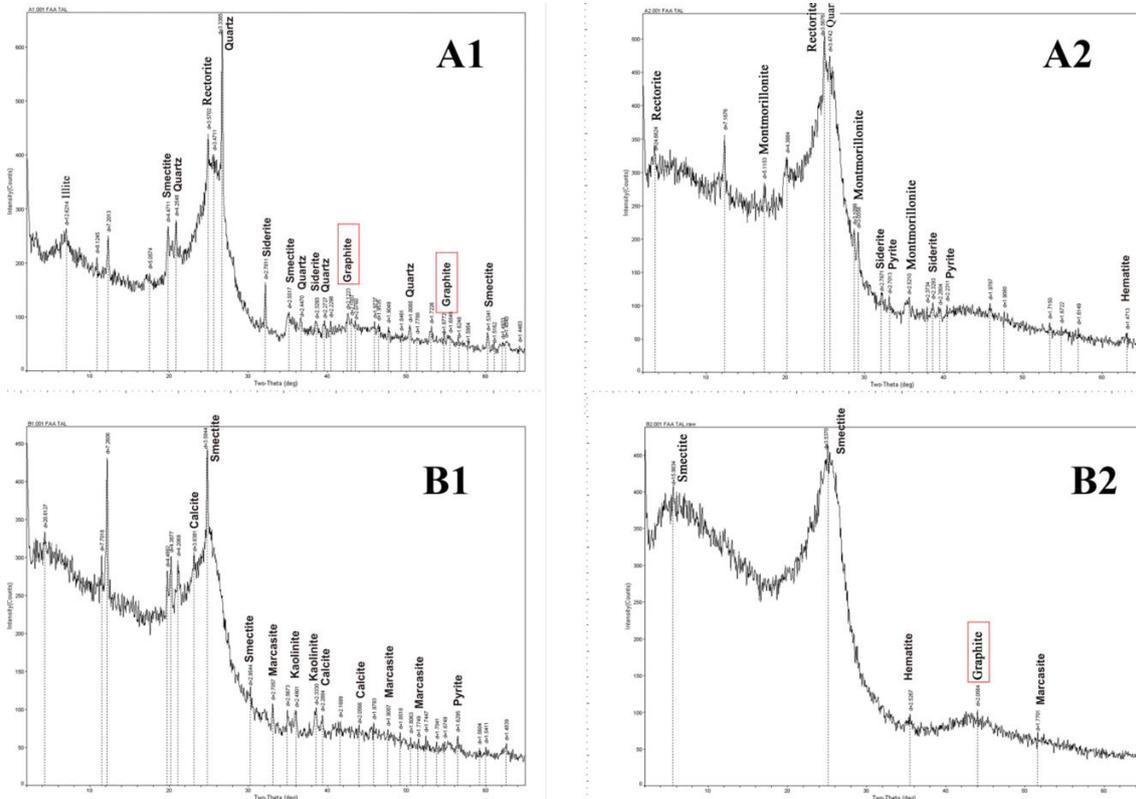
Gambar 4. Bukti adanya metamorfisme kontak pada batubara A1. Struktur komlumnar (kiri) dan *baking effect* pada batupasir (kanan)



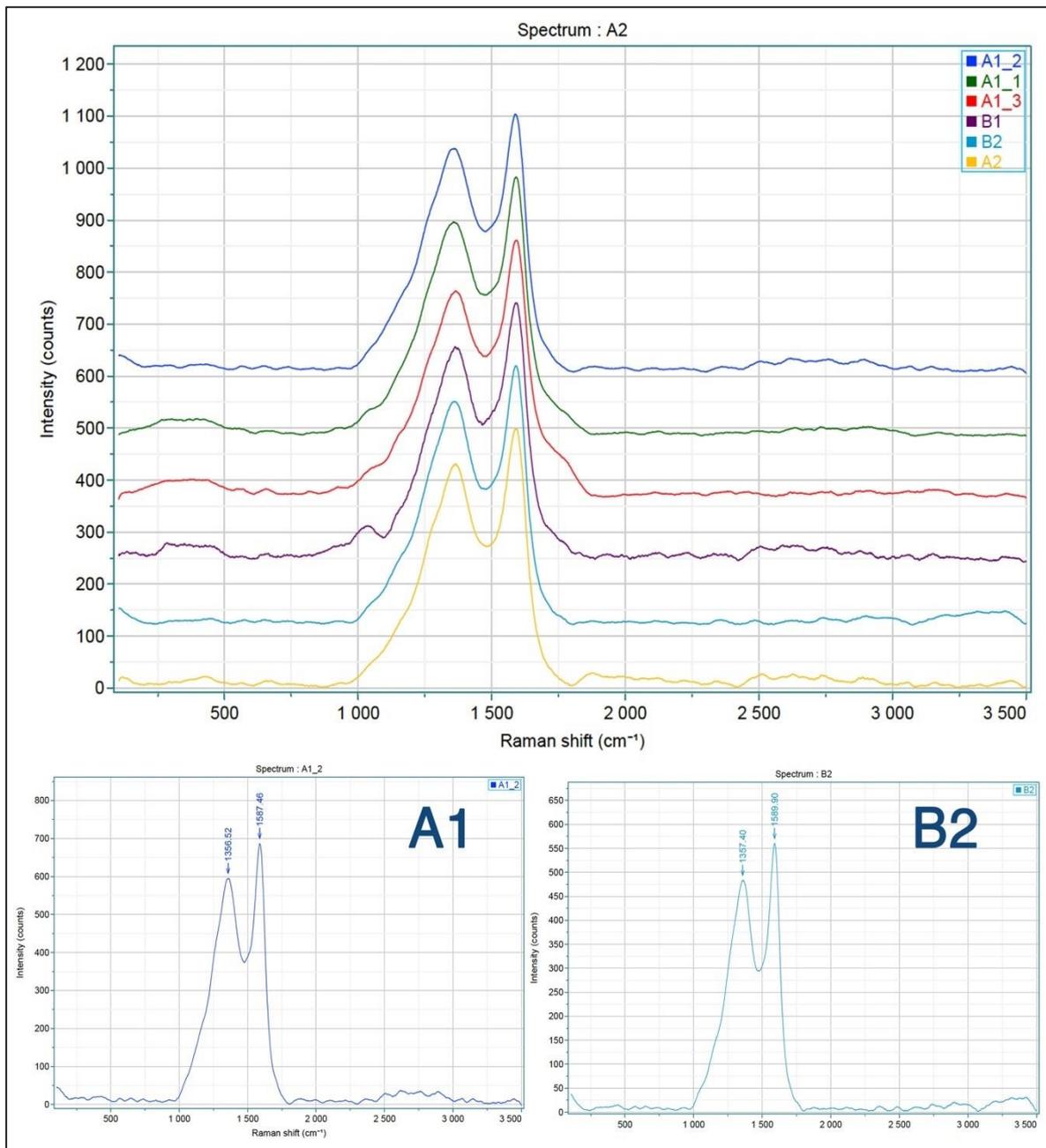
Gambar 5. Contoh kenampakan batubara A1 (atas) dan B2 (bawah) dibawah mikroskop dengan pengamatan *white light* dan *fluorescence*



Gambar 6. Struktur Vesikel pada batubara A1. Struktur ini mengindikasikan adanya devolatilisasi



Gambar 7. Hasil analisis XRD tiap sampel. Grafit hanya teridentifikasi pada batubara A1 dan B2



Gambar 8. Perbandingan hasil pengukuran analisis *micro-Raman Spectroscopy* tiap sampel serta perbandingan khusus pengujian pada sampel yang dijumpai adanya grafit yakni sampel A1 dan B2.

Tabel 1. Ringkasan seluruh hasil analisis *random vitrinite reflectance*, komposisi maseral dan mineral, analisis proksimat, dan analisis TIC-TOC-TC. Analisis petrografi dan data TIC-TOC-TC sampel A2, B1, B2 telah dipublikasikan dalam Maluana *et al.*, (2019)

Sampel	Random Vitrinite Reflectance (R _v)	Peringkat Batubara (Diesel, 1992)	Analisis Petrografi Sayatan Poles (%)						Mineral yang teridentifikasi analisis XRD	Analisis Proksimat								
			Maseral		Mineral matter		ash yield /kadar abu (%)	moisture/ kadar air (%)		Volatile matter/ zat terbang (%)	Fixed carbon/ karbon tertambat (%)	TIC 900 (%)	TOC 400 (%)	TC (%)				
			Vitrinit	Liptinit	Inertinit	Pirit									Mineral lempung	Kuarsa	Mineral lain	Total Mineral
A1	2,01	Low volatile bituminous coal	92,1	3,4	1,8	0,3	0,73	0,63	0,57	2,23	Kuarsa, Smektit, lit, Rektorit, Siderit, Grafit, Pirit	2,9	3,7	12	83,3	3,42	75,39	78,7
A2	1,68	Medium volatile bituminous coal	89,7	5,3	3,8	0,2	0,2	0,5	0,2	1,1	Kuarsa, Monmorilonit, Hematit, Rektorit, Siderit, Pirit	2,9	4,1	11,6	84	2,85	80,42	83,3
B1	1,27	High volatile bituminous coal	93,3	2,5	2,3	0,5	0,2	0,3	0,5	1,5	Kuarsa, Smektit, Kalsit, Markasit, Kaolin, Pirit	4,2	2,9	29,1	65,5	5,57	75,85	81,4
B2	1,88	Low volatile bituminous coal	85,8	7	6	0,2	0,5	0,3	0,2	1,2	Kuarsa, Smektit, Hematit, Grafit, Markasit	2,1	3,8	7,8	88,8	6,01	84,62	90,6

PEMBAHASAN

KARAKTERISTIK BATUBARA TERPENGARUH INTRUSI

Kenampakan makroskopis batubara terpengaruh intrusi

Berdasarkan data yang diperoleh di lapangan diketahui bahwa sampel A1, A2, B1, dan B2 memiliki litotipe *bright banded*. Kenampakan batubara yang berasal dari *seam* A1 memiliki kesan lebih kusam yang diakibatkan oleh pemanasan dan kenaikan peringkat secara cepat yang dikarenakan hadirnya intrusi (O'Neill, 2016). Berkebalikan dengan batubara A1, batubara B2 yang mempunyai jarak terjauh dari tubuh intrusi *dike* memiliki kilap yang paling cerah dibandingkan sampel lainnya karena durasi *burial coalification* atau pembebanan yang terlama dibanding sampel lainnya. Bukti makroskopis pengaruh intrusi terhadap batubara daerah penelitian adalah ditemukannya struktur kolumnar (Gambar 4) hanya pada batubara A1 yang memiliki jarak terdekat dari tubuh intrusi. Struktur ini muncul akibat hadirnya panas secara tiba-tiba pada *seam* batubara yang dekat dengan kontak intrusi sehingga terjadi devolatilisasi pada batubara tersebut (Pareek, 1965).

Maseral batubara terpengaruh intrusi

Berdasarkan kenampakan petrografi maseral tiap sampel menunjukkan adanya perbedaan terutama pada kenampakan kelompok maseral vitrinit masing-masing sampel. Pada sampel batubara *seam* A1 yang memiliki jarak terdekat terhadap tubuh intrusi memperlihatkan tekstur dari maseral yang cenderung sudah tidak utuh atau terkesan terpecah-pecah serta tampak juga pori atau struktur vesikel dengan jumlah yang signifikan pada sampel A1 (Gambar 6). Struktur tersebut mengindikasikan adanya proses devolatilisasi yang datang secara cepat dan tiba-tiba yang diakibatkan oleh intrusi (Amijaya dan Littke, 2005). Sedangkan pada sampel A2, B1, dan B2 yang berturut-turut jaraknya semakin jauh dari tubuh intrusi *dike* tidak diketemukan adanya

struktur vesikel akibat devolatilisasi seperti yang dijumpai pada batubara A1.

Random *vitrinite reflectance* batubara terpengaruh intrusi

Data *random vitrinite reflectance* yang diperoleh pada Tabel 1 menunjukkan bahwa seluruh sampel memiliki rentang nilai rata-rata *random vitrinite reflectance* sebesar 1,27 - 2,01% yang berarti seluruh sampel merupakan batubara yang terpengaruh intrusi. Penentuan peringkat batubara pada penelitian ini akan menggunakan nilai *vitrinite reflectance*. Nilai *vitrinite reflectance* dapat menunjukkan derajat pembatubaraan yang merupakan proses yang dikontrol oleh temperatur serta durasi pemanasan (Stach *et al.*, 1982). Berdasarkan konsep *burial coalification* atau pembebanan massa, maka kenaikan nilai peringkat batubara akan terjadi seiring bertambahnya kedalaman (Thomas, 2002) sehingga seharusnya batubara B2 sebagai *seam* tertua memiliki peringkat tertinggi dan dilanjutkan oleh batubara B1, A2, dan A1 secara berurutan dengan memiliki peringkat lebih rendah. Namun berdasarkan data pengukuran *vitrinite reflectance* pada Tabel 1 terdapat anomali pada nilai *random vitrinite reflectance* yang didapat. Batubara A1 yang seharusnya merupakan batubara termuda memiliki nilai reflektansi yang paling tinggi (2,01%) dibandingkan batubara *seam* A2, B1, dan B2. Hal ini mengindikasikan bahwa batubara *seam* A1 telah terpengaruh oleh intrusi dan juga lokasi pengambilan sampel batubara A1 dengan peringkat *low volatile bituminous coal* merupakan yang terdekat dengan tubuh intrusi. Pada batubara B2 yang lokasinya terjauh terhadap tubuh intrusi juga berperingkat sama dengan batubara A1 diakibatkan oleh *burial coalification* atau pembebanan yang terjadi dan juga apabila mengacu kepada Shell Mijnbouw (1978) dan Pujobroto (1997) terdapat intrusi konkordan yang disebut intrusi *sill* Suban yang berada di bawah *seam* B2 atau tepatnya berada di antara *seam* B2 dan C. Sehingga hal tersebut yang menyebabkan pengaruh intrusi terhadap batubara B2 juga intensif.

Analisis proksimat batubara terpengaruh intrusi

Berdasarkan Teichmüller & Teichmüller (1979) penurunan nilai *moisture* (kadar lengas) dan *volatile matter* (zat terbang) merupakan indikasi kenaikan peringkat batubara akan tetapi berdasarkan analisis data proksimat yang telah dilakukan penurunan nilai kandungan *moisture* (kadar lengas) dan *volatile matter* (zat terbang) dari *seam* B2 menuju *seam* A1 tidak menunjukkan pola kenaikan atau penurunan. Begitu pula peningkatan kandungan *fixed carbon* (karbon tertambat) yang kurang signifikan. Sedangkan *ash yield* (kadar abu) yang didapat tidak menunjukkan adanya tren peningkatan. Menurut Rimmer, et al. (2009) kandungan *ash yield* (kadar abu) memiliki kecenderungan untuk meningkat seiring dekatnya jarak *seam* batubara terhadap tubuh intrusi akan tetapi hal ini tidak selalu terjadi.

Sehingga dapat dikatakan bahwa perbedaan signifikan yang terkait dengan derajat pembatubaraan hanya terlihat dari data *random vitrinite reflectance* (Tabel 1) bahwasannya batubara A1 yang memiliki jarak terdekat dengan tubuh intrusi *dike* memiliki nilai *random vitrinite reflectance* yang paling tinggi (2,01%) dibandingkan dengan batubara A2, B1, dan B2 yang berarti bahwa derajat pembatubaraan yang dialami batubara A1 merupakan yang tertinggi pada lokasi penelitian.

Mineralogi batubara terpengaruh intrusi

Mineralogi sampel daerah penelitian didapatkan dari hasil pengamatan petrografi (Tabel 1) yang kemudian didukung dengan analisis XRD (Gambar 7 dan Tabel 1). Pengamatan petrografi (Tabel 1) menunjukkan bahwa kandungan mineral pada sampel yang diteliti nilainya cukup rendah. Sampel batubara terpengaruh intrusi *seam* A1 memiliki kandungan mineral yang tertinggi dengan nilai 2,23%. Beberapa mineral yang dapat teramati secara visual dalam pengamatan petrografi diantaranya kuarsa, mineral lempung, dan pirit. Berdasarkan

kelimpahannya mineral pirit adalah yang paling jarang dijumpai dibandingkan mineral lempung dan kuarsa. Batubara A1 memiliki kandungan mineral lempung tertinggi dengan nilai 0,73%. Kandungan mineral pada sampel penelitian yang rendah dan sulitnya untuk diamati secara visual maka dilakukan analisis XRD untuk membantu mengidentifikasi mineral yang terkandung dalam sampel. Pada batubara *seam* A1 teridentifikasi kuarsa dengan *peak* dengan intensitas tertinggi yakni $\sim 3,34 \text{ \AA}$ dan $\sim 4,25 \text{ \AA}$. Mineral lempung yang teridentifikasi berupa illit pada *peak* $\sim 4,5 \text{ \AA}$ dan $\sim 12,9 \text{ \AA}$, smektit pada *peak* $\sim 4,4 \text{ \AA}$ serta hadirnya rektorit yang merupakan mineral lempung yang terdiri atas mika dioktahedral dan smektit yang dicirikan pada *peak* $3,57 \text{ \AA}$. Teridentifikasi pula kehadiran mineral grafit yang menunjukkan *peak* $\sim 2,12 \text{ \AA}$ dan $\sim 1,67 \text{ \AA}$. Pada batubara A2 mineral lempung yang teridentifikasi berupa rektorit dan montmorillonit pada *peak* $\sim 5,1 \text{ \AA}$ dan $\sim 3,05 \text{ \AA}$. Pada batubara A2, B1, dan B2 juga teridentifikasi pula mineral karbonat seperti siderit dan kalsit serta mineral sulfida seperti pirit dan markasit. Pada batubara B2 teridentifikasi hadirnya mineral grafit dengan intensitas yang lemah pada *peak* $\sim 2,05 \text{ \AA}$. Berdasarkan data yang diperoleh (Gambar 7 dan Tabel 1) dapat diketahui bahwa terdapat perubahan mineralogi seiring dengan bertambahnya peringkat batubara. Menurut Susilawati dan Ward (2006) yang melakukan penelitian di lokasi penelitian yang sama menyatakan bahwa batubara yang mengalami kenaikan peringkat akibat terpengaruh intrusi akan mengandung interstratifikasi illit/smektit, rektorit, dan paragonit di beberapa kasus dengan proporsi yang signifikan serta adanya pengurangan kandungan kaolinit. Apabila dilihat dari hasil XRD sampel penelitian tampak bahwa sampel A1 yang terdekat dengan tubuh intrusi teridentifikasi mineral seperti smektit, illit, dan rektorit serta tidak teridentifikasinya kehadiran kaolinit. Sebaliknya, pada batubara B1 yang posisinya lebih jauh dari tubuh intrusi dibanding dengan batubara A1, *peak* mineral kaolinit masih dapat teridentifikasi karena proses illitisasi pada batubara

tersebut masih belum intens sehingga tidak ditemukan ilit ataupun rektorit. Proses perubahan mineralogi ini diakibatkan dari proses pemanasan oleh tubuh intrusi yang memungkinkan memindahkan kandungan *moisture* (kadar lengas), elemen inorganik pada batubara peringkat rendah atau fluida panas menuju lapisan pembawa batubara sehingga komponen mineral pada batubara tersebut akan berubah (Susilawati dan Ward, 2006).

POTENSI BATUBARA TERPENGARUH INTRUSI SEBAGAI MATERIAL PEMBUATAN GRAFIT SINTETIS

Proses pematubaraan yang dialami oleh batubara selama terendapkan merupakan gabungan proses biologi, kimia, dan fisika yang dipengaruhi oleh pembebanan sedimen, temperatur, tekanan dan waktu (Stach, 1982). Seiring dengan peningkatan derajat pematubaraan yang dialami batubara yang juga disertai dengan kenaikan peringkat batubara maka pada suatu kondisi akan memasuki tahap grafitisasi (Levine, 1993). Pada lokasi penelitian ditemui faktor lain yang menyebabkan meningkatnya derajat pematubaraan selain *burial coalification* atau pembebanan yakni pengaruh intrusi *dike* yang hadir sehingga panas yang dihasilkan intrusi tersebut berkontribusi dalam peningkatan derajat pematubaraan batubara di lokasi penelitian. Pengamatan dan analisis yang telah dilakukan pada seluruh sampel diketahui bahwa batubara A1 yang memiliki jarak terdekat dengan tubuh intrusi mengalami perubahan karakteristik akibat dari panas intrusi yang lebih intens dibandingkan dengan batubara lainnya.

Secara makroskopis, pada batubara A1 terdapat kenampakan struktur kolumnar (Gambar 4) yang disebabkan oleh proses devolatilisasi akibat panas intrusi (Pareek, 1965). Struktur ini tidak dijumpai pada sampel A2, B1, dan B2 yang jaraknya berturut-turut semakin jauh dari tubuh intrusi. Hal ini merupakan indikasi awal pada penelitian bahwa batubara A1 telah mengalami kenaikan derajat

pematubaraan tertinggi dibanding batubara lainnya yang dipengaruhi dari intrusi.

Melalui pengamatan mikroskopis tampak batubara A1 menunjukkan kenampakan struktur vesikel yang kerap ditemui (Gambar 6) serta kenampakan bentuk maseral yang terpecah-pecah sedangkan pada batubara A2, B1, B2 kenampakan struktur vesikel jarang atau tidak dijumpai serta memiliki kenampakan bentuk maseral yang utuh dibandingkan batubara A1. Hal ini merupakan bukti mikroskopis bahwa batubara A1 telah mengalami kenaikan derajat pematubaraan tertinggi dibanding batubara lainnya.

Berdasarkan pengukuran *vitrinite reflectance* (Tabel 1) diketahui bahwa batubara A1 memiliki nilai rata-rata *vitrinite reflectance* tertinggi yakni sebesar 2,01% kemudian beturut-turut diikuti dengan nilai yang lebih kecil oleh batubara A2, B1, dan B2. Adanya sedikit kenaikan nilai *vitrinite reflectance* pada batubara B2 (%Ro=1,88%) diperkirakan berasal dari keberadaan intrusi *sill* yang berada di bawah *seam* B2. Berdasarkan hal tersebut diketahui bahwa peringkat batubara tertinggi pada penelitian ini dimiliki oleh batubara A1 dan B2 yang merupakan *low volatile bituminous coal*. Secara keseluruhan, terbukti bahwa batubara A1 memiliki derajat pematubaraan tertinggi yang diindikasikan nilai *vitrinite reflectance* tertinggi.

Kandungan mineralogi batubara A1 di daerah penelitian diketahui memiliki rerata kandungan mineral tertinggi (2,23%) dibandingkan sampel batubara lainnya (Tabel 1) dengan ditemui banyak asosiasi mineral penciri batubara berperingkat tinggi seperti ilit, smektit, dan *rektorit* yang dapat meningkatkan derajat kristalinitas dalam proses pematubaraan (Susilawati & Ward, 2006; Rodrigues *et al.*, 2012).

Berdasarkan data yang diperoleh hadirnya mineral grafit pada sampel penelitian hanya dapat teridentifikasi melalui data XRD (Gambar 7 dan Tabel 1). *Peak* mineral

grafit dijumpai pada sampel batubara A1 dan B2. Penentuan kehadiran grafit yang hanya didasari oleh analisis XRD memiliki tingkat kepercayaan yang kurang tinggi sehingga perlu dielaborasi dengan data analisis lainnya untuk mengetahui potensi sampel batubara yang memiliki derajat pematubaraan tertinggi untuk dapat dijadikan material dalam pembuatan grafit sintetis. Apabila dilihat melalui data TIC (Tabel 1) diketahui bahwa B2 memiliki nilai yang lebih tinggi yakni sebesar 6,01% sedangkan A1 memiliki rerata nilai 3,42% akan tetapi kandungan karbon inorganik dari masing-masing sampel belum sepenuhnya merepresentasikan kandungan grafit secara keseluruhan dapat juga ditemukan kandungan karbonat serta CO₂ terlarut yang turut serta terhitung. Berdasarkan nilai kandungan *ash yield* (kadar abu) dari analisis proksimat serta nilai kandungan *mineral matter* dari pengamatan petrografi diketahui bahwa batubara A1 memiliki nilai rerata yang lebih tinggi dibandingkan dengan nilai B2 sehingga kehadiran mineral grafit berada pada batubara A1 juga menunjukkan bahwa batubara A1 juga memiliki derajat pematubaraan yang lebih tinggi. Kedua batubara tersebut memiliki peringkat yang sama yakni *low volatile bituminous coal*, akan tetapi nilai *vitrinite reflectance* keduanya berbeda. Sampel batubara A1 memiliki nilai rerata *vitrinite reflectance* senilai 2,01% sedangkan batubara B2 memiliki nilai yang lebih rendah yakni 1,88% yang berarti batubara *seam* A1 memiliki derajat pematubaraan yang lebih tinggi. Selain itu, berdasarkan data *micro-Raman Spectroscopy* juga terlihat bahwasannya intensitas gelombang D dan G yang tertinggi dimiliki oleh batubara A1 (dilakukan tiga kali pengujian untuk sampel A1) dibandingkan dengan batubara lainnya sehingga dapat diartikan bahwa batubara A1 telah mengalami derajat pematubaraan yang lebih tinggi. Kurva gelombang D dan G pada *seam* A1 berada pada nilai sekitar 1360 dan 1590 cm⁻¹ dan nilai ini mendekati kurva grafit.

Berdasarkan Levine (1993) salah satu karakteristik batubara yang berubah akibat

metamorfisme yang dipengaruhi intrusi adalah meningkatnya peringkat atau derajat pematubaraan yang dialami oleh batubara tersebut serta kenaikan derajat pematubaraan juga erat kaitannya dengan meningkatnya pula derajat kristalinitas dari material karbon penyusun batubara tersebut hingga mencapai tahap terbentuknya grafit atau grafitisasi. Proses pematubaraan hingga grafitisasi dikontrol oleh temperatur, waktu, material penyusun asal, aktifitas fluida di sekitar batuan, tekanan serta tegangan dan regangan akibat deformasi yang terjadi pada batuan tersebut (Large *et al.*, 1994). Akan tetapi, parameter pengontrol pematubaraan termasuk juga grafitisasi tersebut belum dapat dikaji secara kuantitatif serta komprehensif (Beyssac *et al.*, 2002).

Berdasarkan Nakamura dan Akai (2013) dan Aoya *et al.* (2010) diketahui bahwa perubahan material organik menjadi grafit akibat metamorfisme yang terjadi dan diamati melalui perubahan struktur serta ukuran kristal dapat berlangsung dimulai dari terbentuknya butiran grafit amorf (*amorphous graphite*) yang terbentuk mulai suhu sekitar 330°C hingga 370°C lalu semakin meningkatnya temperatur disertai dengan perubahan struktur menjadi semakin baik hingga memasuki temperatur di atas 600°C material karbon yang ada dapat berubah menjadi grafit dengan bentuk heksagonal. Hal serupa juga disampaikan Buseck dan Beyssac (2014) bahwa material karbon yang sudah berubah menjadi grafit amorf akan mengalami transformasi menjadi grafit dengan struktur heksagonal atau dapat dikatakan bahwa seiring peningkatan metamorfisme yang diindikasikan dari peningkatan temperatur dapat meningkatkan derajat kristalinitas material karbon yang terkandung pada batubara hingga dapat terbentuknya grafit.

Hal tersebut dapat menjadi dasar bahwa batubara A1 di lokasi penelitian diperkirakan memiliki potensi terbesar untuk dijadikan sebagai material pembentukan grafit sintetis. Hal ini dikarenakan batubara A1 memiliki jarak terdekat terhadap kontak intrusi yang

diperkirakan bertemperatur sekitar 700-750°C (Amijaya dan Littke, 2005) sehingga batubara A1 memiliki derajat pematubaraan yang tertinggi dibandingkan dengan *seam* batubara terpengaruh intrusi lainnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan seluruh analisis yang dilakukan diketahui bahwa batubara terpengaruh intrusi di lokasi penelitian berlitotipe *bright banded* dengan peringkat *high volatile bituminous coal - low volatile bituminous coal* (%Ro = 1,27% - 2,01%) dengan kandungan kelompok maseral *vitritine* yang dominan. Batubara terpengaruh intrusi di daerah penelitian kurang menunjukkan adanya penurunan nilai *moisture* (kadar lengas) dan *volatile matter* (zat terbang) serta *fixed carbon* (karbon tertambat) yang meningkat secara signifikan. Nilai *ash yield* (kadar abu) pada batubara tidak menunjukkan adanya peningkatan seiring berkurangnya jarak terhadap tubuh intrusi.

Potensi tertinggi batubara terpengaruh intrusi di lokasi penelitian yang dapat dijadikan sebagai material pembuatan grafit sintetis akan dijumpai pada batubara terpengaruh intrusi pada *seam* A1 yang memiliki jarak terdekat terhadap tubuh intrusi yakni sekitar 0-5 m dari tubuh intrusi dengan derajat pematubaraan tertinggi mencapai peringkat *low volatile bituminous coal* (%Ro= 2,01%), dan nilai intensitas gelombang G dan D yang tertinggi mendekati kurva gelombang grafit, serta kandungan *ash yield* (kadar abu) 2,9 wt.%, adb; total mineral 2,23 vol.% dengan asosiasi mineral lempung yang dijumpai berupa illit, smektit, dan rektorit yang merupakan mineral penciri batubara berperingkat tinggi yang dapat meningkatkan derajat kristalinitas dalam proses pematubaraan.

Sehingga dari keseluruhan sampel batubara diketahui bahwa batubara terpengaruh intrusi yang paling berpotensi untuk dijadikan sebagai material pembuatan grafit secara berurutan adalah A1, B2, A2, dan B1. Batubara A1 dengan derajat pematubaraan tertinggi paling berpotensi untuk dijadikan sebagai material pembuatan grafit sintetis pada proses selanjutnya dibandingkan batubara B2, A2, dan B1 yang berturut-turut memiliki derajat pematubaraan yang lebih rendah dari batubara A1.

DAFTAR PUSTAKA

- Amijaya, H., dan Littke, R., 2005. Paleoenvironmental, paleoecological and thermal metamorphism implication on the organic petrography and organic geochemistry of Tertiary Tanjung Enim coal, South Sumatra Basin, Indonesia, [Dissertation]: Germany, RWTH Aachen, p.157.
- Aoya, M., Kouketsu, Y., Endo, S., Shimizu, H., Mizukami, T., Nakamura, D., dan Wallis, S., 2010. Extending the applicability of the Raman carbonaceous-material geothermometer using data from contact metamorphic rocks, *Journal of Metamorphic Geology* 28, p. 895-914.
- ASTM D2799-05a, 2005. Test Method for Microscopical Determination of the Maceral Composition of Coal.
- ASTM D3172-13, 2013. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke, *Annual Book of Standards*, vol 05.
- ASTM D3173-03, 2005. Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke: Gaseous Fuels; Coal and Coke. vol. 05.
- ASTM D3174-04, 2005. Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke: Gaseous Fuels; Coal and Coke. vol. 05.

- ASTM D3175-02, 2005. Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke: Gaseous Fuels; Coal and Coke. vol. 05.
- Beysac, O., Chopin, C., Rouzaud, J.N. dan Goffe, B., 2002 Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer, *Journal of Metamorphic Geology* 20, p. 859–871. OK
- Buseck, P., dan Beysac, O., 2014. From Organic Matter to Graphite: Graphitization, *Elements* 10, p. 421-426.
- Chen, P.Y., 1997. Table of Key Lines in X-Ray Powder Diffraction Patterns of Minerals in Clays and Associated Rocks, Department of Natural Resources Geological Survey Occasional Paper 21, p. 1-38.
- de Coster, G.L., 1974. The Geology of Central and South Sumatra Basins. In: *Proceedings 3rd Annual Convention Indonesian Petroleum Association*, p. 77–110.
- Chung, D.D.L., 2002. Review Graphite, *Journal of Materials Science* 37, p. 1475-1489.
- Daly, M.C., Hooper, B.G.D., Smith, D.G., 1987. Tertiary plate tectonics and basin evolution in Indonesia. *Proceedings of the 6th Regional Congress on Geology, Mineral and Hydrocarbon Resources of Southeast Asia (GEOSEA VI)*, Jakarta, p.1-28.
- Darman, H., Sidi, F.H., 2000. An outline of the geology of Indonesia. Indonesian Association of Geologists, Jakarta. 254 p.
- Daulay, B., Ningrum, N.S., Cook, A.C., 2000. Coalification of Indonesian coal, *Proceedings of Southeast Coal Geology Conference*. Bandung, Directorate General of Geology and Mineral Resources of Indonesia, p. 85–92.
- Diessel, C.F.K., 1992. *Coal-bearing Depositional Systems*. Springer Verlag, Berlin. p. 721.
- Franklin, R.E., 1951. Crystallite growth in graphitizing and non-graphitizing carbons, *Proceeding The Royal Society London A* 209, p. 196–218.
- Girard, I., and Klassen, R.A., 2001. A comparison of seven methods or analysis of carbon in soils, *Geological Survey of Canada, Current Research* 2001-E11, p. 9.
- International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 1998. The new vitrinite classification (ICCP System 1994), *Fuel*, vol.77, p. 349-358.
- International Committee for Coal and Organic Petrology (ICCP), 2001. The new inertinite classification (ICCP System 1994), *Fuel*, vol. 80, halaman 459-471.
- ISO7404-5,2009. Methods for the petrographic analysis of coals – Part 5: Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite. Geneva, Switzerland. 14 pp.
- Large, D.J., Christy, A.G., dan Fallick, A.E. 1994. Poorly crystalline carbonaceous matter in high grade metasediments: implications for graphitisation and metamorphic fluid compositions. *Contributions to Mineralogy and Petrology: Berlin*, Springer Verlag p. 108–116.
- Levine, J.R., 1993. *Coalification: The Evolution of Coal as Source Rock and Reservoir Rock for Oil and Gas: Alabama*, University of Alabama, p. 39-77.
- Lyons, P.c. and Chase, H.B., Jr., 1981. Rank of coal beds of the Narragansett Basin, Massachusetts and Rhode Island: *International Journal of Coal Geology*, v. 1, p. 155-168.
- Maulana, A., Patria, A.A., dan Anggara, F., 2019. Pengaruh Intrusi Terhadap Kandungan Grafit di Batubara Tambang Air Laya Wilayah Pertambangan PTBA Tanjung Enim, Sumatra Selatan, *Proceeding Seminar Nasional Kebumihan ke-12: Yogyakarta, Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada*, p. 47-55.

- Nakamura, Y., dan Akai, J., 2013. Microstructural evolution of carbonaceous material during graphitization in the Gyoja-yama contact aureole: HRTEM, XRD and Raman spectroscopic study, *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 108(3), p.131-143.
- Oberlin, A., Terriere, G., 1975. Graphitization studies of anthracites by high resolution electron microscopy, *Carbon* 13, p. 367–376.
- Olson, D.W., 2015. Graphite (Natural): U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2015, p. 68-69.
- O'Neill, T., 2016. An investigation of the self-heating properties of heat-affected coal, [published thesis]: Brisbane, School of Mechanical and Mining Engineering, The University of Queensland, p. 56.
- Pareek, H.S., 1965. Petrological Characteristic of Barakar Coal Seams, Metamorphosed by Lamprophyre Sill in The Jharia Coalfield, Bihar, Geological Survey of India, p. 261-270.
- Pickel, W., Kus, J. Flores, D., Kalaitzidis, S., Christanis, K., Cardott, B.J., Miszkennan, M., Rodrigues, S., Hentschel, A., Hamor-Vido, M., Crosdale, P., dan Wagner, N., ICCP. 2017. Classification of liptinite – ICCP System 1994, *International Journal of Coal Geology* 169, p. 40-61.
- PT. Bukit Asam (Persero) Tbk., 2010. Internal Report on Geophysical Logging. [unpublished]
- PT. Bukit Asam (Persero) Tbk., 2012. Internal Report on Intrusion Mapping. [unpublished]
- Pujobroto, A., dan Hutton, A.C., 2000. Influence of andesitic intrusions on Bukit Asam coal, South Sumatra Basin Indonesia, *Proceeding Southeast Coal Geology Conference: Bandung*, Directorate General of Geology and Mineral Resources of Indonesia, p. 81–84.
- Pujobroto, A., 1997. Organic petrology and geochemistry of Bukit Asam coal, South Sumatra, Indonesia, [Unpublished Ph.D. thesis]: Australia, University of Wollongong, p. 397.
- Rimmer, S.M., Yoksoulian, L.E., Hower, J.C., 2009. Anatomy of an intruded coal, I: Effect of contact metamorphism on whole-coal geochemistry, *Springfield (No.5) (Pennsylvanian) coal, Illinois Basin, International Journal Coal Geology* 79, p. 74-82.
- Rodrigues, S., Marques, M., Edward, C.R., Suárez-Ruiz, I., Flores, D., 2012. Mineral transformations during high temperature treatment of antrachite, *International Journal Coal Geology* 94, p. 191-200.
- Shell Mijnbouw N.V., 1978. Geological study of the Bukit Asam coal mines: Jakarta, p. 18.
- Stach, E., Mackowsy, M., Teichmuller, M., 1982. *Coal Petrology*, 3rd: Berlin, Gebruder Borntraeger.
- Susilawati, R., dan Ward, C.R., 2006. Metamorphism of mineral matter in coal from the Bukit Asam deposit, south Sumatra, Indonesia, *International Journal of Coal Geology* 68, p. 171–195.
- Simandl, G.J., Paradis, S., and Akam, C., 2015. Graphite deposit types, their origin, and economic significance, dalam *Prosiding, Symposium on Strategic and Critical Materials*, November 2015: Victoria, British Columbia, British Columbia Ministry of Energy and Mines, British Columbia Geological Survey Paper 2015-3, p. 163-171.
- Teichmüller, M., Teichmüller, R., 1979. Diagenesis of coal (coalification). In Larsen, G., Chilingar, G.V. (Eds), *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks: Elsevier, Amsterdam*, p. 207-246.
- Thomas, L., 2002. *Coal Geology: New Jersey*, John Wiley & Sons, Inc., p. 1-173.

Diterima	: 2 Oktober 2020
Direvisi	: 14 Oktober 2020
Disetujui	: 30 November 2020

POLA ALIRAN PANAS BERDASARKAN ANALISIS FLUIDA DAN MINERAL UBAHAN DI DAERAH PANAS BUMI SORIK MARAPI, KABUPATEN MANDAILING NATAL, PROVINSI SUMATRA UTARA

HEAT FLOW PATTERN BASED ON ANALYSIS OF GEOTHERMAL FLUID AND ALTERATION MINERAL IN SORIK MARAPI REGION, MANDAILING NATAL DISTRICT, NORTH SUMATRA PROVINCE

Hisyam Azhar Azizi¹, Agus Didit Haryanto¹, Johannes Hutabarat¹, Dicky Muslim¹, Dewi Gentana¹, dan Ryan Hidayat²

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

²KS Orka Renewables Pte Ltd.

hisyam16001@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Daerah panas bumi Sorik Marapi di Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Utara merupakan sistem panas bumi bertemperatur tinggi yang diduga dari karakteristik kimia air panas yang muncul di permukaan. Kehadiran mineral ubahan seperti epidot pada serbuk bor sumur eksplorasi memperkuat pendugaan temperatur reservoir yang mencapai 235°C. Karakteristik air panas bersifat lebih asam di sekitar fumarol dan mineral ubahan yang didapatkan dari sumur bor mencerminkan zona *upflow* sedangkan kelompok mata air panas berupa air klorida ber pH netral di sebelah utara dengan elevasi yang lebih rendah mencerminkan zona *outflow* sistem panas bumi di sini. Hal ini merupakan ciri khas aliran fluida panas yang terjadi di daerah panas bumi sistem vulkanik dengan morfologi terjal (*steep terrain volcanic system*) seperti halnya daerah Sorik Marapi.

Kata kunci: Sorik Marapi, geokimia, panas bumi, zona alterasi, *upflow*, *outflow*

ABSTRACT

Sorik Marapi geothermal area in Mandailing Natal Regency, North Sumatra Province has a high-temperature geothermal system that is interpreted from the chemical characteristics of hot springs. The presence of alteration minerals such as epidot in exploration well cutting samples strengthens the estimated reservoir temperature reaches 235°C. The presence of hot water are more acidic hot spring around fumaroles and the minerals obtained from the drill well reflect the upflow zone while the hot spring group of neutral chloride water in the north with lower elevation reflects the outflow zone of the geothermal system here. This is a characteristic of hot fluid flow that occurs in geothermal areas of volcanic systems with steep terrain as well as Sorik Marapi area.

Keywords: Sorik Marapi, geochemical, geothermal, alteration zones, *upflow*, *outflow*

PENDAHULUAN

Panas bumi sebagai energi terbarukan merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan sangat cocok dikembangkan di masa depan untuk memenuhi kebutuhan energi. Indonesia terletak di pertemuan tiga lempeng aktif yang memungkinkan panas bumi dari kedalaman bumi ditransfer ke permukaan

melalui sistem rekahan. Posisi strategis Indonesia menjadikan negara ini sebagai negara paling kaya dengan energi panas bumi dan sistem hidrotermal yang tersebar di sepanjang busur vulkanik. Potensi sumber energi panas bumi lebih besar dibandingkan dengan akumulasi sumber energi dari batubara, minyak dan gas bumi, serta uranium (Zulkifli, 2017).

Pulau Sumatra merupakan bagian dari rangkaian busur vulkanik yang membentang dari Pulau Sumatra di bagian barat hingga ke Pulau Banda di bagian timur, yang dikenal dengan nama Busur Vulkanik Sunda – Banda. Di daerah Sumatra Utara, busur vulkanik ini memiliki potensi panas bumi kedua terbesar di Indonesia setelah Jawa Barat, termasuk di dalamnya adalah daerah Sorik Marapi.

Daerah penelitian secara administratif berada di Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Utara. Daerah penelitian merupakan lapangan panas bumi PT. Sorik Marapi Geothermal Power, serbuk bor yang dijadikan sampel pada penelitian ini berasal dari sumur X-06, X-08 dan XE-01.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui keberadaan zona aliran panas berdasarkan karakteristik fluida dan mineral alterasi di daerah penelitian.

GEOLOGI

Pulau Sumatra merupakan pulau ke 6 (enam) terbesar di dunia. Secara ekspresi fisiografi, pulau ini memiliki orientasi berarah baratlaut-tenggara. Luas pulau ini $\pm 435.000 \text{ km}^2$, dengan panjang 1.650 km dari Banda Aceh di bagian utara hingga Tanjungkarang di bagian selatan. Lebar berkisar antara 100-200 km di bagian utara dan sekitar 350 km di bagian selatan (Juliarka & Iqbal, 2019). Pegunungan Barisan yang berada sepanjang bagian barat membagi pantai barat dan timur Pulau Sumatra. Lereng yang mengarah ke Samudera Hindia pada umumnya curam sehingga menyebabkan sabuk bagian barat biasanya berupa pegunungan. Sabuk bagian timur pada pulau ini ditutupi oleh formasi Tersier dan dataran rendah aluvial (Darman dan Sidi, 2000).

Pulau Sumatra merupakan bagian *Sundaland* yang terletak di bagian baratdaya. Oleh karena itu, teori tentang pembentukan Sumatra tidak terlepas dengan sejarah pembentukan *Sundaland* itu sendiri (Darman dan Sidi, 2000).

Secara regional geologi daerah penelitian berdasarkan pada Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping, Sumatra Utara skala 1:250.000 (Aldiss, 1983). Daerah penelitian berada di dalam terban (*graben*) Penyabungan yang merupakan bagian dari sesar Sumatra. Gunung Sorik Marapi berjarak sekitar 15 km ke arah baratlaut dari sesar Sumatra dan berdekatan dengan busur magmatik yang terbentuk di Pulau Sumatra yaitu Pegunungan Bukit Barisan.

Secara umum geologi daerah Sorik Marapi tersusun oleh batuan vulkanik Tersier dan batuan Kuartar. Batuan Tersier pada umumnya berkomposisi andesitik, sedangkan batuan Kuartar pada umumnya tersusun oleh batuan vulkanik yang berkomposisi dasitik dan batuan sedimen.

Daerah penelitian terdiri dari tujuh satuan batuan, yang terdiri dari dua satuan batuan gamping, dua satuan batuan vulkanik, satu satuan batuan terobosan, satu satuan batuan metamorf dan satu satuan endapan permukaan (aluvium). Sebagian dari batuan vulkanik tersebut diperkirakan berasal dari titik erupsi yang berbeda, yaitu Gunung Sirakara yang berumur Tersier, dan Gunung Sorik Marapi yang berumur Kuartar. Batuan gamping di daerah penelitian berumur Paleozoikum dan/atau Mesozoikum tak terbedakan (dipetakan secara tersendiri), sedangkan endapan permukaan terdiri dari material lepas yang termasuk dalam satuan aluvium. Stratigrafi satuan batuan secara berurutan dari tua ke muda adalah Satuan Metamorf (Puku), Satuan Batugamping (Mpu), Batuan terobosan (Mpip), Anggota Batugamping (Ppsl), Satuan Tuff (Tmv), Lahar Andesitik dan Breksi Gunungapi (Qvsm), dan Lava Andesit (Qhvsm) (Gambar 1).

METODE

Analisis Geokimia Panas Bumi

Analisis geokimia bertujuan untuk mengelompokkan fluida panas bumi berdasarkan perbandingan (rasio) unsur dan klasifikasinya, serta untuk memperoleh data kimia fluida dan gas, serta unsur-unsur lain yang terkandung dalam

manifestasi panas bumi sehingga dapat mengetahui jenis fluida, zona *upflow* dan zona *outflow* pada sistem panas bumi serta menentukan aliran air panasnya.

Dalam penelitian ini data kimia yang digunakan adalah data kimia air dari manifestasi panas bumi yang diolah dengan menggunakan geindikator dari masing-masing rasio unsur kimia air, selain itu juga dilakukan analisis isotop stabil. Hal ini akan menginformasikan kondisi reservoir, aliran dan lingkungan pembentukan fluida, zona *upflow* dan *outflow* dari suatu sistem panas bumi di kedalaman (Nicholson, 1993).

Geindikator

Giggenbach (1988) membagi zat-zat terlarut dalam dua katagori yaitu *tracer* dan geindikator. *Tracer* secara geokimia bersifat *inert* (misalnya Li, Rb, Cl dan B) yang apabila ditambahkan ke dalam fluida akan bersifat tetap dan dapat diidentifikasi asal usul fluidanya. Geindikator adalah zat terlarut yang bersifat reaktif dan

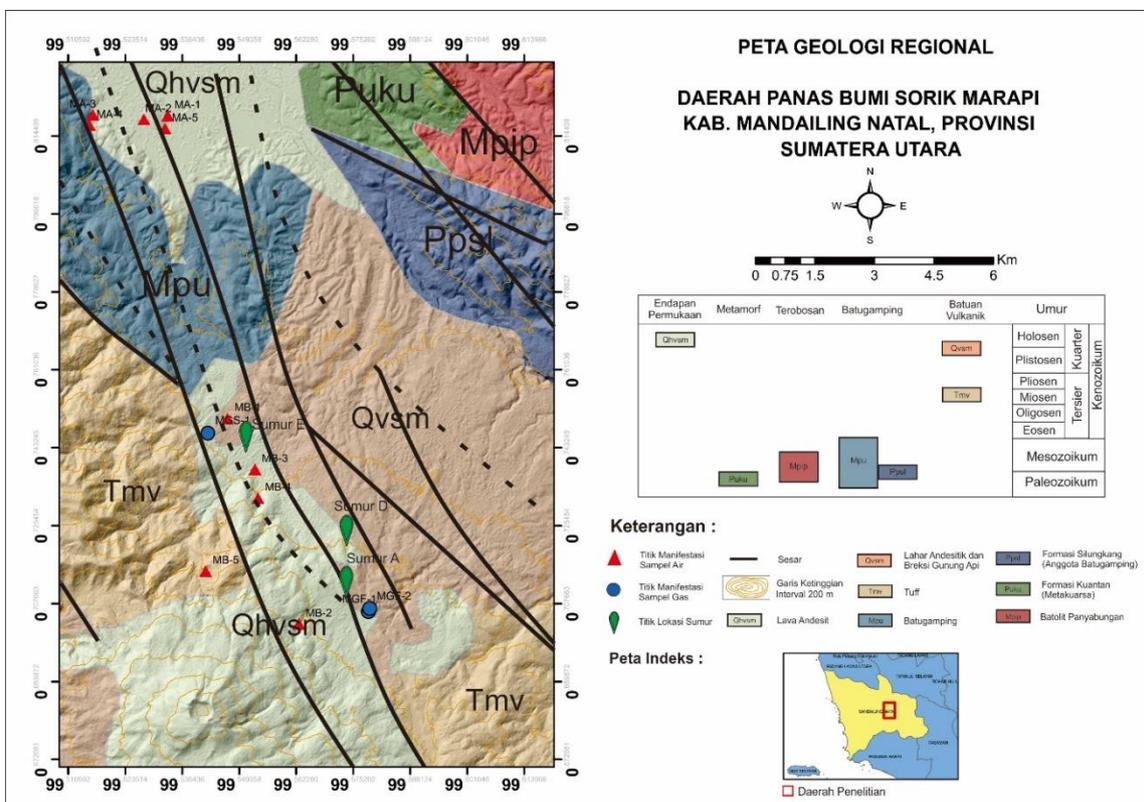
mencerminkan lingkungan *equilibrium* (kesetimbangan), misalnya Na dan K. Beberapa tipe geindikator kimia panas bumi menurut Giggenbach and Goguel (1989) yaitu:

- Geindikator Cl-SO4-HCO3
- Geindikator Cl-Li-B.
- Geindikator Na-K-Mg.

Geotermometer

Geotermometer merupakan parameter untuk menghitung atau mengukur temperatur air yang ada dalam wilayah sumber air panas dengan menggunakan termometer, dan yang menjadi objek pengukurannya adalah kandungan unsur kimia yang ada di dalam air tersebut. Adapun cara yang lain digunakan adalah dengan menggunakan persamaan yang telah ditetapkan tergantung unsur-unsur yang terkandung di dalam air (Prihadi, 2006) yaitu:

- Geotermometer Silika.
- Geotermometer Na-K.



Gambar 1. Peta Geologi Daerah Penelitian (diadaptasi dari Peta Geologi Lembar Lubuk Sikaping oleh D.T. Aldiss, 1983)

Analisis Petrografi

Melakukan deskripsi sayatan tipis batuan dan sampel serbuk (cutting) yang hasilnya berupa jenis litologi dan komposisi mineral, kehadiran mineral alterasi dan intensitas alterasi dengan bantuan mikroskop dan klorida (HCl). Analisis petrografi batuan dilakukan untuk penamaan jenis batuan dengan pendekatan kuantitatif, yang di amati dari sayatan tipis juga sampel *cutting* dan kemudian mengestimasi persentase material penyusun batuan tersebut.

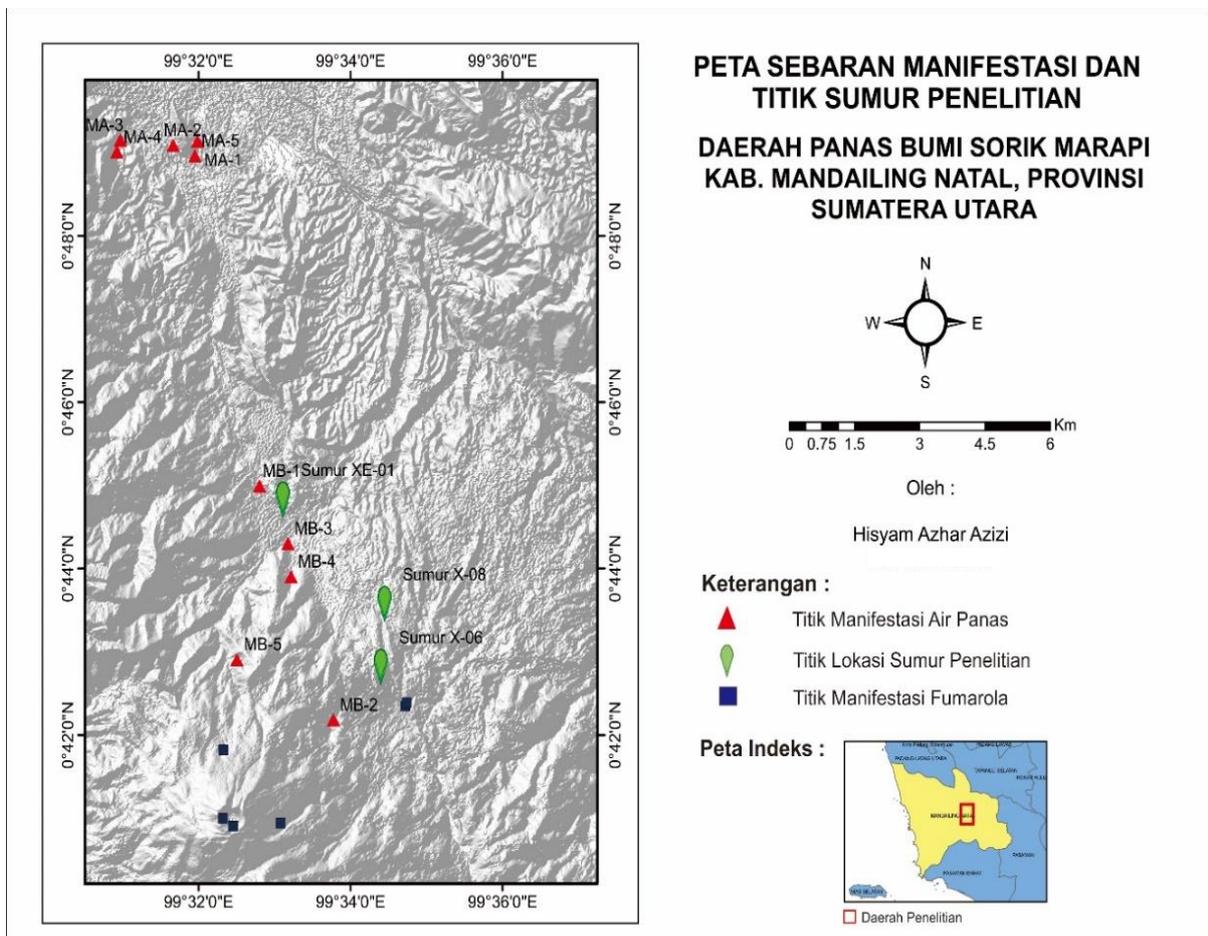
Deskripsi mineral primer dan sekunder dilakukan berdasarkan sifat optik dari mineral transparan dibawah mikroskop baik pada nikol sejajar (PPL) dan nikol bersilang (XPL). Deskripsi sifat optik dan genesa mineral mengacu pada buku *Atlas of Alteration: A field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals* (1997) oleh Thompson serta *Important*

Hydrothermal Minerals and their Significance oleh Kingston Morrison beserta referensi lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyebaran Manifestasi dan Titik Sumur di Daerah Penelitian

Karakteristik fluida panas bumi dapat diketahui dari manifestasi yang muncul di permukaan. Manifestasi panas bumi yang ditemukan di daerah Sorik Marapi berupa manifestasi air panas di 10 (sepuluh) lokasi dan terdapat 3 (tiga) sumur yang menjadi objek penelitian (Gambar 2). Dari analisis geokimia yang dilakukan terhadap beberapa sampel air di daerah penelitian, memberikan gambaran mengenai tipe fluida, kondisi *reservoir* dan sumber fluidanya sedangkan dari analisis petrografi sumur penelitian dapat diketahui zona alterasinya.



Gambar 2. Peta sebaran manifestasi panas bumi dan titik sumur permukaan yang menjadi objek penelitian.

Litologi Sumur Penelitian

Pengamatan litologi dilakukan pada 3 (tiga) sumur yaitu X-06, X-08 dan XE-01 yang didominasi oleh produk vulkanik seperti lava andesit, *dacite tuff* dan *rhyolite tuff* serta produk metamorf seperti *phyllite* dengan tingkat alterasi dari lemah hingga sangat kuat. Litologi dari 3 (tiga) sumur tersebut terdiri dari tiga satuan stratigrafi dari tua ke muda berupa satuan Metagunung api berupa *phyllite*, Satuan Tuff berupa *dacite tuff* dan *rhyolite tuff* yang sudah teralterasi, dan satuan lava andesit.

Hasil pengamatan mikroskopis dan megaskopis, sumur X-06 memiliki litologi *dacite tuff*. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari sedang (40%) hingga sangat kuat (85%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar, dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, serisit, magnetit, pirit, kuarsa sekunder, hematit dan anhidrit. Mineral sekunder epidot, serisit, dan anhidrit muncul pada kedalaman 910 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti hematit, lempung dan klorit berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

Hasil pengamatan mikroskopis dan megaskopis, sumur X-08 memiliki litologi lava andesit, *rhyolite tuff* dan *phyllite*. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari rendah (10%) hingga sangat kuat (85%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, magnetit, pirit, kuarsa sekunder dan hematit. Mineral sekunder *epidot* dan *klorit* muncul pada kedalaman 1.790 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti hematit dan lempung berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

Hasil pengamatan dan megaskopis, sumur XE-01 memiliki litologi filit. Pada sumur ini terlihat intensitas alterasi dari sedang (40%) hingga sangat kuat (90%) menurut klasifikasi intensitas alterasi oleh Browne (1991). Intensitas alterasi meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Mineral primer berupa plagioklas, kuarsa, piroksen dan k-felspar, dan mineral sekunder berupa kalsit, lempung, klorit, epidot, magnetit, pirit, kuarsa sekunder dan hematit. Mineral sekunder kalsit, pirit, klorit, epidot, serisit dan anhidrit muncul pada kedalaman 1.533 mKU, sedangkan mineral sekunder seperti kalsit, klorit, serisit, anhidrit dan lempung berkurang seiring bertambahnya kedalaman.

ZONA ALTERASI SUMUR PENELITIAN

Zona Alterasi Sumur X-06

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Kalsit-Klorit, dan Zona Kalsit-Kuarsa Sekunder. (Tabel 6)

- **Zona Hematit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kalsit, kuarsa sekunder, pirit dan klorit. Zona ini terdapat pada kedalaman 499 s.d. 502 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 120°C s.d. 170°C.

- **Zona Kalsit-Klorit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, klorit, kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral hematit, lempung, epidot, serisit, magnetit dan anhidrit. Zona ini terdapat pada kedalaman 910 s.d. 913 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 170°C s.d. 230°C.

- **Zona Kalsit – Kuarsa Sekunder**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, kuarsa sekunder, epidot dan pirit ditemukan pula mineral lempung, klorit dan

magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.861 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

Zona Alterasi Sumur X-08

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Hematit-Kalsit, dan Zona Kalsit-Epidot (Tabel 6).

• **Zona Hematit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kalsit. Zona ini terdapat pada kedalaman 253 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 50°C s.d. 150°C.

• **Zona Hematit-Kalsit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit dan kalsit ditemukan pula mineral lempung, pirit, magnetit dan kuarsa sekunder. Zona ini terdapat pada kedalaman 860 s.d. 1.230 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 150°C s.d. 230°C.

• **Zona Kalsit - Epidot**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, kuarsa sekunder dan epidot ditemukan pula mineral pirit, klorit, hematit dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.790 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

Zona Alterasi Sumur XE-01

Berdasarkan kelimpahan asosiasi mineral ubahan, sumur ini terbagi menjadi 3 zona alterasi yaitu : Zona Hematit, Zona Kalsit - Klorit, dan Zona Kuarsa Sekunder - Pirit. (Tabel 6)

• **Zona Hematit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral hematit ditemukan pula mineral kuarsa

sekunder, lempung dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 813 s.d. 816 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 120°C s.d. 170°C.

• **Zona Kalsit - Klorit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kalsit, klorit, kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral hematit, lempung, epidot, serisit, magnetit dan anhidrit. Zona ini terdapat pada kedalaman 1.533 s.d. 1.536 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 170°C s.d. 230°C.

• **Zona Kuarsa Sekunder - Pirit**

Zona ini didominasi oleh kehadiran mineral kuarsa sekunder dan pirit ditemukan pula mineral klorit, hematit, lempung, epidot, kalsit dan magnetit. Zona ini terdapat pada kedalaman 2.391 s.d. 2.394 mKU. Geotermometer mineral oleh Reyes (2000) menunjukkan bahwa zona ini memiliki temperatur 230°C s.d. 280°C.

Analisis Geokimia

Pengolahan data geokimia didapatkan dari data manifestasi (Tabel 1) dengan hasil uji sampel laboratorium air (Tabel 2) yang diaplikasikan atau di *plot* pada diagram segitiga: Cl-SO₄-HCO₃, Cl-Li-B, dan Na-K-Mg.

• **Hasil dan Analisis Geokimia Air**

Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃

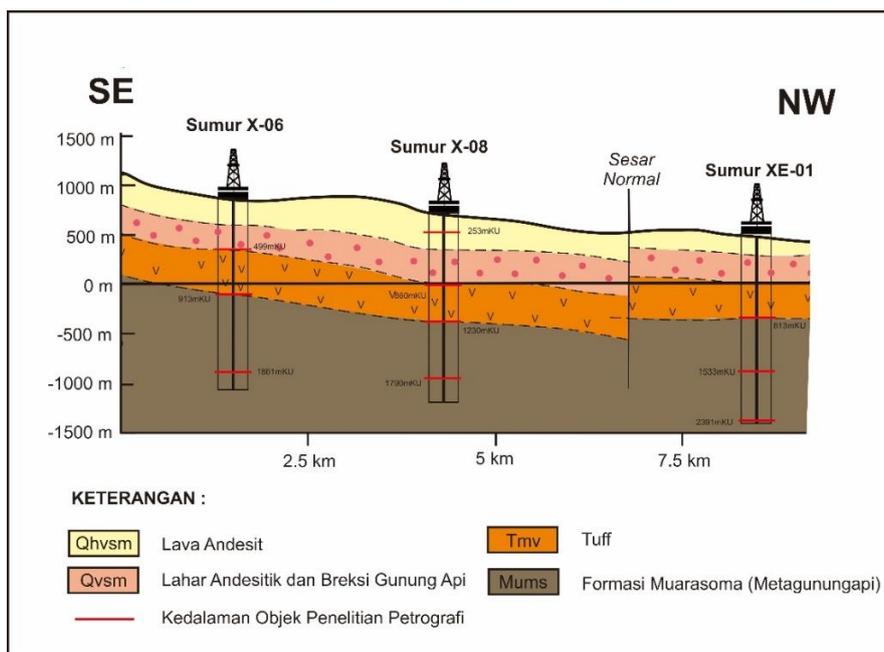
Hasil *ploting* ion kimia (geoindikator) pada diagram rasio Cl-SO₄-HCO₃ akan menggambarkan tipe fluida dan karaktersistik reservoirnya, melalui pengolahan data dengan menghitung persentase masing-masing unsur Cl, HCO₃ dan SO₄. Dari hasil *plot* geoindikator, jenis air panas bumi daerah Sorik Marapi terdiri atas tiga jenis air (Gambar 3). Berikut adalah uraian dari setiap jenis air panas bumi di daerah Sorik Marapi:

Tabel 1. Data Manifestasi

No. sample	X	Y	Elevation (masl)	Temp (°C)	pH	Flow (L/s)	Type	Water Sampling	Gas/Steam Sampling	Stable Isotope Sampling
MA-1	559314	90485	224	94.5	7	~5	Hot spring	V	-	V
MA-2	558720	90394	231	98.9	7	~10	Hot spring	V	-	V
MA-3	557433	90505	237	42.2	6	~5	Flowing artesian bore	V	-	V
MA-4	557348	90240	252	42.6	6	~5	Warm spring	V	-	V
MA-5	559247	90157	245	101	7	~0.5	Hot spring	V	-	V
MB-1	560826	82849	506	76.4	6.5	~0.5	Hot spring	V	-	V
MB-2	562629	77662	1018	58.8	5-6	~1	Warm spring	V	-	V
MB-3	561518	81566	564	51.3	7	<1	Warm spring	V	-	V
MB-4	561599	80839	627	22.9	6	50	Cold stream	V	-	V
MB-5	560277	78995	1087	19.9	5	~20	Cold stream	V	-	V
-	564388	78011	863	97.1	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	564423	78092	859	97.4	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	559942	77041	1489	94.4	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	560183	75356	2001	98.2	-	-	Fumaroles	-	V	V
-	559941	75526	2025	91.5	-	-	Fumaroles	-	-	V
-	561356	75423	1601	93.7	-	-	Fumaroles	-	V	V

Tabel 2. Hasil analisis sample air.

Sampel	HCO3 (mg/l)	B (mg/l)	Ca (mg/l)	Cl (mg/l)	Fe (mg/l)	Li (mg/l)	Mg (mg/l)	K (mg/l)	SiO2 (mg/l)	Na (mg/l)	SO4 (mg/l)
MA-1	190	27	54	573	0.11	2.6	0.59	45	201	436	92
MA-2	207	26	59	559	0.33	2.6	0.86	44	177	421	88
MA-3	154	0.3	12.4	0.86	0.08	0.03	1.9	5	80	43	10.8
MA-4	150	0.3	18.2	0.78	0.08	0.02	3.4	4	72	34	10.9
MA-5	143	27	36	621	0.08	2.9	1	45	194	436	95
MB-1	200	0.3	37	1.4	0.28	0.01	9.3	10	109	37	30
MB-2	172	2.9	218	326	0.08	0.12	70	37	224	117	349
MB-3	124	0.3	18.3	4.2	0.08	0.01	4.1	11	112	25	14.3
MB-4	89	0.3	16.3	1	0.08	0.01	6.4	3.1	83	8.3	3.7
MB-5	41	0.3	9.2	0.72	0.08	0.01	2.9	2.3	49	4.7	4.7



Gambar 3. Litologi sumur penelitian

Air Klorida

Jenis air klorida memiliki komposisi Cl yang dominan dibandingkan dengan komposisi SO_4 dan HCO_3 , terbentuk pada kondisi *mature water*, terdapat pada manifestasi mata air panas MA-1, MA-2 dan MA-5. Kehadiran klorida yang mendominasi, menunjukkan bahwa mata air panas tersebut berasal dari air panas bumi yang muncul ke permukaan pada zona lemah, bergerak jauh secara lateral sebagai *outflow*. Pada sistem panas bumi dataran tinggi jenis air klorida dapat mengidentifikasi daerah permeabel zona tinggi, fluida keluar melewati jalur sesar atau pada daerah yang mengalami tektonik aktif, pengangkatan (*uplift*) sedang hingga tinggi dan terdeformasi. Hal tersebut diperoleh melalui perhitungan indeks geomorfik kuantitatif antara lain; *stream length gradient index* (SI), *valley height width ratio* (Vf) dan *basin shape index* (Bs), sebagai parameter morfotektonik (Gentana, D., 2018).

Air Sulfat – Klorida

Jenis air sulfat-klorida memiliki komposisi SO_4 dan Cl yang sama-sama dominan dibandingkan dengan komposisi HCO_3 yang minim, terdapat pada manifestasi mata air panas MB-2. Air panas MB-2 ini diinterpretasikan terbentuk dari fluida panas bumi yang saat bergerak ke permukaan mengalami pencampuran (*mixing*) dengan air klorida yang juga bercampur dengan batuan yang dilewatinya mengandung sulfur dan ion sulfat (H_2S) diperlihatkan oleh komposisi SO_4 yang signifikan. Air panas MB-2 muncul ke permukaan sebagai *upflow*, pada kondisi *steam heated water* dan *volcanic water*. Hal tersebut menunjukkan telah terbentuk sistem kesetimbangan fluida panas bumi di kedalaman yang dipengaruhi oleh adanya proses pencampuran (*mixing*) dan pelarutan (*diluted*) serta interaksi antara fluida dengan batuan yang dilaluinya (*water rock interaction*) selama perjalanan fluida dari reservoir menuju ke permukaan.

Air Bikarbonat

Jenis air bikarbonat memiliki senyawa HCO_3 yang dominan terdapat pada manifestasi mata air panas MA-3, MA-4, MB-1, MB-3, MB-4, dan MB-5. Kehadiran unsur HCO_3 dominan yang dapat berasal dari kondensasi gas CO_2 dengan air tanah atau air permukaan (*meteoric water*) dan jenis air ini termasuk ke dalam daerah *peripheral water* yang muncul ke permukaan sebagai *outflow*.

Geoindikator Cl-Li-B

Geoindikator Cl-Li-B diaplikasikan pada penelitian untuk mengetahui kesamaan asal air panas bumi dan memperkirakan batuan pada *reservoir* oleh adanya proses pengenceran berdasarkan perbandingan presentase konsentrasi Cl/100, Li dan B/4.

Hasil *ploting* berdasarkan data air di atas, pada diagram segitiga Cl/100, Li dan -B/4 (Gambar 4), memperlihatkan sampel air panas MA-3, MA-4, MB-1, MB-3, MB-4, dan MB-5 berada pada posisi mendekati ke unsur Boron (B), hal ini menandakan bahwa selama perjalanannya air panas tersebut dari sumber panas ke permukaan mengalami banyak pengenceran oleh batuan yang dilewatinya. Proses pencucian (*Leaching Rock*) oleh batuan samping berupa batuan beku yang bersifat basalt menyebabkan tingginya kandungan unsur B, namun dikarenakan terdapat batuan sedimen di daerah penelitian, tidak menutup kemungkinan batuan sedimen mengalami proses pencucian dari fluida ini. Fluida berada pada kondisi *absorption of high B/Cl steam*.

Hasil *ploting* mata air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 berada pada posisi dengan konsentrasi Cl dan B relatif seimbang dan masih menunjukkan bahwa sedikit lebih ke posisi B, dapat diinterpretasikan ketiga mata air panas tersebut masih dipengaruhi oleh reaksi dengan batuan samping (basalt atau sedimen) pada kondisi *Li less or Cl absorption* dan mengalami proses penyerapan gas magmatik dengan rasio

B/Cl relatif seimbang dibandingkan dengan mata air panas lainnya. Mata air panas MB-2 adalah satu-satunya manifestasi air panas pada posisi mendekat ke arah puncak Cl dibandingkan dengan seluruh mata air panas lainnya. Terdapatnya nilai konsentrasi Cl yang lebih besar pada mata air panas MB-2 ini dimungkinkan bahwa mata air panas yang naik ke permukaan adalah fluida yang berasal dari sumber panas dan mengalami pendinginan yang relatif cepat oleh batuan sekitar yang dilewatinya, namun dikarenakan unsur Cl mempunyai sifat yang susah bereaksi, mudah berpindah dan bersifat stabil, sehingga masih mendominasi pada saat air panas sampai di permukaan sebagai *outflow* pada kondisi *absorption of low B/Cl steam*

Tabel 3. Rasio unsur Cl/B untuk identifikasi reservoir panas bumi

Sample	Cl (mg/l)	B (mg/l)	Cl/B	Reservoir
MA-1	573	27	21.2	B
MA-2	559	26	21.5	B
MA-3	0.86	0.3	2.9	B
MA-4	0.78	0.3	2.6	B
MA-5	621	27	23.0	B
MB-1	1.4	0.3	4.7	B
MB-2	326	2.9	112.4	A?
MB-3	4.2	0.3	14.0	B
MB-4	1	0.3	3.3	B
MB-5	0.72	0.3	2.4	B

Hasil dari *Cross Plot* Rasio Cl/B dan Tabel rasio Cl/B (Gambar 5 dan Tabel 3) dengan ion klorida (Cl) dan boron (B) yang merupakan salah satu ion yang bersifat *mobile* dan dapat digunakan sebagai *tracer* atau jejak untuk menentukan *origin* fluida panas bumi (Giggenbach, 1991), mata air panas MA-1, MA-2, MA-5 dan MB-3 (rasio Cl/B: 14-23 mg/l) berada pada garis *trend* yang sama dengan kelompok mata air panas MA-3, MA-4 MB-1, MB-4, dan MB-5 (rasio Cl/B : 2.4- 4.6 mg/l).

Meskipun ada perbedaan rasio dari dua kumpulan tersebut, hal ini dapat diinterpretasikan bahwa seluruh mata air panas di daerah penelitian merupakan bagian dari sistem panas bumi yang sama, namun memiliki perbedaan "usia". Sistem

panas bumi yang dianggap "lebih tua" umumnya memiliki rasio Cl/B yang lebih rendah (Giggenbach, 1991). Sedangkan pada mata air panas MB-2 tidak menunjukkan *trend* yang sama dan memiliki rasio Cl/B yang sangat tinggi sehingga diinterpretasikan merupakan sistem panas bumi tersendiri, maka diindikasikan terdapat 2 (dua) sistem panas bumi di daerah penelitian.

Geoindikator Na-K-Mg

Dari data hasil analisis kimia air dilakukan perhitungan nilai Na/1000, K/100, dan \sqrt{Mg} menghasilkan persentase (kesetimbangan fluida) dari ketiga unsur tersebut yang di plot pada diagram segitiga Na-K-Mg.

Hasil *ploting* ion kimia Na-K-Mg, dari 10 (sepuluh) sampel mata air panas di daerah penelitian (Gambar 6), memperlihatkan dari 7 (tujuh) lokasi mata air panas (MA-3, MA-4, MB-1, MB-2, MB-3, MB-4, dan MB-5) memiliki nilai Mg relatif jauh lebih tinggi dan berada pada puncak nilai Mg bila dibandingkan dengan kandungan K dan Na dan kondisi fluida "*Immature Waters*", hal tersebut dapat diinterpretasikan bahwa fluida di titik lokasi tersebut telah mengalami proses pencampuran dengan air permukaan (air tanah). Hasil *ploting* dari 3 (tiga) lokasi lainnya (MA-1, MA-2 dan MA-5) memperlihatkan adanya peningkatan kandungan Na dan K pada kondisi fluida mencapai kesetimbangan, masuk ke dalam "*Partial Equilibrium*" pada temperatur *reservoir* : $\pm 237^{\circ}C$ (MA-1), $\pm 239^{\circ}C$ (MA-2) dan $\pm 238^{\circ}C$ (MA-5).

Tabel 4 menunjukkan, bahwa air panas di daerah penelitian mempunyai nilai kandungan isotop deuterium berkisar -55,9 s.d. -63,4 ($^{\circ}/_{00}$) dan nilai oksigen 18 antara -7,86 s.d. -9,39 ($^{\circ}/_{00}$). Nilai rasio dari conto air tersebut *diplot* pada grafik isotop stabil deuterium dan Oksigen 18 (Craig, 1961 dalam Nicholson, 1993) seperti pada Gambar 7 yang memperlihatkan adanya pengkayaan ^{18}O lebih jelas pada kelompok air panas MA-1, MA-2, dan MA-5, yang mengindikasikan telah terjadinya proses *water-rock interaction* pada pembentukan air panas tersebut. Sedangkan air panas

MB-2 (paling representatif dari kelompok air panas MB) yang muncul pada bagian selatan daerah penyelidikan, pada elevasi lebih tinggi, bertemperatur di permukaan rendah (58,8°C), pH cenderung asam (5-6), bertipe air sulfat dengan konsentrasi klorida cukup signifikan, tidak ada pengkayaan isotop ¹⁸O (air panas terletak menempel pada garis MWL), sehingga diinterpretasikan bahwa ada indikasi pembentukan air panas MB-2 yang berasosiasi dengan proses *leaching country-rock*, dan merupakan zona *upflow*.

Geotermometer

Perhitungan geotermometer dilakukan dari sampel-sampel air yang telah diambil.

Berdasarkan perhitungan geotermometer metode Silika dan Na/K yang diajukan oleh Fournier (1979) dan Giggenbach (1998), temperatur reservoir di manifestasi bagian utara (kelompok MA) ialah sekitar 118°-246°C dan bagian selatan (kelompok MB) sekitar 101°-405°C (Tabel 5).

Namun dikarenakan hanya fluida manifestasi yang berasal dari MA-1, MA-2, MA-5 dan MB-2 yang memiliki rasio HCO₃-Cl-SO₄, maka hasil perhitungan geotermometer dari 4 mata air panas tersebut lebih dapat dipercaya. Hasil perhitungan metode Na-K-Mg menurut Giggenbach (1998) juga menunjukkan temperatur yang hampir sama (Gambar 8).

Tabel 4. Data Isotop d¹⁸O dan dD di daerah penelitian

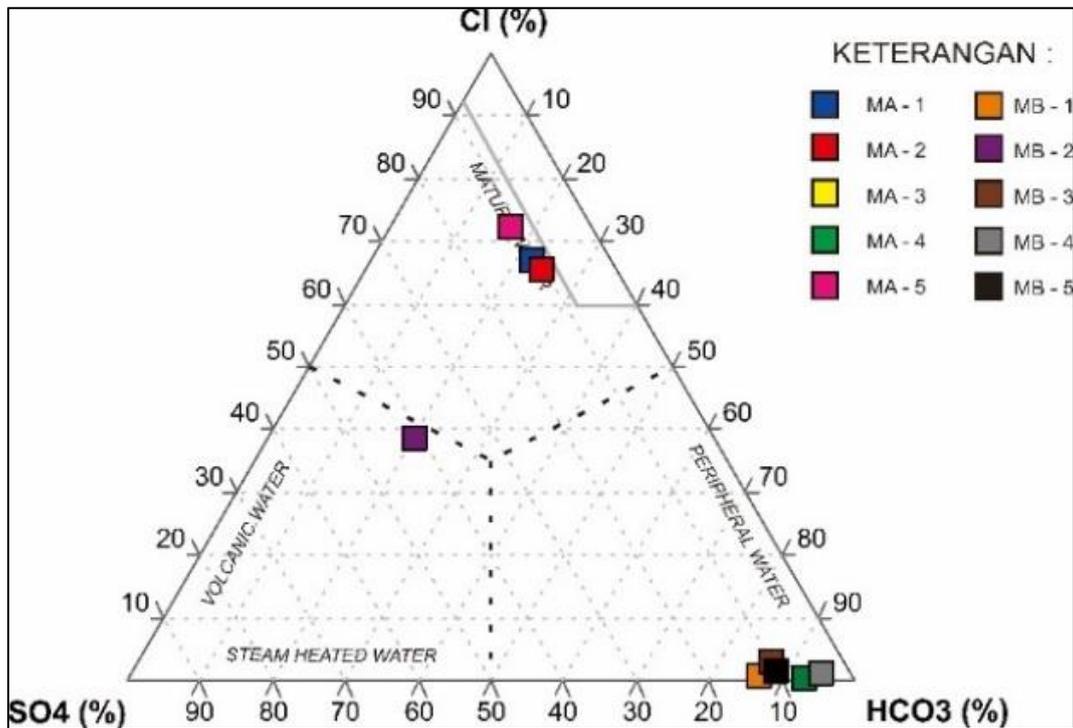
Sampel	Temp (°C)	Cl (ppm)	d ¹⁸ O (‰)	dD (‰)
MA-1	95	573	-7.86	-55.9
MA-2	96	559	-8.27	-59
MA-3	42	0.9	-8.76	-58
MA-4	43	0.8	-8.72	-56.1
MA-5	101	621	-7.92	-57.4
MB-1	76	1.4	-8.5	-57.1
MB-2	59	326	-9.14	-63
MB-3	51	4.2	-9.39	-63.4
MB-4	23	1	-8.87	-56.6
MB-5	20	0.7	-8.9	-58.2

Tabel 5. Data Hasil Perhitungan Geotermometer

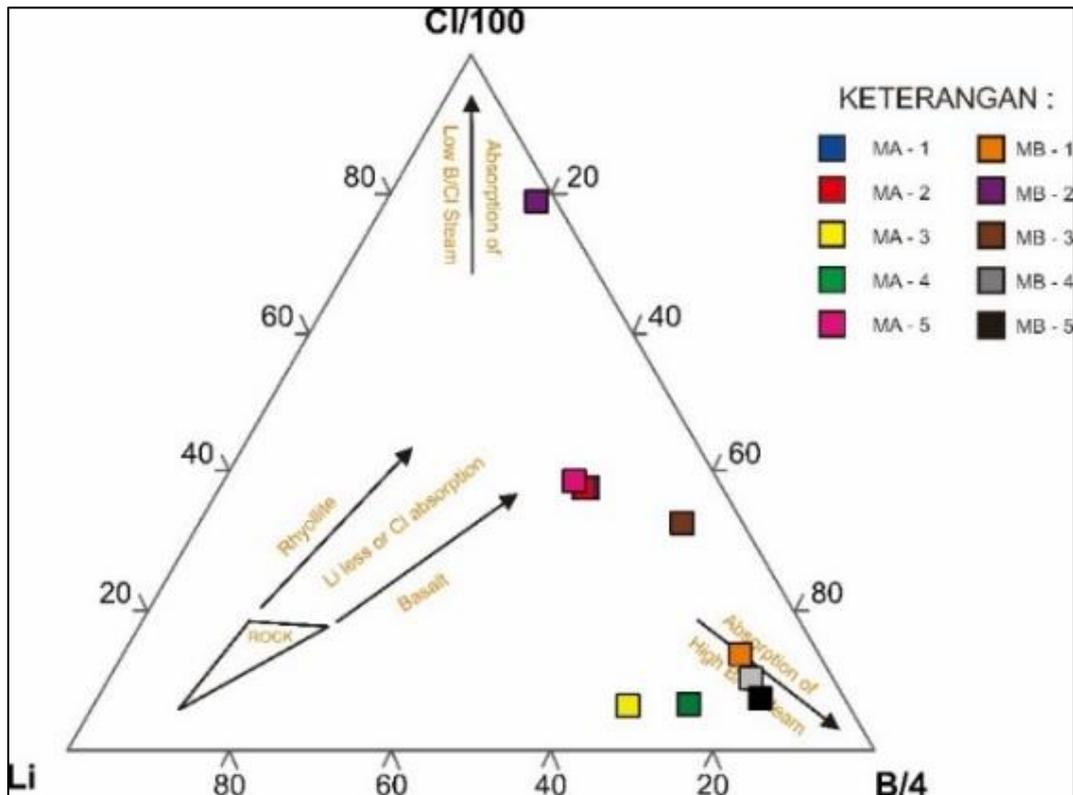
Sampel		MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MB-1	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Metode Silika (T°C)	Quartz No Steam Loss	180	172	125	120	178	142	188	144	127	101
	Quartz Max Steam Loss	168	161	122	118	166	137	175	138	124	102
Sampel		MA-1	MA-2	MA-3	MA-4	MA-5	MB-1	MB-2	MB-3	MB-4	MB-5
Metode Na/K (T°C)	(Fournier,1979)	220	221	230	231	220	320	341	388	364	405
	(Giggenbach,1988)	235	236	245	246	235	326	345	387	365	401

Tabel 6. Log Mineral Alterasi Sumur X-06,X-08, dan XE-1

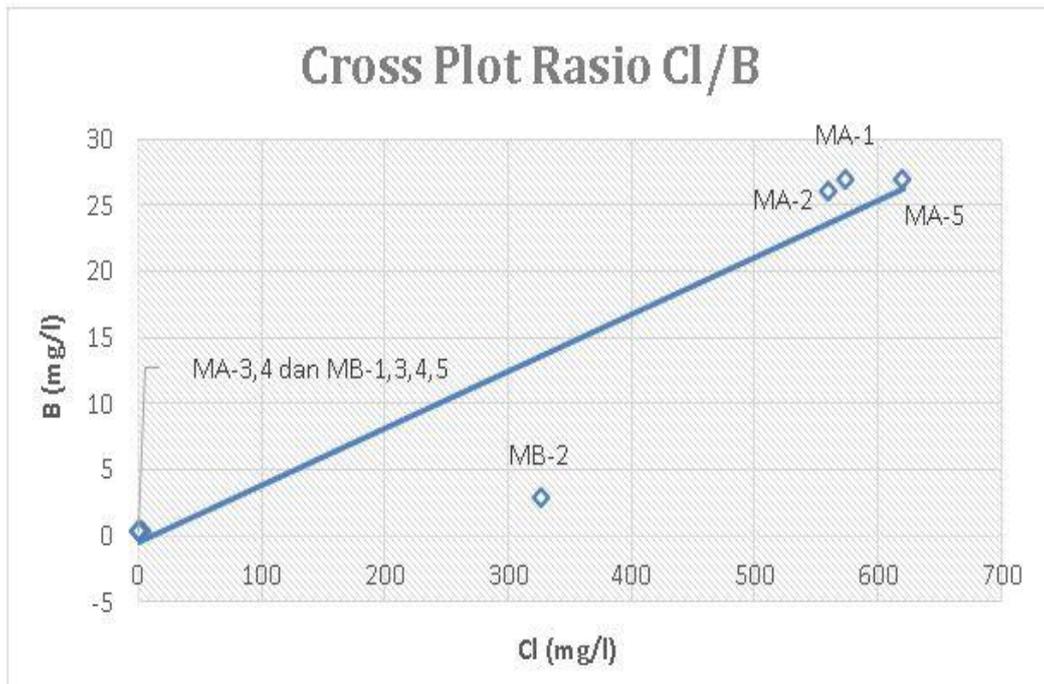
SUMUR	Kedalaman (m/VD)	HYDROTHERMAL ALTERATION											Intensitas Alterasi (Browne, 1991)	Zona Alterasi Mineral	Indikasi Porositas	
		Kelimpahan Mineral Alterasi: 1 - Jarang 2 - Beberapa 3 - Cukup 4 - Melimpah														
		Hm/Lim	Cal	sec Qtz	Pyr	Cly	Chl	Epi	Srst	Mt	Anh					
X-06	499-502	4	1	1	1		1							45	Zona Hematite/Limonite	Rongga dan Rekahan
	910-913	1	3	2	2	1	3	1	1	1	1			50	Zona Calcite-Chlorite	Rekahan dan Urat
	1861		4	3	2	1	1	2		1				75	Zona Calcite-Sec Quartz	Rekahan dan Urat
X-08	253	2	1											25	Zona Hematite/Limonite	Rongga
	860	2	2	1	1	1				1				45	Zona Hematite-Calcite	Rongga dan Rekahan
	1230	2	1	1	1	1				1				45	Zona Hematite/Limonite	Rongga dan Rekahan
	1790	1	4	2	1		1	2		1				75	Zona Calcite-Sec Quartz-Epidote	Rekahan dan Urat
XE-01	813-816	1		1		1				1				35	Zona Hematite/Limonite	Rekahan dan Urat
	1533-1536	1	3	2	2	1	3	1	1	1	1			75	Zona Calcite-Chlorite	Rekahan dan Urat
	2391-2394	1	1	3	2	1	1	1		1				80	Zona Sec Quartz-Pyrite	Rekahan dan Urat



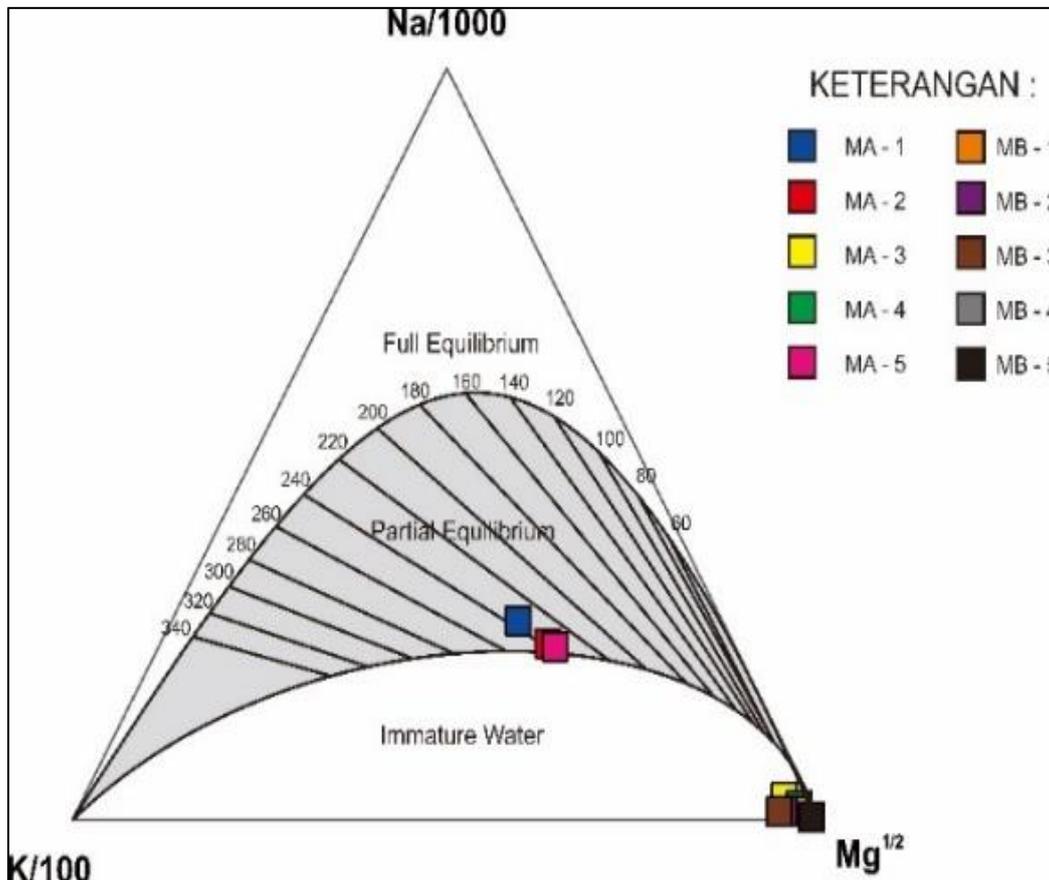
Gambar 4. Geoindikator Cl-SO₄-HCO₃



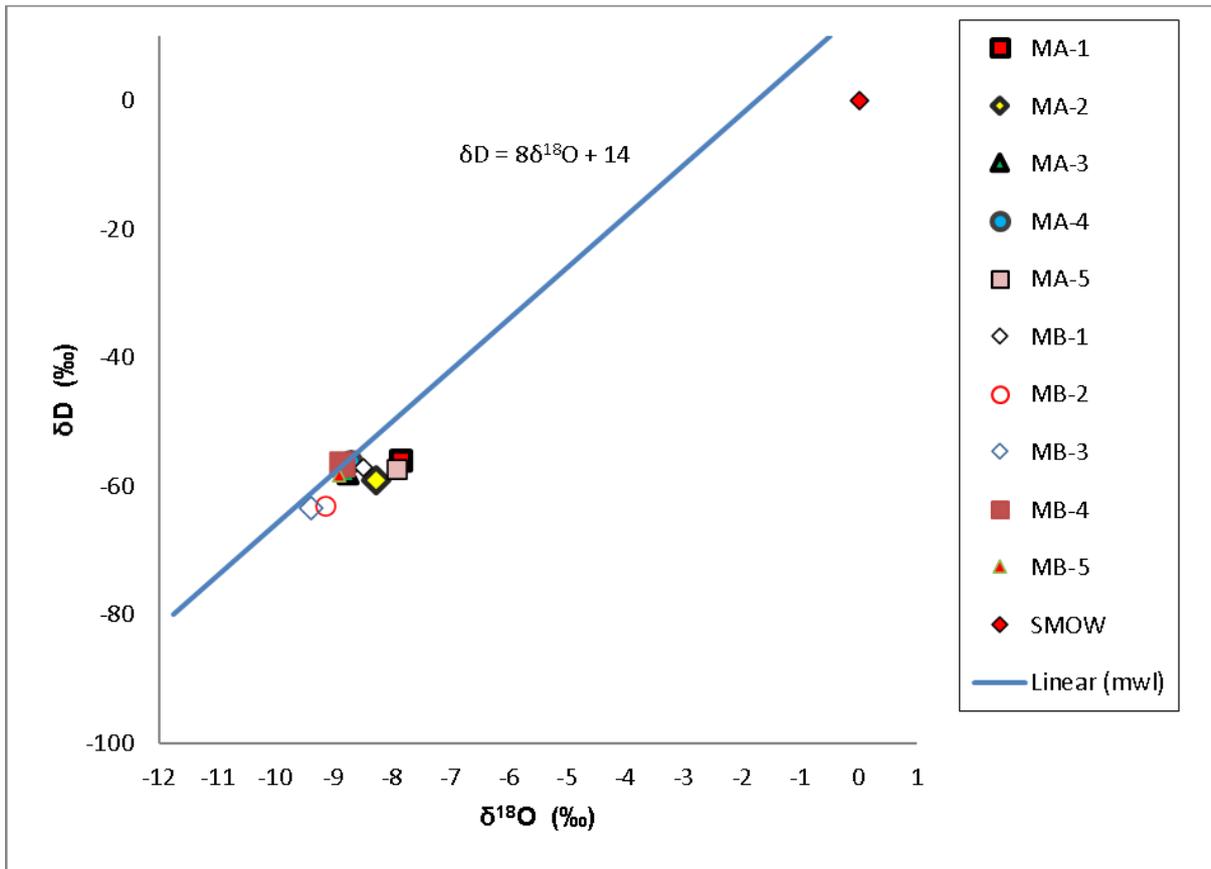
Gambar 5. Geoindikator Cl-Li-B



Gambar 6. Cross plot rasio Cl/B, menunjukan semua manifestasi memiliki kesamaan asal fluida kecuali MB-2



Gambar 7. Geoindikator Na-K-Mg



Gambar 8. Grafik Isotop ¹⁸O dan D, air panas daerah panas bumi Sorik Marapi

Model Aliran Fluida

Pemodelan aliran fluida panas bumi daerah Sorik Marapi ini didasarkan pada data geologi, geoindikator fluida dan litologi sumur. Dari hasil analisis, manifestasi panas bumi kelompok MA (MA-1, MA-2, dan MA-5), bertemperatur paling tinggi (101°C), pH netral (7), muncul pada bagian utara daerah penyelidikan, pada elevasi lebih rendah, daripada kelompok MB, bertipe air klorida, dan dari perhitungan geotermometer Silika diperoleh 180°C, serta NaK 235°C. Merupakan indikasi yang paling representatif sebagai zona *Outflow*, dan kelompok MB sebagai *Upflow*, seperti yang digambarkan pada model aliran fluida (Gambar 9).

Mata air panas yang terdapat di daerah Sorik Marapi dapat dikelompokkan menjadi dua yaitu kelompok MB dan kelompok MA. Kelompok MB menempati elevasi lebih tinggi di sekitar keberadaan manifestasi fumarol. Kelompok mata air panas MA

yang mempunyai elevasi lebih rendah yaitu di daerah sebelah utara dengan jarak sekitar 6 km dari kelompok mata air panas MB dan suhu air panas mencapai 100°C (*boiling spring*). Air panas kelompok MA mempunyai pH netral dan sebagian mempunyai kandungan kimia yang mencerminkan air yang berasal dari reservoir panas bumi (*deep water*) yang dapat disajikan dalam Tabel 2.

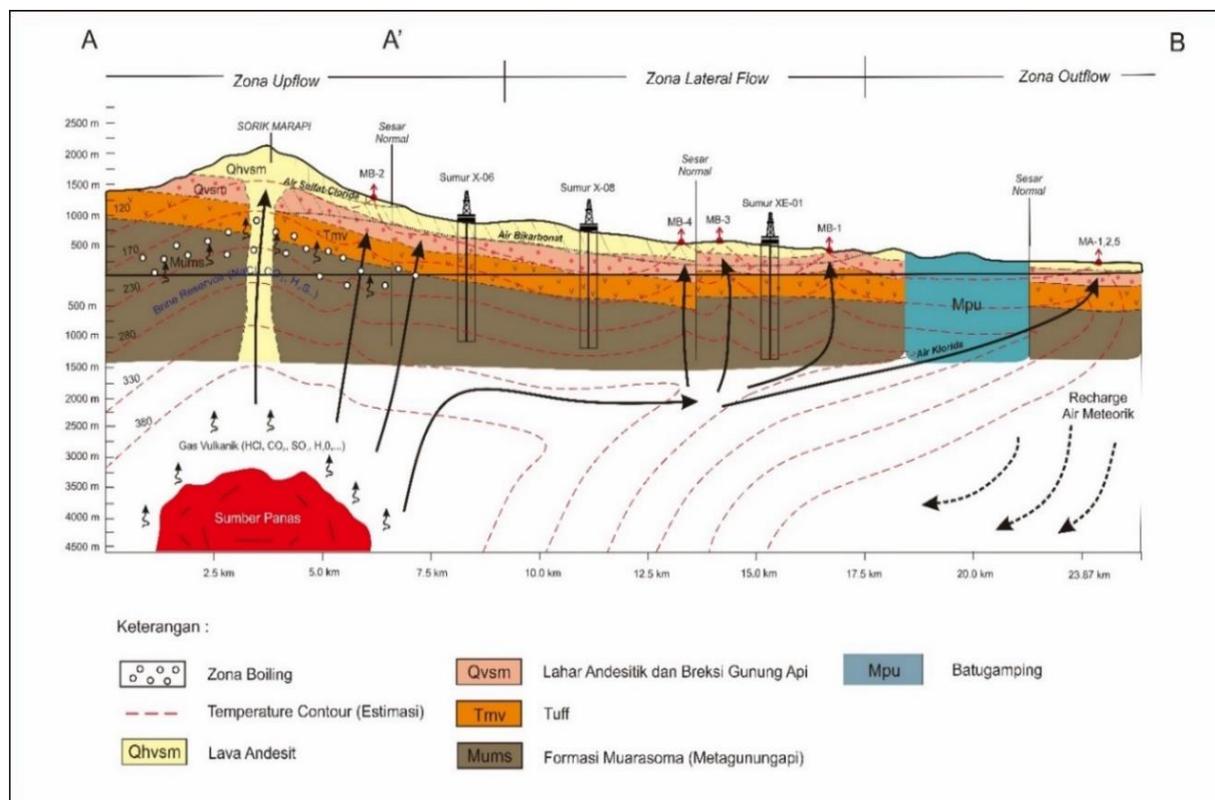
Dari hasil pengeplotan diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 4) terlihat beberapa mata air panas kelompok MA (MA-1,MA-2 dan MA-5) merupakan air klorida. Satu mata air panas dari kelompok MB yaitu MB-2 merupakan air klorida-sulfat dengan pH relatif lebih asam dari kelompok air panas MA. Selebihnya air panas yang lain lebih merupakan air yang didominasi air permukaan. Karakteristik air panas dari ke tiga sumber ini (MA-1,MA-2 dan MA-5) dianggap yang paling representatif untuk dipakai dalam pendugaan temperatur reservoir. Klorida adalah unsur yang pada

suhu rendah di bawah 300°C akan berada pada fasa cair. Air dari reservoir bersuhu tinggi akan naik ke permukaan kemudian mengalir secara lateral mengikuti lereng dan muncul ke permukaan melalui zona lemah (struktur geologi) di daerah elevasi lebih rendah menjauhi zona *upflow*. Hal ini umum terjadi pada daerah panas bumi dengan morfologi lereng terjal seperti daerah Sorik Marapi, sehingga air ini muncul di daerah *outflow*. Sedangkan air panas dari MB-2 mempunyai kandungan Mg yang cukup tinggi sehingga tidak representatif untuk penghitungan geotermometer Na-K. Dari air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 didapatkan perkiraan temperatur reservoir sebesar 220°C-235°C (Tabel 5). Perkiraan temperatur ini dianggap lebih mungkin karena tidak terpengaruh oleh adanya pengenceran air oleh air meteorik.

Dari pengeplotan ke diagram **Na/1000, K/100, dan \sqrt{Mg} (Gambar 6) juga menunjukkan bahwa air panas MA-1, MA-2 dan MA-5 berada pada zona *partial***

equilibrium yang mencerminkan adanya air reservoir yang naik ke permukaan dan terdapat pencampuran dari air meteorik. Dari diagram ini juga mendukung penghitungan geotermometer Na-K yang didapatkan perkiraan suhu reservoir berkisar 220°C-235°C. Dari grafik isotop oksigen dan hidrogen (^{18}O vs 2H) pada Gambar 7 terlihat adanya *shifting* lebih jelas pada kelompok air panas MA-1, MA-2, dan MA-5 yang mengindikasikan telah terjadinya proses *water-rock interaction* dari air reservoir dan batuan yang dilaluinya sehingga adanya pengkayaan ^{18}O dalam air panas.

Dari pengamatan petrografis terhadap mineral ubahan yang terdapat dalam serbuk bor sumur X-06, X-08 dan XE-01 didapatkan kehadiran mineral indikator temperatur tinggi antara lain kehadiran mineral epidot. Kelimpahan mineral ubahan lain juga mengindikasikan adanya zona temperatur tinggi di kedalaman yang mengindikasikan adanya reservoir temperatur tinggi di Daerah Sorik Marapi.



Gambar 9. Model Aliran Fluida Daerah Penelitian.

KESIMPULAN

Berdasarkan geotermometer air panas dari kelompok mata air panas MA di dapatkan temperatur reservoir Sorik Marapi mencapai 220°C - 235°C yang termasuk dalam kategori sistem panas bumi bertemperatur tinggi. Kelompok mata air panas MA merupakan air panas klorida dengan pH neutral muncul di zona *outflow* sistem panas bumi Sorik Marapi. Sedangkan air panas kelompok MB yang direpresentasikan oleh MB-2 dengan tipe sulfat-klorida dengan PH relatif lebih asam merupakan air panas yang muncul di zona *upflow* yang dikonfirmasi dengan keterdapatan jenis mineral ubahan indikator temperatur tinggi yang diperoleh dari serbuk bor sumur X-06, X-08, dan XE-01. Fluida panas dalam sistem panas bumi Sorik Marapi dari reservoir temperatur tinggi di bawah mata air panas MB-2 mengalir ke atas dan secara lateral mengalir ke arah utara berinteraksi dengan batuan yang dilalui dan muncul sebagai kelompok manifestasi MA di zona *outflow*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Sorik Marapi yang telah memberikan kesempatan untuk melakukan penelitian di lapangan Sorik Marapi.

DAFTAR PUSTAKA

- Barnes, L. H., 1997, *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, reprinted 3rd Edition, USA
- Bateman, A.M, and Jensen, M.L., 1981. *Economic Mineral Deposits*. John Wiley and Sons, Australia.
- Browne P.R.L dan Brown.K., 1996, *Geothermal Technology: Earth Science Notes, Material for Teaching the Teachers Course III*, Geothermal Institute, Institute Univ. of Auckland.
- Corbett, G.J., dan Leach, T.M., 1996, *Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration, and Mineralization*, Manual Kursus Singkat Eksplorasi di Baguio, Philippines.
- Darman, H. dan Sidi, F.H. 2000. *An Outline of The Geology of Indonesia*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia.
- D.T. Aldiss. 1983. *Peta Geologi Regional Lembar Lubuk Sikaping, Sumatra Utara*. Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jendral Geologi dan Sumberdaya Mineral, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Dickson, M.H. and Fanelli, M. .2004. *What Is Geothermal Energy?* International Geothermal Association, Bochum.
- Giggenbach, W.F., 1988. *Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators*. *Geochim Cosmochim. Acta*, 52: pp. 2749-2765.
- Giggenbach, W.F., 1989: *The chemical and isotopic position of Ohaaki field within the Taupo Volcanic Zone*. Proc. Eleventh N.Z. Geothermal Workshop, Aukland: pp. 81-88.
- Giggenbach, W. F., 1991, *Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Application of Geochemistry In Geothermal Reservoir Development*.
- Guilbert, J. M., Park, C. F., 1986, *The Geology of Ore Deposits*, WH.Freeman and Company, New York.
- Henley RW, Truesdell AH, Barton Jr. PB, Whitney JA. 1984. *Fluid-Mineral Equilibria in Hydrothermal Systems*.
- Hochstein, M.P. dan Browne, P.R.L. 2000. *Surface Manifestation of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*, In Encyclopedia of Volcanoes, H. Sigurdsson, B.F., Houghton, S.R., McNutt, H., Rymer dan J. Stix (eds.), Academic Press.
- Juliarka R. B.& Iqbal M, 2020. *Model Gaya Berat 2D untuk mengungkap Struktur Geologi Bawah Permukaan Pada Daerah Panas Bumi Natar*. Buletin Sumber Daya Geologi, Vol. 15 No.1 pp 39-49.
- Morrison, K. 1997. *Important Hydrothermal Minerals and their Significance*. Geothermal and mineral Services Division Kingston Morrison Limited, Seventh Edition, New Zealand.

- Oppenheimer, C. (1995). K. N. Nicholson, 1993. *Geothermal Fluids. Chemistry and Exploration Techniques*. xv 263 pp. Berlin, Geological Magazine, 132(1), 125-126.
- Powell, T. 2000. *A Review of Exploration Gas Geothermometry*. Proceedings, TwentyFifth Workshop on Geothermal Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Powell, T. and Cumming, W. 2010. *Spreadsheets For Geothermal Water and Gas Geochemistry*. Proceedings, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California.
- Rahadinata, T. Takodama I, Zarkasyi A, 2019. *Penerapan Koreksi Topografi Pada Data Magnetotelurik dan Analisis Data Gaya Berat Dalam Interpretasi Daerah Panas Bumi Pantar, Kabupaten Alor, Provinsi Nusa Tenggara Timur*. Buletin Sumber Daya Geologi Vol. 14 No.3, pp 156-168.
- Reyes, G.A. 2000. *Petrology and Mineral Alteration in Hydrothermal System: From Diagenesis to Volcanic Catastrophes*. Geothermal Training Programme, United Nations University, Reykjavik, Iceland.
- Simmon, S.F. 1995. *Geothermal Technology: Geochemistry*. Pertamina Course, Cirebon.
- Sumintadireja, P., 2005, *Vulkanologi dan Geothermal*, Penerbit ITB, 153hal.
- Thompson, A.J.B, Thompson J.F.H 1996. *Atlas of Alteration: A field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals*. Geological Association of Canada Mineral Deposit Division, Canada.

Diterima	: 15 September 2020
Direvisi	: 21 September 2020
Disetujui	: 30 November 2020

UCAPAN TERIMA KASIH KEPADA MITRA BESTARI

Dengan hormat.

Sehubungan dengan telah terbitnya Buletin Sumber Daya Geologi volume 15 nomor 3 tahun 2020, segenap Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih atas bantuan Bapak dan Ibu yang telah bersedia menjadi mitra bestari serta telah menyampaikan sumbangan pemikiran dalam melakukan pembenahan dan penyempurnaan makalah yang masuk pada Dewan Redaksi.

Terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kami sampaikan kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Binarko Santoso, M.Sc, Ahli Geologi Batubara.
2. Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adi, DESS, Ahli Pertambangan dan Geostatistik.
3. Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D, Ahli Mineral Eksplorasi (Geologi Ekonomi) dari Universitas Padjadjaran.
4. Prof. Dr. Euis Tintin Yuningsih, S.T, M.Sc, Ahli Petrologi dari Universitas Padjadjaran.
5. Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc, Ahli Geologi Teknik dan Kebencanaan dari Universitas Padjadjaran.
6. Dr. Asep Permana, S.T, M.T, Ahli Geologi Batubara dan Energi Fosil dari Pusat Survei Geologi.
7. Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T, Ahli Geologi dan Geokimia dari Politeknik Energi dan Pertambangan, KESDM.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 15 Nomor 3 Tahun 2020

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Ade Triyunita
PT. Agincourt Resources Martabe
Email:
Ade.Triyunita@agincourtresources.com

Adithya Ramadhani Hasibuan
Universitas Padjadjaran
Email: adit.ar7@gmail.com

Agus Didit Haryanto
Universitas Padjadjaran
Email:
agus.didit.haryanto@mail.unpad.ac.id

Arsha Maulana
Universitas Gadjah Mada
Email: arshamaulana@gmail.com

Dewi Gentana
Universitas Padjadjaran
Email: dewigentana06@gmail.com

Dicky Muslim
Universitas Padjadjaran
Email: d.muslim@unpad.ac.id

Dzil Mulki Heditama
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: dzil.mulki@gmail.com

Euis Tintin Yuningsih
Universitas Padjadjaran
Email: etintiny@yahoo.com

Ferian Anggara
Universitas Gadjah Mada
Email: ferian@ugm.ac.id

Hisyam Azhar Azizi
Universitas Padjadjaran
Email: hisyam16001@mail.unpad.ac.id

Johanes Hutabarat
Universitas Padjadjaran
Email: j.hutabarat@unpad.ac.id

Kurnia Arfiansyah Fachrudin
Universitas Padjadjaran
Email: k.arfiansyah@unpad.ac.id

M. Dwiki Satrio
PT Bukit Asam Tbk
Email: muhdwikisatrio@gmail.com

Maharani Sarastika Bodjawati
Universitas Gadjah Mada
Email:
maharani.sarastika.b@mail.ugm.ac.id

Nada Salsabila Deva
Universitas Padjadjaran
Email: nada16005@mail.unpad.ac.id

Nurdrajat
Universitas Padjadjaran
Email: nurdrajat@gmail.com

Nur Afrianti Saala
PT. Agincourt Resources Martabe
Email:
Nurafrianti.Saala@agincourtresources.com

Reinaldi Juniarto
UPN Veteran
Email: Reinaldijuniarto15@gmail.com

Reza Mohammad Ganjar Gani
Universitas Padjadjaran
Email: rezamohgg@gmail.com

Ryan Hidayat
KS Orka Renewables Pte Ltd.
Email: ryan.hidayat@ksorka.com

Yudi Aziz Muttaqin
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: yudi.muttaqin@esdm.go.id

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 15 Nomor 3 Tahun 2020

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

- Alterasi 140, 143, 144, 146-149, 152, 153, 156-159, 161, 162-165, 168, 202, 203, 205-207
- Argilik lanjut 156, 162, 165, 168
- Batubara 170-181, 184, 185, 187, 189-191, 194-198, 202
- Batubara Banko Barat 170, 171
- Bijih besi 140-144, 146-149, 152, 153
- Chargeabilitas 140, 142, 144-149, 151-153
- Crustiform-colloform banded 156
- Estimasi sumber daya batubara 170-172, 179
- Geokimia 203, 207
- Grafit 184, 185, 191, 199
- Intrusi 172, 184-188, 190, 192, 196, 198-200
- Karakteristik Batubara 184, 186, 188, 190, 192, 194, 196, 198, 200
- Mineralisasi 140, 142-144, 146-149, 151-153, 156-158, 167, 168
- Model geologi 170, 181
- Outflow 202, 204, 209, 210, 216, 217
- Panas bumi 144, 202-205, 207, 209, 210, 215-217
- Polarisasi terinduksi 140, 142, 144, 146
- Resistivitas 140, 142, 144-149, 151-153
- Sorik Marapi 202, 203, 205, 207, 215-217
- Tambang Air Laya 184-186, 188, 190, 192, 194, 196, 198-200
- Tekstur kuarsa 156
- Upflow 202, 204, 209, 211, 217
- Zona alterasi 140, 146-149, 153, 156, 159, 161, 162, 165, 168, 202, 205-207

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : November 2020

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Maharani Sarastika Bodjawati¹, Dzil Mulki Heditama², dan Yudi Aziz Muttaqin²

(¹Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, dan ²Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

IDENTIFIKASI ZONA MINERALISASI BIJIH BESI MENGGUNAKAN METODE POLARISASI TERINDUKSI DI DAERAH ULUSULITI DAN TANJUNG LIMA KAPAS, SOLOK SELATAN, SUMATRA BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2020 Vol. 15 No. 3 Hal. 140 - 154

Daerah Ulusuliti dan Tanjung Lima Kapas, Kecamatan Koto Parik Gadang Diatesh, Kabupaten Solok Selatan, Provinsi Sumatera Barat memiliki potensi bijih besi berupa zona mineralisasi yang terbentuk dari adanya batugamping yang diterobos batuan granodiorit. Pengukuran menggunakan metode polarisasi terinduksi dengan konfigurasi dipole-dipole dengan spasi antar elektroda 50 m. Data polarisasi terinduksi yang diukur sebanyak 11 lintasan dengan panjang masing-masing lintasan 1.200 m dan jarak antar lintasan 100 m hingga 300 m. Pemodelan 2D dilakukan untuk menghasilkan penampang resistivitas dan chargeabilitas dari setiap lintasan. Pemodelan 3D dilakukan untuk melihat persebaran zona mineralisasi bijih besi di daerah penelitian baik vertikal maupun horizontal. Pada model resistivitas dan chargeabilitas 2-dimensi, zona mineralisasi bijih besi diperkirakan memiliki nilai resistivitas >500 Ω m dan chargeabilitas >150 milisekon. Nilai-nilai tersebut diasosiasikan sebagai mineral-mineral bijih besi hasil dari alterasi hidrotermal yang terbentuk akibat adanya interaksi antara fluida magmatik dan meteorik yang berasal dari batuan granodiorit, kemudian fluida tersebut berinteraksi dengan batugamping. Hasil dari pemodelan 3-dimensi memperlihatkan kemenerusan zona mineralisasi relatif berarah baratdaya-timurlaut dengan volume sebesar 864.000 m³.

Kata kunci: bijih besi, chargeabilitas, mineralisasi, polarisasi terinduksi, resistivitas, zona alterasi

Nada Salsabila Deva¹, Euis Tintin Yuningsih¹, Kurnia Arfiansyah Fachrudin¹, Nur Afrianti Saala², dan Ade Triyunita²

(¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, dan ²PT. Agincourt Resources Martabe)

KARAKTERISTIK ALTERASI DAN TEKSTUR URAT KUARSA PADA PIT BARANI, CEBAKAN EMAS MARTABE, KABUPATEN TAPANULI SELATAN, PROVINSI SUMATRA UTARA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2020 Vol. 15 No. 3 Hal. 156 - 168

Pit Barani merupakan bagian dari wilayah kontrak karya PT Agincourt Resources yang terletak di Kelurahan Aek Pining, Kecamatan Batangtoru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Sumatera Utara. Pit Barani berupa tambang terbuka, dengan tipe cebakan epitermal berupa urat-urat yang menjadi tempat konsentrasi lebih banyak unsur logam. Penelitian bertujuan untuk mengetahui karakteristik alterasi dan variasi tekstur urat kuarsa yang banyak terdapat pada

daerah Pit Barani dan mengidentifikasi tekstur urat kuarsa pembawa mineralisasi yang ekonomis. Pengambilan contoh batuan dilakukan pada saat pemetaan pit dan identifikasi mineral alterasi menggunakan analisis laboratorium berupa analytical spectral devices (ASD), serta analisis geokimia untuk mengetahui kadar unsur Au, Ag, dan Cu. Hasil penelitian menunjukkan zona alterasi yang berkembang terdiri dari zona alterasi argilik (kaolinit+illit+smektit), argilik lanjut (kuarsa+kaolinit+dikit), dan silisifikasi (kuarsa+kalsedon+kaolinit). Tekstur urat kuarsa yang berkembang pada daerah penelitian terdiri dari masif, crustiform, crustiform-colloform, brecciated, bladed, dan saccharoidal. Tekstur urat kuarsa pembawa mineralisasi dengan kadar emas tinggi berupa crustiform-colloform, banded diikuti oleh massive quartz oxide, dan lattice bladed. Urat kuarsa tersebut berasosiasi dengan mineral lempung kaolinit+dikit dengan tingkat oksidasi sedang sampai tinggi, serta berasosiasi dengan sulfida abu-abu yang mengandung kadar tertinggi mencapai Au 76,65 ppm dan Ag 34 ppm.

Kata kunci: alterasi, argilik lanjut, crustiform-colloform banded, mineralisasi, tekstur kuarsa

Adithya Ramadhani Hasibuan¹, Reinaldi Juniarto², Nurdrajat¹, Reza Mohammad Ganjar Gani¹, Dicky Muslim³, dan M. Dwiki Satrio⁴

(¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, ²Departemen Teknik Geologi, UPN Veteran, ³Program Pascasarjana, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, dan ⁴Departemen Eksplorasi dan Geoteknik, PT Bukit Asam Tbk)

PEMODELAN GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBER DAYA BATUBARA DI PIT "HMG", TAMBANG BATUBARA BANKO BARAT, SUMATRA SELATAN

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2020 Vol. 15 No. 3 Hal. 170 - 182

Indonesia merupakan negara yang memiliki banyak deposit batubara, dan salah satu deposit terbesar ada di Pulau Sumatera. Tambang batubara Bukit Asam memiliki sejarah yang panjang sejak zaman Belanda. Wilayah penelitian ini berada di area tambang batubara Bukit Asam yang secara administratif terdapat di daerah Tanjung Enim, Kabupaten Muara Enim, Provinsi Sumatera Selatan. Makalah ini menggunakan pemodelan geologi 2D dan 3D untuk memperkirakan sumber daya batubara di PIT "HMG" di tambang batubara tepi barat. Empat puluh delapan data lubang bor eksplorasi PT Bukit Asam digunakan dalam penelitian ini. Data tersebut dianalisis dan diinterpretasi ulang untuk mengidentifikasi karakteristik batubara, mengorelasikan lapisan batubara, dan menyusunnya guna membuat model geologi bawah permukaan. Dalam upaya penentuan sumber daya batubara di kawasan ini terdapat beberapa teknik analisis (kriteria atau parameter) yang meliputi analisis kompleksitas geologi, analisis distribusi kualitas batubara, pemetaan bawah permukaan untuk mengamati geometri sebaran lapisan batubara dan pembuatan model geologi dari hasil kegiatan pengeboran. Objek penelitian yaitu lapisan batubara A1, A2, B1, B2, dan C dengan kategori peringkat bituminus B zat terbang tinggi berdasarkan klasifikasi ASTM. Distribusi lapisan batubara menunjukkan kecenderungan relatif tenggara-barat-laut. Klasifikasi atau estimasi sumber daya berdasarkan SNI 5015 : 2011 menunjukkan wilayah kajian termasuk dalam

kompleksitas geologi dengan gugus geologi sederhana dengan jarak informasi sumber daya tereka $1.000 < X \leq 1.500$ m, tertunjuk $500 < X \leq 1.000$ m, dan terukur $X \leq 500$ m. Dari pemodelan geologi dan perhitungan dengan metode sirkular diperoleh perkiraan sumber daya batubara total sebesar 155.085.529 ton, dengan rincian sumber daya per lapisan batubara adalah lapisan A1 sebesar 28.543.893 ton, lapisan A2 sebesar 31.199.799 ton, lapisan B1 sebesar 38.638.462 ton, lapisan B2 sebesar 15.790.222 ton, dan lapisan C sebesar 40.913.153 ton. Total sumber daya batubara sebesar 155,085,529 ton.

Kata kunci: batubara, estimasi sumber daya batubara, model geologi, batubara Banko Barat

Arsha Maulana¹ dan Ferian Anggara^{2,3}
 (¹Program Studi S1, Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, UGM, ²Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, UGM, dan ³Pusat Kajian Sumberdaya Bumi Non-konvensional, Fakultas Teknik, UGM)

KARAKTERISTIK BATUBARA TERPENGARUH INTRUSI DI TAMBANG AIR LAYA, SUMATRA SELATAN DAN POTENSINYA SEBAGAI MATERIAL UNTUK PEMBUATAN GRAFIT SINTETIS

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2020 Vol. 15 No. 3 Hal. 184 - 200

Grafit dapat diaplikasikan dalam berbagai macam kegunaan misal sebagai material tahan panas, baterai, dan elektroda. Material grafit bisa didapat melalui grafit sintetis yang berasal dari batubara antrasit yang terpanaskan pada suhu di atas 2000°C. Kondisi batubara yang terpanaskan secara alami dapat ditemui pada batubara yang terpengaruh intrusi batuan beku di Tambang Air Laya (TAL), Tanjung Enim, Sumatra Selatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik batubara terpengaruh intrusi batuan beku dan potensinya sebagai material untuk pembentukan grafit sintetis. Empat sampel batubara yang berasal dari 4 seam dengan jarak bervariasi terhadap intrusi diambil dan dipreparasi untuk dilakukan analisis sayatan poles, random vitrinite reflectance (R_{vr}), proksimat, X-Ray Diffractometry (XRD), Total Carbon (TC), Total Organic Carbon (TOC), Total Inorganic Carbon (TIC), serta analisis micro-Raman spectroscopy. Batubara terpengaruh intrusi batuan beku di lokasi penelitian mengalami kenaikan vitrinite reflectance dan kandungan fixed carbon (karbon tertambat) serta penurunan nilai moisture (kadar lengas)

dan volatile matter (zat terbang) seiring berkurangnya jarak terhadap tubuh intrusi. Batubara seam A1 berperingkat low volatile bituminous coal (%Ro= 2,01%) yang memiliki jarak terdekat dengan tubuh intrusi memiliki derajat pembatubaraan dan kandungan presentase mineral tertinggi. Batubara seam A1 memiliki banyak asosiasi mineral lempung yang dijumpai seperti ilit, smektit, dan rektorit sehingga dapat meningkatkan derajat kristalinitas dalam proses pembatubaraan dan akan mempermudah pada proses pembentukan grafit sintesis dalam proses selanjutnya.

Kata kunci: Batubara, Intrusi, Tambang Air Laya, Karakteristik Batubara, Grafit

Hisyam Azhar Azizi¹, Agus Didit Haryanto¹, Johanes Hutabarat¹, Dicky Muslim¹, Dewi Gentana¹, dan Ryan Hidayat²
 (¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, dan ²KS Orka Renewables Pte Ltd.)

POLA ALIRAN PANAS BERDASARKAN ANALISIS FLUIDA DAN MINERAL UBAHAN DI DAERAH PANAS BUMI SORIK MARAPI, KABUPATEN MANDAILING NATAL, PROVINSI SUMATRA UTARA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2020 Vol. 15 No. 3 Hal. 202 - 218

Daerah panas bumi Sorik Marapi di Kabupaten Mandailing Natal, Provinsi Sumatra Utara merupakan sistem panas bumi bertemperatur tinggi yang diduga dari karakteristik kimia air panas yang muncul di permukaan. Kehadiran mineral ubahan seperti epidot pada serbuk bor sumur eksplorasi memperkuat pendugaan temperatur reservoir yang mencapai 235°C. Karakteristik air panas bersifat lebih asam di sekitar fumarol dan mineral ubahan yang didapatkan dari sumur bor mencerminkan zona upflow sedangkan kelompok mata air panas berupa air klorida ber pH netral di sebelah utara dengan elevasi yang lebih rendah mencerminkan zona outflow sistem panas bumi di sini. Hal ini merupakan ciri khas aliran fluida panas yang terjadi di daerah panas bumi sistem vulkanik dengan morfologi terjal (steep terrain volcanic system) seperti halnya daerah Sorik Marapi.

Kata kunci: Sorik Marapi, geokimia, panas bumi, zona alterasi, upflow, outflow



Bidang sesar yang ditemukan pada litologi breksi freatomagmatik sebagai indikasi adanya sesar pada Pit Barani (Nada Salsabila Deva, 2020)



Kenampakan tekstur crustiform-colloform dengan komposisi kuarsa, kalsedon, dan mineral oksida gutit, setempat hematit (Nada Salsabila Deva, 2020)

GALERI FOTO



Kuarsa masif yang terletak pada lantai Pit Barani dengan mineral oksida guttit dan jarosit
(Nada Salsabila Deva, 2020)



Proses penambangan yang dominan dilakukan pada zona alterasi kuarsa+kaolinit+dikit,
dengan tingkat oksidasi kuat. Mineral oksida berupa guttit dan hematit
(Nada Salsabila Deva, 2020)



Peralatan kegiatan pengeboran (Hand Auger) mineral ekonomis lumpur lapindo, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2020)



Kegiatan pengerukan lumpur lapindo, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2020)

GALERI FOTO



Kegiatan pengeboran mineral ekonomis di lumpur lapindo dengan menggunakan Hand Auger, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2020)



Core lumpur lapindo, Kabupaten Sidoarjo, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2020)



Batubara peringkat rendah dari Formasi Muaraenim yang masih memperlihatkan jejak tumbuhan dalam sampel batuan inti hasil pengeboran MJ01 Sekayu, Kabupaten Musibanyuasin, Provinsi Sumatera Selatan (Muhammad Abdurachman Ibrahim, 2017)



Lensa batubara memperlihatkan Formasi Paninan tidak berkembang dengan baik batubaranya di Kabupaten Pesisir Selatan, Provinsi Sumatera Barat (Muhammad Abdurachman Ibrahim, 2016)

GALERI FOTO



Salah satu mata air panas yang terdapat di Daerah Beppu, Prefektur Oita, Jepang yang dikenal sebagai Umi Jigoku. Ciri khas mata air panas Umi Jigoku yaitu memiliki warna biru dengan temperatur mencapai 100°C . (Lano A.P, 2016)



Manifestasi panas bumi berupa kolam lumpur panas di Daerah Beppu, Prefektur Oita, Jepang yang dikenal sebagai Oniishibozu Jigoku. Kolam lumpur panas ini dicirikan oleh warna abu-abu dan terdapat gelembung-gelembung. (Lano A.P, 2016)



Graffiti on Rock Outcrops. Singkapan Batupasir dan Breksi yang terdapat di Daerah Panulisan, Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah. Pada singkapan tersebut terdapat grafiti yang menyerupai wajah manusia. (Lano A.P, 2020)



Mata air panas yang telah ditampung dalam bentuk kolam di Daerah Negeri Olok Gading, Sungai Kali Akar, Kecamatan Teluk Betung Barat, Kota Bandar Lampung. Karakteristik berupa temperatur berkisar 41°C, pH = 6,49, debit <math>< 0,1 \text{ L/detik}</math>, bening, tidak berbau (H_2S), tidak berasa dan terdapat sedikit gelembung. (Andi H.C.K, 2020)

GALERI FOTO



Mata air panas yang ditampung dalam sumur buatan di Desa Natar, Kabupaten Lampung Selatan. Mata air panas Natar mempunyai temperatur sekitar 53°C, pH 6,51, bening, berbau sedikit H₂S, sedikit asam/kesat dan terdapat gelembung-gelembung serta digunakan sebagai tempat wisata pemandian. (Andi H.C.K, 2020)



Mata air panas Panulisan yang terletak di Desa Panulisan, Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah. Mata air panas Panulisan memiliki temperatur sekitar 47°C, pH 6, debit 1 L/detik, daya hantar listrik 16860 μ S/cm, sedikit keruh, asin dan muncul di endapan alluvial serta digunakan masyarakat sebagai tempat pemandian. (Lano A.P, 2020)



Kaipohan di daerah Balla, Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, Provinsi Sulawesi Selatan (masyarakat sekitar menyebutnya “Kawah”) (Widya Asoka, 2020)



Pengukuran Geolistrik untuk pemanfaatn panas bumi secara langsung di daerah Panulisan, Provinsi Jawa Tengah (Widya Asoka, 2020)

GALERI FOTO



survei geokimia (sampling udara tanah) di era New Normal, Kecamatan Panulisan, Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah (Widya Asoka, 2020)



Zona Alterasi di Desa Balla, Kecamatan Bittuang, Tana Toraja, Sulawesi Selatan (Widya Asoka, 2020)

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, ulasan 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/](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: buletinpsdg@gmail.com
OJS: <http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>

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

SERTIFIKAT

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
Direktorat 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

