

buletin

SUMBER DAYA GEOLOGI

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

Volume 16 No. 1, Mei 2021



Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Badan Geologi

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 16	No. 1	Halaman 1 - 70	Bandung Mei 2021	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020
--------------------------------	---------	-------	-------------------	---------------------	---

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Batuan induk yang diperkirakan bekomposisi andesit-dasit
(Ronaldo Irzon, dkk., 2021)

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

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

DEWAN REDAKSI

Editor In Chief	Ir. Denni Widhiyatna, M.T.
Managing Editor	Eko Suryanto, S.Kom. Resmi Novianti, S.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. 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

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT karena saat ini Buletin Sumber Daya Geologi telah dapat hadir kembali sebagai BSDG volume.16 nomor.1 tahun 2021. Buletin ini berdasarkan Keputusan Menristek/Kepala BRIN nomor 200/M/KPT/2020 tentang Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020 dinyatakan lulus berpredikat tetap pada Peringkat 2 dengan EISSN nomor 25801023 yang berlaku sejak volume.15 nomor 2 Tahun 2020 hingga lima tahun ke depan.

Edisi kali ini menyajikan lima makalah yang mengkaji tentang potensi panas bumi, gas metana dalam batubara, kandungan minyak dalam batuan serpih, unsur tanah jarang pada batuan yang terkaolinitisasi dan potensi material ekonomis dalam abu batubara hasil pembakaran. Makalah-makalah tersebut dilengkapi teori, metode pengukuran, analisis sampel dan pengolahan data sehingga merupakan hasil kajian yang menarik untuk dibaca lebih lanjut.

Makalah kesatu merupakan kajian pemanfaatan data magnetotelurik (MT) di daerah panas bumi berupa komparasi pemodelan inversi 1-D, 2-D dan 3-D agar menghasilkan model yang realistis dan lebih presisi. Penggunaan metode MT dapat menggambarkan struktur/zona tahanan jenis rendah yang dapat ditafsirkan sebagai lapisan penudung. Zona-zona tersebut biasanya membantu penentuan target *well/site* dan memperkirakan potensi / kapasitas sumber daya panas bumi.

Cleat atau rekahan dalam batubara merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pola aliran gas metana dalam lapisan batubara. Makalah kedua ini menguraikan karakteristik *microcleat* dalam anggota M3 pada Formasi Muaraenim dari beberapa sampel batubara hasil pengeboran pada kedalaman yang berbeda.

Makalah selanjutnya mengulas tentang alternatif sumber daya energi fosil yang dapat diperoleh dari kandungan minyak dalam batuan serpih. Kajian ini menguraikan karakter serpih dari beberapa sampel hasil pengeboran yang menunjukkan data adanya kandungan minyak dalam batuan tersebut.

Makalah keempat mempelajari tentang potensi pengayaan bahan ekonomis seperti besi, alumina dan unsur tanah jarang (UTJ) dalam batuan gunungapi yang mengalami pelapukan kaolinitisasi. Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan dan analisis sampel pada beberapa horizon di daerah penelitian, terdapat peningkatan kadar alumina dan besi akibat proses pelapukan namun jumlahnya belum ekonomis, sedangkan untuk UTJ tidak terdapat pengayaan pada horizon pelapukan tertentu pada profil yang diteliti.

Makalah terakhir berupa tinjauan pustaka tentang abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara berupa *Fly Ash and Bottom Ash (FABA)* yang memiliki potensi secara ekonomis karena mengandung beberapa unsur berharga, selain saat ini telah dimanfaatkan sebagai material geopolimer. Kajian ini mengulas tentang karakteristik kimia dan fisika, potensi dan peluang pemanfaatan FABA.

Dewan Redaksi mengucapkan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada para Penulis, Editor dan Mitra Bestari atas kontribusi dan dukungannya untuk menghadirkan edisi saat ini. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi dan pihak manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi sehingga dapat hadir diantara para pembaca hingga tahun ke enam belas. Semoga kehadiran Buletin ini dapat menambah wawasan dan pengetahuan untuk para pembaca dalam bidang ilmu kebumiharian.

Hormat Kami
Dewan Redaksi

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

- 1 - 11 **STUDI KOMPARASI PEMODELAN INVERSI 1-D, 2-D, DAN 3-D DATA MAGNETOTELLURIK DI DAERAH PANAS BUMI LOKOP, PROVINSI ACEH**
COMPARATIVE STUDY OF MAGNETOTELLURIC 1-D, 2-D, AND 3-D INVERSION MODELLING AT LOKOP GEOTHERMAL AREA, PROVINCE OF ACEH
Oleh : Wiwid Joni dan Iqbal Takodama
- 13 - 26 **KARAKTERISTIK CLEAT TERHADAP PERMEABILITAS DAN KANDUNGAN GAS PADA BATUBARA ANGGOTA M3 FORMASI MUARAENIM DI DAERAH MANGUNJAYA, PROVINSI SUMATRA SELATAN**
CLEAT CHARACTERIZATION ON PERMEABILITY AND GAS CONTENT IN M3 MEMBERS OF MUARAENIM FORMATION AT MANGUNJAYA AREA, SOUTH SUMATRA PROVINCE
Oleh : Muhammad Abdurachman Ibrahim dan Tito Harianto
- 27 - 36 **KARAKTERISTIK SERPIH MINYAK PADA FORMASI SINAMAR BERDASARKAN DATA PENGEBORAN BRP-02 DI DAERAH RANTAU PANDAN, PROVINSI JAMBI**
CHARACTERISTICS OF OIL SHALES IN SINAMAR FORMATION BASED ON BRP-02 DRILL HOLE DATA AT RANTAU PANDAN AREA, JAMBI PROVINCE
Oleh : Robet Lumban Tobing
- 37 - 51 **KAOLINITISASI DAN MOBILITAS UNSUR TANAH JARANG PADA PROFIL PELAPUKAN BATUAN GUNUNGAPI DI PUNCAK MANDEH, SUMATRA BARAT**
KAOLINITIZATION AND RARE EARTH ELEMENTS MOBILIZATION OF A VOLCANIC ROCK WEATHERING PROFILE IN PUNCAK MANDEH, WEST SUMATRA
Oleh : Ronaldo Irzon, Kurnia, Purnama Sendjaja, dan Verry E. Setiawan
- 53 - 70 **TINJAUAN PUSTAKA KARAKTERISASI DAN POTENSI PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH (FABA)**
REVIEW ON CHARACTERIZATION AND UTILIZATION POTENTIAL OF FLY ASH AND BOTTOM ASH (FABA)
Oleh : Ferian Anggara, Himawan T.B.M. Petrus, Dea Anisa Ayu Besari, Hotden Manurung, dan Febry Yulindra Abdi Saputra

ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi

**STUDI KOMPARASI PEMODELAN INVERSI 1-D, 2-D, DAN 3-D
DATA MAGNETOTELLURIK DI DAERAH PANAS BUMI LOKOP, PROVINSI ACEH****COMPARATIVE STUDY OF MAGNETOTELLURIC 1-D, 2-D, AND 3-D INVERSION
MODELLING AT LOKOP GEOTHERMAL AREA, PROVINCE OF ACEH****Wiwid Joni dan Iqbal Takodama**Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
joniwiwid@gmail.com**ABSTRAK**

Metode magnetotellurik (MT) dapat menggambarkan struktur/zona tahanan jenis rendah di daerah panas bumi yang dapat ditafsirkan sebagai lapisan batuan penudung. Zona-zona ini biasanya digunakan untuk membantu penentuan target *wellsite* dan memperkirakan potensi/kapasitas sumber daya panas bumi. Dalam pemrosesan data MT, dapat dilakukan dengan pemodelan inversi 1-D, 2-D, dan 3-D untuk menghasilkan model yang realistis dan lebih presisi. Pemodelan Inversi 1-D sangat mudah dilakukan, disamping itu dapat digunakan sebagai jaminan kualitas setiap stasiun data MT yang lebih efektif. Inversi 1-D biasanya dapat menggambarkan karakter geometri dari tahanan jenis secara keseluruhan terhadap lapisan penudung, namun tidak dapat mendeteksi batas bawah atau variasi kedalamannya. Untuk menjawab ketidakpastian tersebut, dapat dilakukan pemodelan inversi 2-D. Namun pemodelan inversi 2-D juga tidak akan dapat berhasil baik, jika mendapatkan kondisi geologi yang kompleks di daerah penyelidikan. Keterbatasan dari pemodelan inversi 1-D dan 2-D tersebut, dapat diatasi dengan melakukan pemodelan inversi 3-D. Perbandingan metode pemodelan ini dilakukan dengan menggunakan data MT di daerah panas bumi Lokop, Provinsi Aceh. Hasil pemodelan 1-D dan 3-D lebih dapat menggambarkan kemungkinan adanya zona lapisan penudung di daerah panas bumi Lokop.

Kata kunci: magnetotellurik, lapisan batuan penudung, panas bumi Lokop, pemodelan inversi, Provinsi Aceh

ABSTRACT

Magnetotelluric (MT) method can determine conductivity structure in geothermal area, which could be interpreted as smectite clay (clay cap) that is commonly used to help target geothermal wells and assess resource capacity. In order to process the MT data, we can do 1-D, 2-D, and 3-D inversion modelling to produce a realistic MT model data. 1-D inversion is very easy to do, where this model can support an effective quality assurance of each MT station data. 1-D inversion is usually able to characterize the overall resistivity geometry of a geothermal clay cap, although it cannot detect edges or deep variations. In order to overcome this uncertainty, 2-D inversion can be performed. However, 2-D inversion also cannot work properly, if the MT survey was carried out in complicated geological environments. The limitations of 1-D and 2-D inversions can be fixed by performing 3-D inversion. The modelling application was carried out using MT data in Lokop geothermal area, Province of Aceh. The 1-D and 3-D modeling result can describe a better possibility of clay cap in Lokop geothermal area.

Keywords: magnetotelluric (MT), clay cap, Lokop geothermal, inversion modelling, Province of Aceh

PENDAHULUAN

Pengukuran Magnetotellurik (MT) sensitif terhadap struktur tahanan jenis bumi, berpotensi melebihi kedalaman 100 Km (Cagniard, 1953; Swift, 1967; Word, D. R, dkk., 1971; Vozoff, 1972; Larsen, 1981; Wannamaker, 1983). MT merupakan salah satu metode geofisika utama dalam eksplorasi panas bumi. Khususnya pada tahap awal eksplorasi, suatu model tahanan jenis menjadi kunci informasi untuk menentukan lokasi bor eksplorasi dan bor produksi (Uchida, T., 2005).

Data MT merupakan respon dari struktur tahanan jenis 3-D di dalam bumi. Namun secara tradisi, data MT telah ditafsirkan menggunakan struktur model 1-D dan 2-D (Petrick, dkk., 1977; Stanley, dkk., 1977; Rooney dan Hutton, 1977). Tradisi ini muncul akibat pemodelan 3-D membutuhkan sistem komputasi yang mumpuni dalam memahami struktur bumi yang kompleks, namun tidak memiliki kemampuan komputasi yang dibutuhkan. Kekurangan tersebut menghasilkan penafsiran yang salah ketika komputasi 1-D dan 2-D digunakan di area 3-D (Wannamaker, P. E., dkk., 1984).

Struktur tahanan jenis bumi adalah 3-D, sedangkan pada lokasi cekungan sedimen umumnya sering mendekati 1-D. Apabila struktur geologi di daerah penelitian mempunyai kekonsistenan arah struktur, diduga dapat mendekati struktur tahanan jenis 2-D. Namun kenyataannya, meskipun kita melakukan *layout* pengukuran yang ideal tegak lurus terhadap struktur, data bawah permukaan pasti akan berupa 3-D di beberapa tempat pengukuran (Robertson, K., dkk., 2020).

Dalam perbandingan respon model 3-D, 2-D, dan 1-D, dimana respon model 1-D pada pusat model suatu stasiun MT secara langsung akan terhubung ke pusat model stasiun sebelahnya, namun interpretasi zona lapisan penudung hasil 1-D cukup berhasil apabila zona lapisan penudung tersebut berupa zona lateral yang luas dan dangkal. Lokasi keberadaan reservoir

minimal membutuhkan interpretasi model 2-D (Johnston, J. M., dkk., 1992). Inversi 2-D telah menjadi teknik standar untuk interpretasi data MT dalam dekade terakhir. Hasil pemodelan inversi 2-D ini telah memberikan model tahanan jenis yang detail di banyak lapangan panas bumi dan telah berkontribusi untuk memahami ciri tahanan jenis spesifik dari reservoir panas bumi. Namun akibat sering terdapat lingkungan geologi yang kompleks di lapangan panas bumi, interpretasi 2-D terkadang gagal dalam menghasilkan model yang realistis. Untuk mengatasi masalah tersebut, teknik inversi 3-D telah digunakan secara intensif dalam beberapa tahun terakhir (Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006).

Pemodelan inversi 3-D bukanlah satu-satunya pendekatan penggambaran struktur tahanan jenis bawah permukaan. Dengan melakukan pemrosesan inversi 1-D awal secara kontinyu, menjadi jaminan keberhasilan dalam hasil inversi 3-D. Untuk menilai ketidakpastian dalam penargetan yang baik, inversi 3-D dikombinasikan dengan inversi 1-D, dan mungkin inversi 2-D dapat di coba dalam rangka membangun model konseptual sumber daya secara terintegrasi (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010). Hasil pemodelan inversi 3-D dipengaruhi oleh distorsi data MT, pemilihan *error*, serta kelengkapan data MT tersebut (Miensoyust, M.P, dkk., 2013). Dengan pemodelan inversi 3-D, kita dapat menjelajahi efek ruang model dan kisaran pengaturan inversi yang digunakan untuk menghasilkan model yang lebih baik kedepannya (Tietze, K., dan Ritter, O., 2013).

Pada makalah ini, penulis melakukan pemodelan inversi 1-D, 2-D, dan 3-D menggunakan data MT di daerah panas bumi Lokop. Hasil dari ketiga metode pemodelan tersebut dapat ditarik kesimpulan, bahwa pemodelan inversi 1-D dan 3-D lebih baik dalam memberikan gambaran struktur tahanan jenis di daerah panas bumi Lokop, sedangkan model 2-D kurang dapat memberikan hasil yang rinci. Hal ini kemungkinan diakibatkan oleh

struktur kompleks yang terbentuk di daerah penyelidikan, sehingga cenderung menghasilkan interpretasi model 2-D yang berbeda.

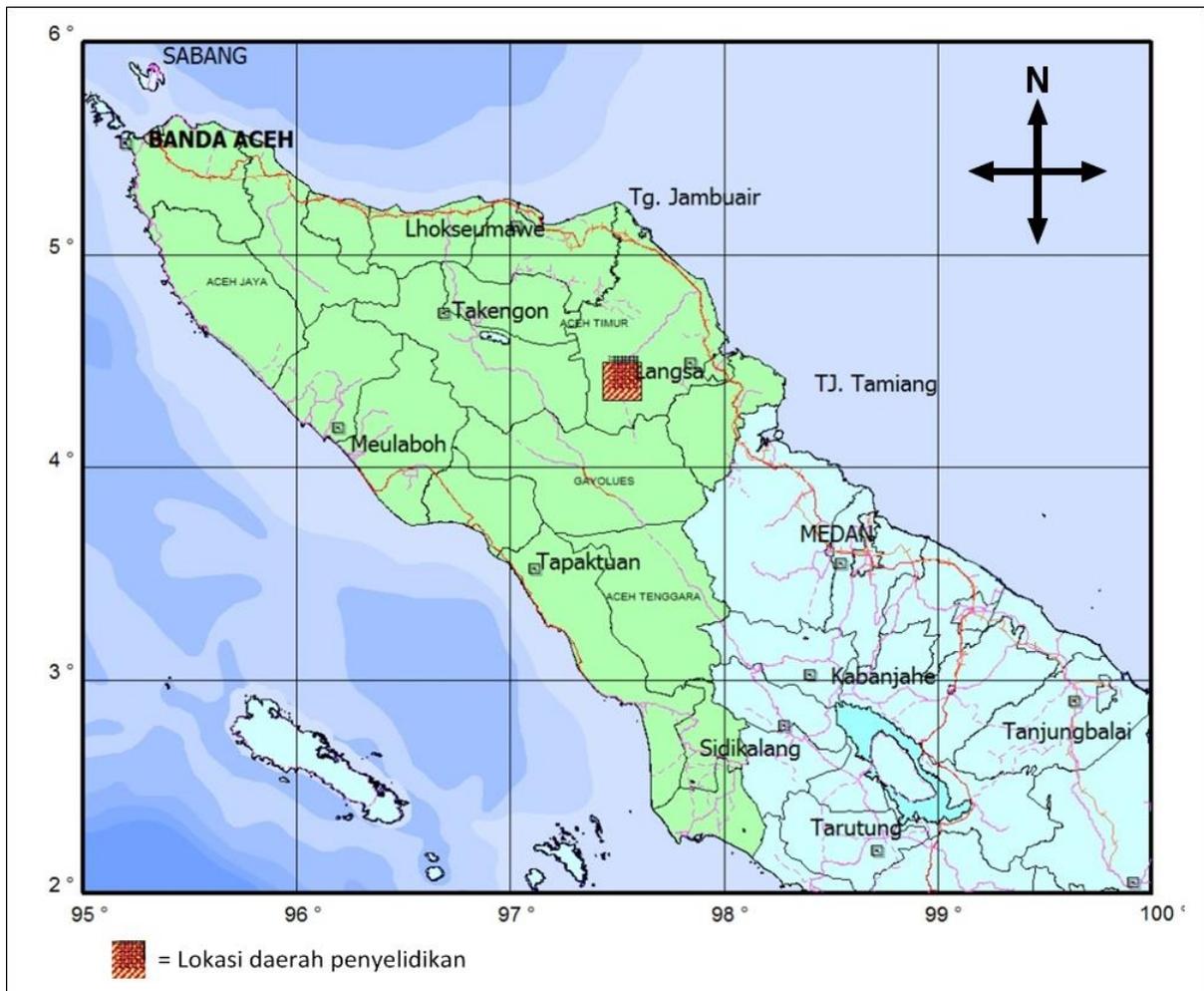
Secara administratif daerah panas bumi Lokop termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Aceh Timur, Provinsi Aceh (Gambar 1). Keberadaan potensi panas bumi di daerah penyelidikan ini ditandai oleh manifestasi berupa kelompok mata air panas Lokop yang memiliki temperatur 51,8°C sampai dengan 93,5°C.

Survei rinci MT dan *Time Domain Elektromagnetic* (TDEM) di daerah penyelidikan ini merupakan kegiatan Tahun Anggaran 2017 yang dilakukan oleh

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi – Badan Geologi.

METODOLOGI

Metode MT merupakan metode elektromagnetik (EM) pasif, yang melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik (*E*) dan medan magnet (*B*) alami secara ortogonal di permukaan bumi. Metode ini juga berfungsi sebagai alat untuk menentukan struktur konduktifitas bumi pada kisaran kedalaman beberapa puluh meter hingga beberapa ratus kilometer. Penetrasi kedalaman dari medan EM ini bergantung pada sounding periode dan struktur konduktivitas bumi (Simpson, F., dan Bahr, K., 2005).



Gambar 1. Lokasi daerah penyelidikan

Hubungan antara medan listrik dan medan magnet dapat dinyatakan oleh persamaan matrik berikut:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1)$$

Atau dapat ditulis sebagai $E = Z * H$, dimana Z adalah tensor impedansi.

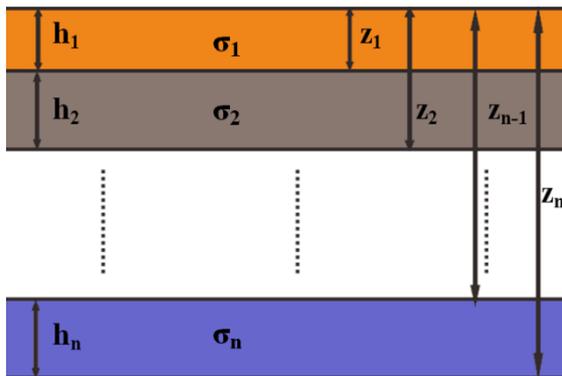
Struktur Model 1-Dimensi

Cagniard (1953), Keller dan Frischknecht (1966) menyatakan bahwa dalam kasus struktur 1-D berupa bidang bumi berlapis, (Gambar 2), dan setiap lapisannya bersifat homogen dan isotropik. Besar impedansi (Z) bergantung pada konduktifitas (σ) dan kedalaman (h) seperti gambar di bawah ini, Dalam kasus struktur 1-D, berlaku: $Z_{xy} = -Z_{yx}$, dan $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$, nilai tahanan jenis semu dapat ditulis,

$$\rho_{xy} = \frac{1}{2\pi f \mu_0} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{2\pi f \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \dots\dots\dots(2)$$

Sedangkan nilai fase,

$$\phi_{xy} = \tan^{-1} |Z_{xy}| = \tan^{-1} \left| \frac{E_x}{H_y} \right| \dots\dots\dots(3)$$

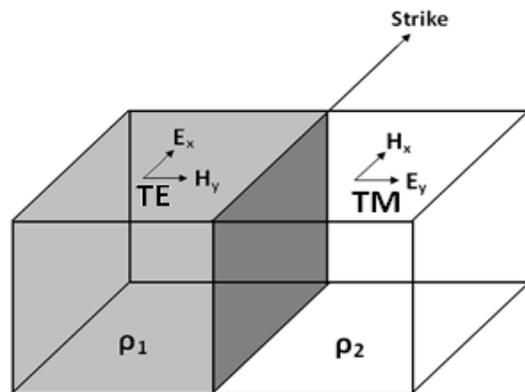


Gambar 2. Kasus struktur 1-Dimensi

Struktur Model 2-Dimensi

Pada kasus struktur 2-D (Gambar 3), resistivitas bervariasi baik dalam arah vertikal dan arah horizontal (arah x dan y), besarnya medan listrik dan medan magnet dipengaruhi oleh arah pengukuran yang dilakukan terhadap arah jurus atau *strike*. Hasil medan listrik dan medan magnet

yang terukur dapat di dekomposisi menjadi dua polarisasi yaitu *transverse electric* (modus TE) dan *transverse magnetic* (modus TM). Modus TE didefinisikan jika medan listrik searah jurus/*strike*, sedangkan modus TM didefinisikan jika medan listrik tegak lurus jurus/*strike*. Gambar di bawah ini menunjukkan arah jurus/*strike* dan kaitannya dengan modus TE dan TM. Skenario 2-D menunjukkan bahwa tidak ada variasi medan sepanjang jurus/*strike*, sehingga nilai konduktifitas dianggap konstan (Simpson, F., dan Bahr, K., 2005).

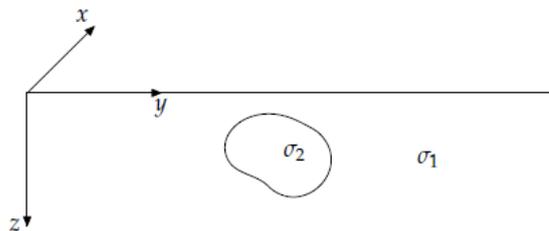


Gambar 3. Struktur model 2-Dimensi

Dalam kasus struktur 2-D, berlaku: $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$, dan $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$.

Struktur Model 3-Dimensi

Dalam kasus struktur 3-D (Gambar 4), nilai tahanan jenis dalam model bumi 3-D bervariasi dalam semua arah $\rho(x, y, z)$.



Gambar 4. Struktur model 3-Dimensi

Pemodelan inversi 3-D yang melibatkan keempat komponen tensor impedansi disebut sebagai *full impedance tensor*. Dalam pemodelan inversi 3-D, penulis hanya menggunakan dua komponen tensor impedansi Z_{xy} dan Z_{yx} . Dengan

melakukan inversi 3-D sederhana yang hanya melibatkan dua komponen impedansi Z_{xy} dan Z_{yx} dapat mengatasi kontaminasi oleh efek 3-D, akibat merotasi data MT ke arah yang salah, sehingga menghasilkan model yang salah. Namun dengan hanya melibatkan kedua komponen tensor impedansi Z_{xy} dan Z_{yx} juga memiliki kelemahan akibat kontaminasi oleh *off-plane structure* yaitu impedansi Z_{xx} dan Z_{yy} (Siripunvaraporn, W., dkk., 2005).

HASIL DAN PEMBAHASAN

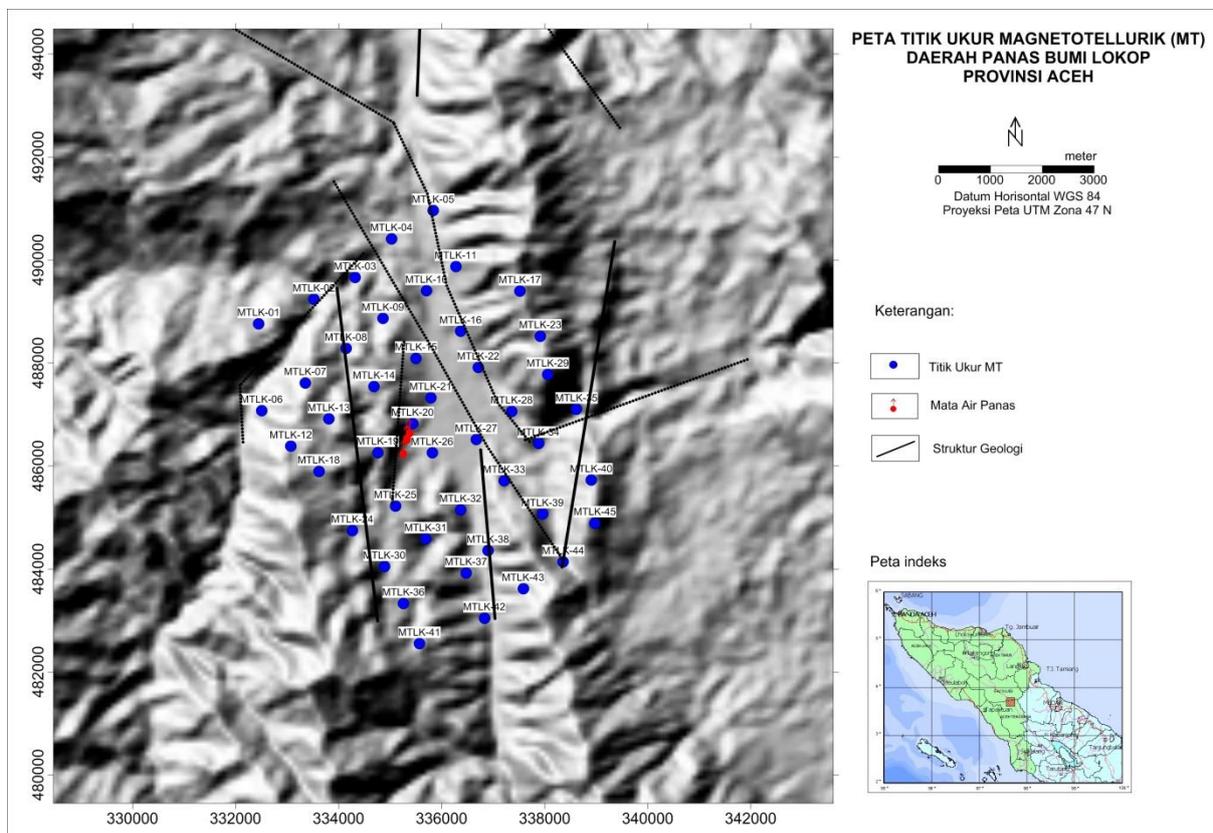
HASIL

Sebaran titik ukur MT berjumlah 45 titik ukur membentuk delapan lintasan berarah barat daya - timur laut dengan jarak antara titik ukur sekitar 500 sampai dengan 1.500 meter (Gambar 5).

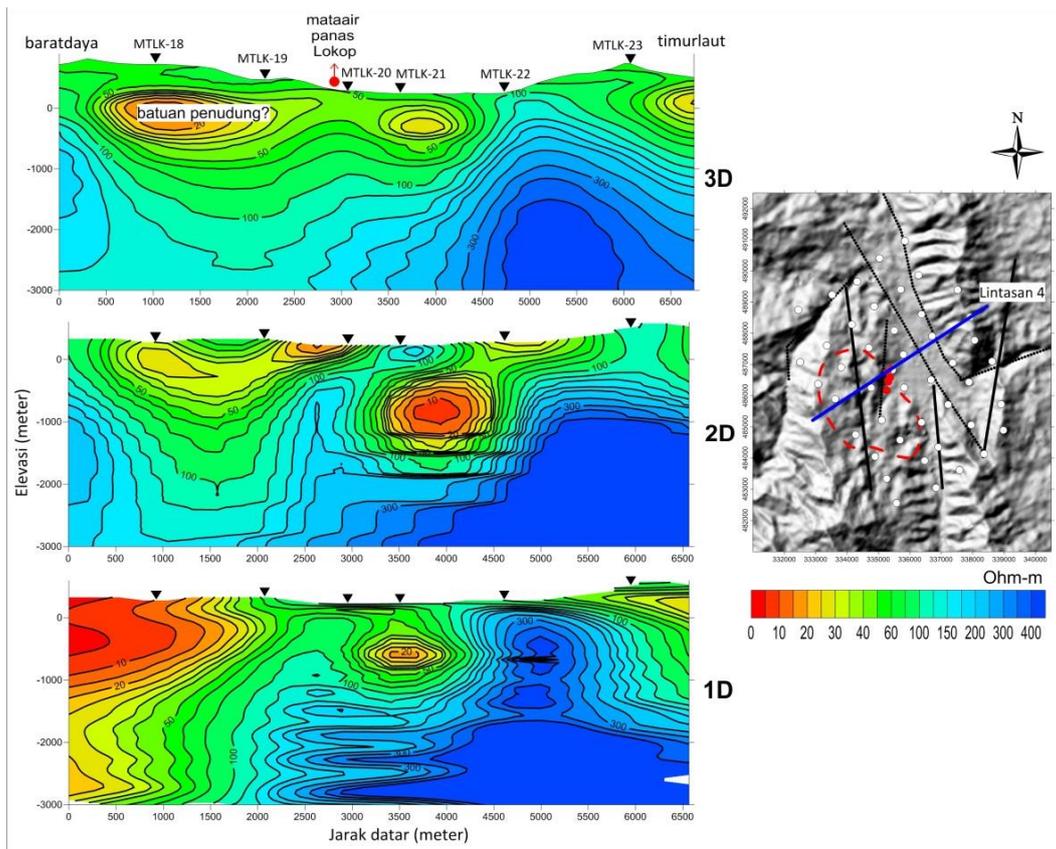
Pemodelan inversi 1-D dan 2-D ini menggunakan perangkat lunak WinGLink. Pada pemodelan inversi 1-D, digunakan

invarian tensor impedansi xy dan yx, sedangkan pada inversi 2-D digunakan kedua modulus TE dan TM. Pemodelan inversi 3-D menggunakan perangkat lunak WSINV3DMT, yang hanya menggunakan dua komponen tensor impedansi xy dan yx. Penulis menampilkan hasil pemodelan inversi 1-D, 2-D, dan 3-D pada dua lintasan, yaitu lintasan 4 dan 5 untuk melihat perbandingan hasil struktur tahanan jenis bawah permukaan secara vertikal (Gambar 6, dan 7). Area sebaran tahanan jenis secara lateral yang merupakan hasil pemodelan inversi 3-D dapat dilihat pada Gambar 8.

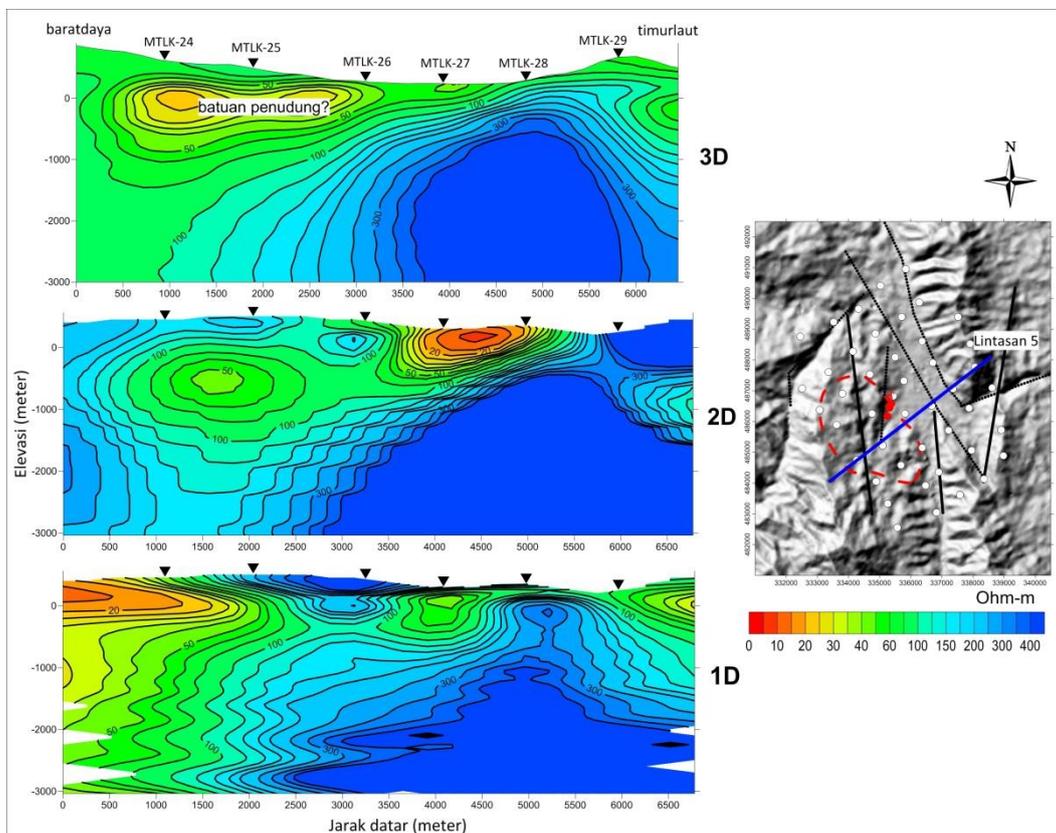
Berdasarkan hasil inversi 1-D, 2-D, dan 3-D pada model lintasan 4 (Gambar 6) ditunjukkan nilai tahanan jenis rendah <30 Ohm-m berada di bagian barat dan relatif menerus ke arah mata air panas Lokop. Zona lapisan tahanan jenis rendah ini berada hingga elevasi -600 meter atau dengan ketebalan 900 meter dari permukaan berdasarkan hasil pemodelan 3-D.



Gambar 5. Peta sebaran titik ukur MT



Gambar 6. Penampang tahanan jenis Lintasan 4



Gambar 7. Penampang tahanan jenis Lintasan 5

Hasil model 1-D dan 3-D pada penampang tahanan jenis lintasan 5 (Gambar 7) menunjukkan lapisan bertahanan jenis rendah <30 Ohm-m yang berada di bagian barat lintasan, namun hasil inversi 3-D tahanan jenis rendah ini relatif menerus ke arah timur dibandingkan dengan hasil inversi 1-D. Hal ini diakibatkan oleh terjadinya *shifting* data pada titik ukur MTLK-26 sehingga menjadi lebih tinggi di titik tersebut. Dari perspektif model 1-D atau 2-D, data MT dapat terdistorsi, sehingga tidak menghasilkan model yang ideal di atas dasar batuan penudung panas bumi, kecuali dalam hal diskontinuitas lateral (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010). Sedangkan hasil inversi 2-D, lapisan tahanan jenis di lokasi tersebut bernilai relatif tinggi >40 Ohm-m. Keberadaan zona lapisan tahanan jenis rendah <30 Ohm-m hingga elevasi -500 meter dari rata-rata permukaan laut (*mean sea level*), dengan tebal 900 meter, bila diproses dengan pemodelan 3-D.

Hasil pemodelan inversi 3-D dapat diiris secara lateral untuk mengetahui sebaran variasi tahanan jenis secara lateral pada kedalaman tertentu (Gambar 8). Salah satu keuntungan pemodelan inversi 3-D adalah peta hasil irisan setiap elevasi melalui model tahanan jenis 3-D sangat mudah disajikan. Suatu peta yang dihasilkan dari pemodelan inversi 2-D terkadang salah kaprah akibat hasil model 2-D memiliki tren selaras dengan profil model 2-D, kecuali jika tahanan jenis keseluruhan konsisten dari profil ke profil lainnya (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010).

Sebaran tahanan jenis rendah <30 Ohm konsisten hingga kedalaman 750 meter berada di bagian barat, barat laut, timur laut, tenggara, dan selatan daerah penyelidikan (Gambar 8). Hal yang menarik dari sebaran tahanan jenis ini, terlihat di bagian barat dari mata air panas Lokop dan menerus ke arah selatan, zona tahanan jenis rendahnya relatif tegas berupa spot memanjang berarah utara-selatan dan nilainya semakin tinggi sejalan dengan bertambahnya kedalaman. Zona tahanan

jenis rendah <30 Ohm-m (lingkaran merah putus-putus) ini diduga berhubungan dengan keberadaan sistem panas bumi di daerah Lokop.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pemodelan inversi 1-D dari kedua lintasan menunjukkan pola yang relatif sama dengan inversi 3-D, namun ketebalan dari lapisan tahanan jenis rendah <30 Ohm-m ini relatif menebal hingga kedalaman dibandingkan hasil inversi 3-D pada lintasan 4. Hal tersebut karena inversi 1-D lemah dalam batas tepi bawah lapisan tahanan jenis (batuan penudung) atau variasi di kedalaman (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010). Sebagian besar sounding menunjukkan struktur 1-D secara lokal pada penetrasi dangkal yang dapat menerus hingga kedalaman 1.000 meter atau lebih dari permukaan tanah, yang jauh sampai reservoir panas bumi, dengan demikian analisis 1-D berlapis umumnya cukup untuk mengembangkan anomali yang menarik (Anderson, E., dkk., 2000). Pada model lintasan 5 di bawah titik ukur MTLK-24 menghasilkan data *shifting*, sehingga model 1-D dapat diandalkan untuk mengetahui kemungkinan data yang terdistorsi dekat kontras lateral, atau dengan kata lain dapat menilai kualitas data setiap stasiun MT (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010).

Hasil pemodelan inversi 2-D di kedua lintasan menunjukkan bahwa hanya pada lintasan 4 yang memiliki pola yang serupa dengan hasil inversi 3-D. Sistem panas bumi jelas memiliki struktur 3-Dimensi, tetapi seringkali terbentuk dalam lingkungan regional 2-Dimensi (Anderson, E., dkk., 2000). Inversi 2-D bisa bekerja dengan baik jika terdapat konsistensi struktur geologi yang hampir tegak lurus terhadap stasiun MT yang tersedia pada lintasan penampang tahanan jenis. Strategi yang sering digunakan adalah dengan merotasi secara matematis semua stasiun MT sepanjang lintasan, sehingga arah *Ex* sejajar dengan struktur geologi. Jika arah struktur tegak lurus terhadap semua

lintasan maka pemodelan inversi 2-D akan bekerja dengan baik (Cumming, W., dan Mackie, R, 2010). Berdasarkan pengalaman, pemodelan inversi 2-D seringkali tidak cukup dalam eksplorasi panas bumi khususnya dalam lingkungan geologi yang kompleks, sehingga pemodelan inversi 3-D sangat perlu dilakukan (Uchida, T., 2005).

Hasil penampang model 3-D pada kedua lintasan dapat menentukan batas bawah zona lapisan penudung yang tidak tergambarkan oleh hasil model inversi 1-D, dengan demikian investigasi kedalaman efektif nya tidak dibatasi oleh asumsi geometris seperti halnya pada kasus inversi 1-D dan 2-D. Dalam mengaplikasikan inversi 3-D dari arah rotasi yang berbeda menyatakan bahwa hasil model 3-D tidak bergantung pada arah rotasi secara signifikan, meskipun hanya menggunakan komponen impedansi *off-diagonal* (Z_{xy} dan Z_{yx}) untuk inversi 3-D (Uchida, T., 2005).

Berdasarkan hasil pemodelan inversi 3-D pada kedua lintasan di atas (Gambar 9), sebaran tahanan jenis rendah <30 Ohm-m di bagian barat penampang tahanan jenis diinterpretasikan sebagai zona lapisan batuan penudung dari sistem panas bumi Lokop. Batuan penudung ini bersifat impermeabel yang dapat menahan fluida dan panas untuk keluar. Hasil penampang tahanan jenis lintasan 10 menunjukkan keberadaan dasar zona lapisan tahanan jenis rendah <30 Ohm-m yang diinterpretasikan sebagai puncak lapisan penudung (tertinggi), berada pada elevasi -250 meter atau kedalaman 700 meter dari permukaan. Keberadaan zona top reservoir dari sistem panas bumi diduga berada mulai kedalaman 800 sampai dengan 900 meter. Zona tahanan jenis bernilai sedang, di bawah zona tahanan

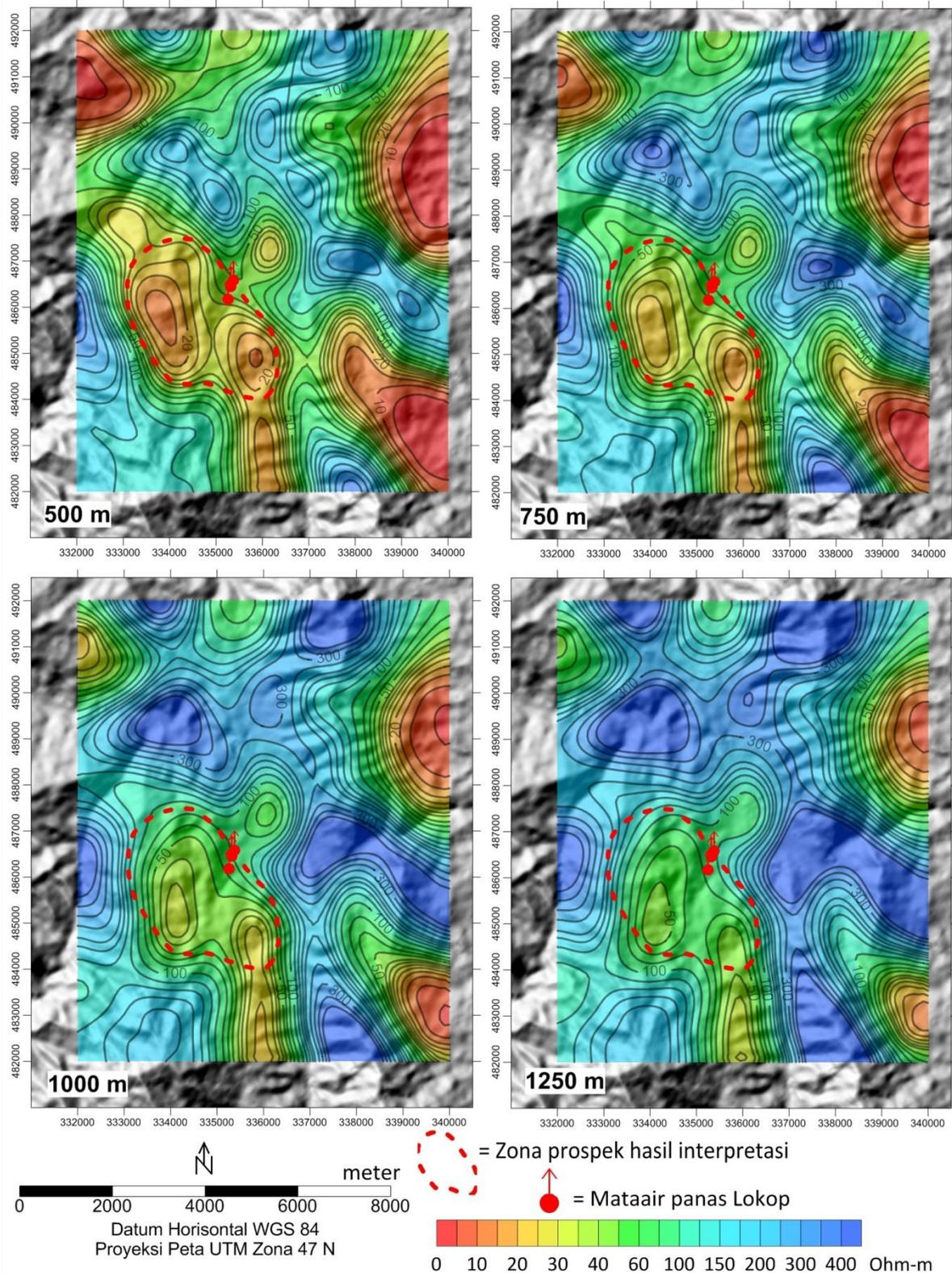
rendah tersebut diduga sebagai reservoir dari sistem panas bumi Lokop yang berfungsi sebagai media penyimpanan fluida melalui permeabilitas antar butir ataupun rekahan.

KESIMPULAN

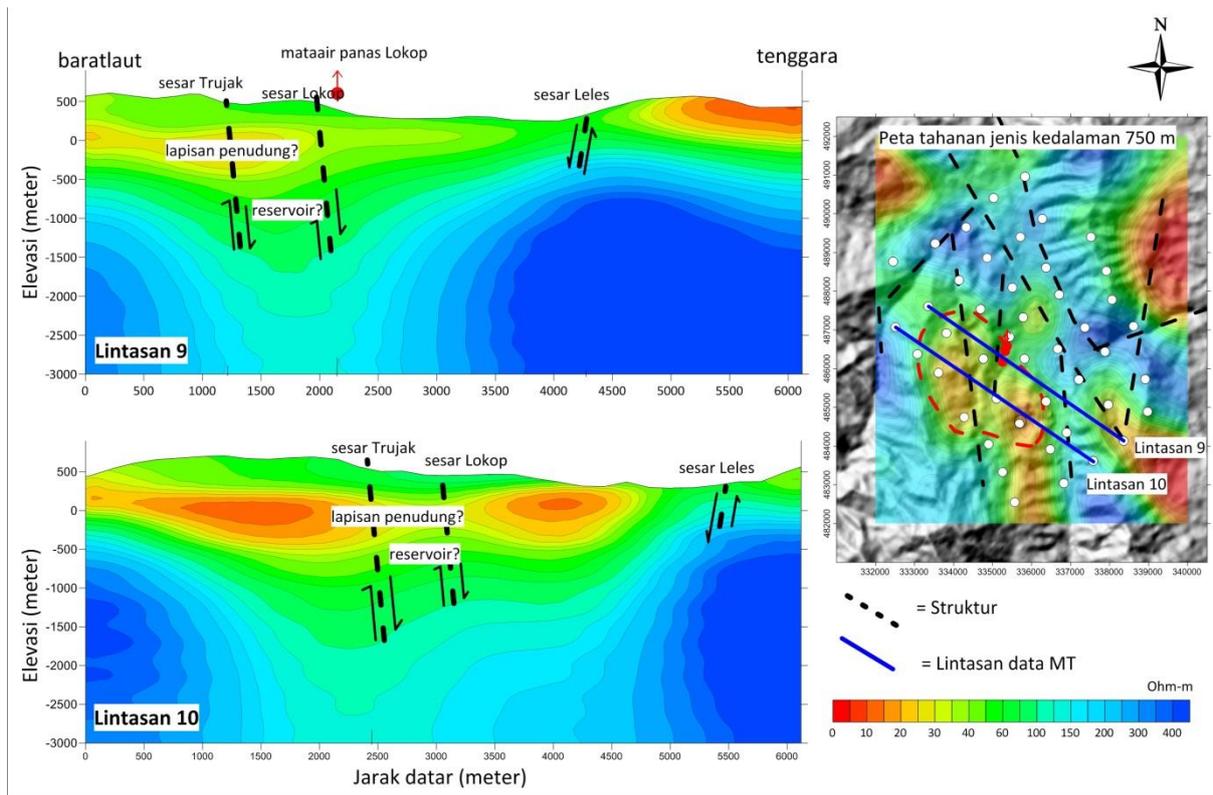
Pemodelan inversi 1-D dapat mengkarakterisasi tahanan jenis lapisan penudung panas bumi, namun tidak dapat menentukan zona batas bawah lapisan penudungnya. Peta tahanan jenis hasil inversi 1-D lebih efektif untuk menilai kualitas masing-masing stasiun data untuk elevasi di atas dasar lapisan penudung, disamping itu hasil inversi 1-D secara umum dapat diandalkan dalam memberikan kemungkinan distorsi data MT. Pemodelan 2-D tidak akan bekerja dengan baik jika kondisi geologi tidak kompleks di daerah penyelidikan. Pemodelan inversi 3-D dapat menentukan batas bawah zona lapisan penudung, dengan demikian kedalaman efektif inversi 3-D tidak dibatasi oleh asumsi geometris sebagaimana yang terjadi pada inversi 1-D dan 2-D. Akibat keberadaan struktur yang kompleks di daerah panas bumi Lokop, inversi 2-D tidak menghasilkan model yang ideal, sedangkan hasil model 1-D dapat mendukung pemodelan inversi 3-D terhadap keberadaan zona menarik dan mengetahui distorsi data MT.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi atas pemberian izin untuk penulisan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Bidang Panas Bumi dan rekan-rekan di Bidang Panas Bumi.



Gambar 8. Peta tahanan jenis hasil pemodelan 3-D kedalaman 500, 750, 1.000, dan 1.250 meter



Gambar 9. Penampang tahanan jenis hasil interpretasi pemodelan inversi 3-D Lintasan 9 dan 10

DAFTAR PUSTAKA

Anderson, E., Crosby, D., dan Ussher, G., 2000, *BULL-EYE! – Simple Resistivity Imaging to Reliably Locate the Geothermal Reservoir*, *Proceeding World Geothermal Congress 2000*, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28 – June 10, 2000

Cagniard, L., 1953, *Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting*: *Geophysics*, 18, 605-635.

Cumming, W., dan Mackie, R., 2010, *Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D, and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History*, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.

Johnston, J.M., Pellerin, L., dan Hohmann, G. W., 1992, *Evaluation of Electromagnetic Methods for Geothermal Reservoir Detection*, *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol 16, October 1992.

Keller, G. V., dan Frischknecht, F. C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*, Pergamon Press Ltd., Oxford, 527 pp.

Larsen, J. C., 1975, *Low frequency (0.1-6.0 cpd) electromagnetic study of the deep mantle electrical conductivity beneath the Hawaiian Island*: *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 43, 17-46.

Miensopust, M.P., Queralt, P., dan Jones, A.G., 2013, *Magnetotelluric 3-D Inversion - a Review of Two Successful Workshops on Forward and Inversion Code Testing and Comparison*, *Geophys. J. Int.* (2013) 193, 1216 - 1238, *Advance Access Publication 2013 March 13*.

- Petrick, W. R., Pelton, W. H., dan Ward, S. H., 1977, *Ridge regression inversion applied to crustal resistivity sounding data from South Africa: Geophysics*, 42, 995-1005.
- Robertson, K., Thiel, S., dan Meqbel, N., 2020, *Quality over quantity : workfloe and model space exploration of 3D inversion of MT data, Earth, Planet and Space (2020) 72:2.*
- Rooney, D., dan Hutton, V. R., 1977, *A magnetotelluric and magneto-variational study of the Gregory Rift Valley, Kenya: Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 51, 91-119.
- Simpson, F., dan Bahr, K., 2005, *Practical Magnetotellurics, Georg - August - Universitat, Gottingen, Cambridge University Press*
- Siripunvaraporn, W., Egbert, G., Lenbury, Y., dan Uyeshima, M., 2005, *Three-dimensional magnetotelluric inversion: data-space method, Physics of the Earth and Planetary Interiors 150 (2005) 3-14.*
- Stanley, W. D., Boehl, J. E., Bostick, F. X., Jr., dan Smith, H. W., 1977, *Geothermal significance of magnetotelluric soundings in the Snake River Plain - Yellowstone region : J. Geophys. Res.*, 82, 2501-2514.
- Swift, C. M., 1967, *A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States: Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 211 p.*
- Tietze, K., dan Ritter, O., 2013, *3D Magnetotelluric Inversion in Praticce - The electrical Conductivity Structure of the San Andreas Fault in Central California.*
- Uchida, T., 2005, *Three-Dimensional Magnetotelluric Investigation in Geothermal Fields in Japan and Indonesia, Proceedings World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.*
- Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006, *Stable 3D Inversion of MT data and its application to geothermal exploration, Exploration Geophysics (2006) 37, 223-230.*
- Vozoff, K., 1972, *The magnetotelluric metho in the exploration of sedimentary basins: Geophysics*, 37, 98-141.
- Wannamaker, P. E., 1983, *Resistivity structure of the Northern Basin and Range, in The role of heat in the development of energy and mineral resources in the Northern Basin and Range Province : Geothermal Resources Council, Special Rep.*, 13, 345-362.
- Wannamaker, P. E., Hohmann, G. W., dan Ward, S. T., 1984, *Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths, Geophysics, Vol 49, No 9 (September 1984); P. 1517-1533, 21 Figs.*
- Word, D. R., Smith, H. W., dan Bostick, F. X., Jr., 1970, *An investigation of the magnetotelluric tensor impedance method: Elec. Geophys. Res. Lab. Report 82, Elec. center, Univ. of Texas at Austin, 264 p.*

Diterima	: 7 Desember 2020
Direvisi	: 21 Januari 2021
Disetujui	: 6 April 2021

KARAKTERISTIK *CLEAT* TERHADAP PERMEABILITAS DAN KANDUNGAN GAS PADA BATUBARA ANGGOTA M3 FORMASI MUARAENIM DI DAERAH MANGUNJAYA, PROVINSI SUMATRA SELATAN

CLEAT CHARACTERIZATION ON PERMEABILITY AND GAS CONTENT IN M3 MEMBERS OF MUARAENIM FORMATION AT MANGUNJAYA AREA, SOUTH SUMATRA PROVINCE

Muhammad Abdurachman Ibrahim¹ dan Tito Harianto²

¹Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

²Universitas Padjajaran

abdurachman.ibrahim@esdm.go.id

ABSTRAK

Cekungan Sumatra Selatan merupakan cekungan batubara dengan sumber daya batubara terbesar kedua di Indonesia. Hal ini membuka peluang untuk dapat memanfaatkannya, salah satunya yaitu melakukan eksplorasi gas metana batubara. Kandungan gas dan nilai permeabilitas sangat memengaruhi potensi gas metana batubara pada suatu wilayah. Permeabilitas batubara sangat dikontrol oleh sistem *cleat* yang berkembang pada lapisan batubara tersebut. Studi mengenai karakteristik *cleat* pada batubara sangat diperlukan untuk melihat kemungkinan jalur keluarnya gas metana dalam batubara. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakteristik batubara, sistem *cleat* yang berkembang, dan pendekatan nilai permeabilitasnya. Anggota M3 Formasi Muaraenim diambil sampel batubaranya untuk dilakukan analisis *microcleat*. Anggota M3 ini merupakan lapisan batubara yang tidak dalam, memiliki ketebalan yang cukup baik, dan merupakan target selain anggota M2 yang telah terbukti mempunyai potensi gas metana batubara. Analisis *microcleat* dilakukan untuk mengamati *face cleat*, *butt cleat*, *aperture*, dan spasi. Korelasi hasil perhitungan permeabilitas terhadap kandungan gas dan kedalaman lapisan batubara memberikan gambaran bahwa dengan semakin besar nilai permeabilitas, maka semakin besar kandungannya.

Kata kunci: gas metana batubara, *cleat*, permeabilitas, kandungan gas

ABSTRACT

South Sumatra Basin is the second largest resource of coal basin in Indonesia. The abundance of coal in this basin has opened up opportunities to exploring coal bed methane. Gas content and permeability affect the potential of coal bed methane in an area. Coal permeability is highly controlled by the cleat system that develops in the coal seam. Studies on cleat characterization in coal are mandatory to see the possible escape routes of methane gas in coal. This research was conducted to determine the relationship between the characteristics of coal, cleat system, and permeability. Coals from M3 of Muaraenim Formation were sampled for microcleat analysis. Coals from M3 is not to deep, having a good coal thickness, and one of the coal bed methane seams target, M3 members can be another coal bed methane target, besides M2 members which have proved to be coal bed methane target. Microcleat analysis was performed to observe face cleat, butt cleat, aperture and spacing. The correlation between permeability to gas content and depth of coal, illustrates that the greater permeability, the greater gas content.

Keywords: coal bed methane, *cleat*, permeability, gas content

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki sumber daya batubara yang cukup signifikan, tetapi batubara yang terdapat pada kedalaman >100 m masih banyak yang belum terungkap. Batubara bawah permukaan memiliki banyak potensi yang dapat dikembangkan, di antaranya tambang dalam (*underground mining*), mengubahnya menjadi gas melalui *underground coal gasification* dan diekstraksi kandungan gas metananya.

Cekungan Sumatra Selatan merupakan cekungan batubara dengan sumber daya batubara terbesar kedua di Indonesia. Sumber dayanya sebesar 51 miliar ton dan cadangannya sebesar 12 miliar ton. Sebagian besar batubara di cekungan ini termasuk batubara peringkat rendah hingga sedang (<6.100 kal/gr, adb) (PSDMBP, 2020). Keterdapatannya batubara yang melimpah ini membuka peluang untuk dapat dimanfaatkan, salah satunya dengan memproduksi gas metana yang ada di batubara secara *in-situ*.

Eksplorasi dan eksploitasi gas metana batubara (GMB) belum dilakukan secara intensif, karena terbatasnya informasi dan studi mengenai gas tersebut. Salah satu aspek yang memengaruhi keekonomian suatu lapangan GMB adalah nilai permeabilitas. Permeabilitas batubara akan sangat dikontrol oleh sistem *cleat* yang berkembang pada lapisan batubara tersebut. Studi mengenai karakteristik *cleat* pada batubara sangat diperlukan untuk melihat kemungkinan jalur keluarnya gas metana dalam batubara. *Cleat* dapat disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu aktivitas tektonik, struktur geologi, dan proses pembatubarannya (Linggadipura, dkk., 2016; Yudha dan Purnama, 2019).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakteristik batubara, sistem *cleat* yang berkembang, dan pendekatan nilai permeabilitasnya.

GEOLOGI REGIONAL

Secara regional, daerah penyelidikan termasuk dalam Cekungan Sumatra Selatan (Gambar 1). Cekungan ini terbentuk pada Pra-Tersier hingga Tersier Awal pada saat fasa ekstensi barat-timur (Darman dan Sidi, 2000).

Stratigrafi Tersier Cekungan Sumatra Selatan dibagi menjadi dua sekuen, yaitu fasa transgresif dan regresif. Kelompok Telisa, yaitu Formasi Gumai atau Telisa masuk dalam fasa transgresif. Kelompok Palembang, yaitu Formasi Airbenakat (Palembang Bawah), Formasi Muaraenim (Palembang Tengah), dan Formasi Kasai (Palembang Atas) masuk dalam fasa regresif (Patra Nusa Data, 2006).

Struktur geologi yang ada merupakan bagian dari fasa tektonik kompresi Plio-Plistosen yang membentuk sesar-sesar dan antiklinorium pada batuan Tersier di Cekungan Sumatra Selatan. Antiklin dan sinklin saling berhubungan dengan arah sumbu lipatan barat laut-tenggara. Jurus perlapisan batuan secara regional berarah barat laut-tenggara dan timurlaut-baratdaya, dengan kemiringan lapisan batuan mengikuti sayap lipatan. Sesar regional berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya (Patra Nusa Data, 2006).

Formasi Muaraenim sebagai formasi pembawa batubara mempunyai penyebaran cukup luas di daerah penelitian. Mengacu pada penyelidikan Shell (1978), dalam Ilyas dkk. (2000), formasi ini dibagi menjadi empat anggota. Urutan anggota dari tua ke muda, yaitu Anggota M1, M2, M3, dan M4. Setiap anggota memiliki lapisan batubara utama dengan ciri khas masing-masing lapisan (Tabel 1).

Anggota M1 mempunyai lapisan batubara utama, yaitu Lapisan Kladi dan Lapisan Merapi. Anggota M1 disusun oleh sedimen

klastik halus yang terdiri dari batupasir, batulempung, batulanau, dan sisipan lapisan batubara tipis tidak menerus (Ilyas dkk., 2000).

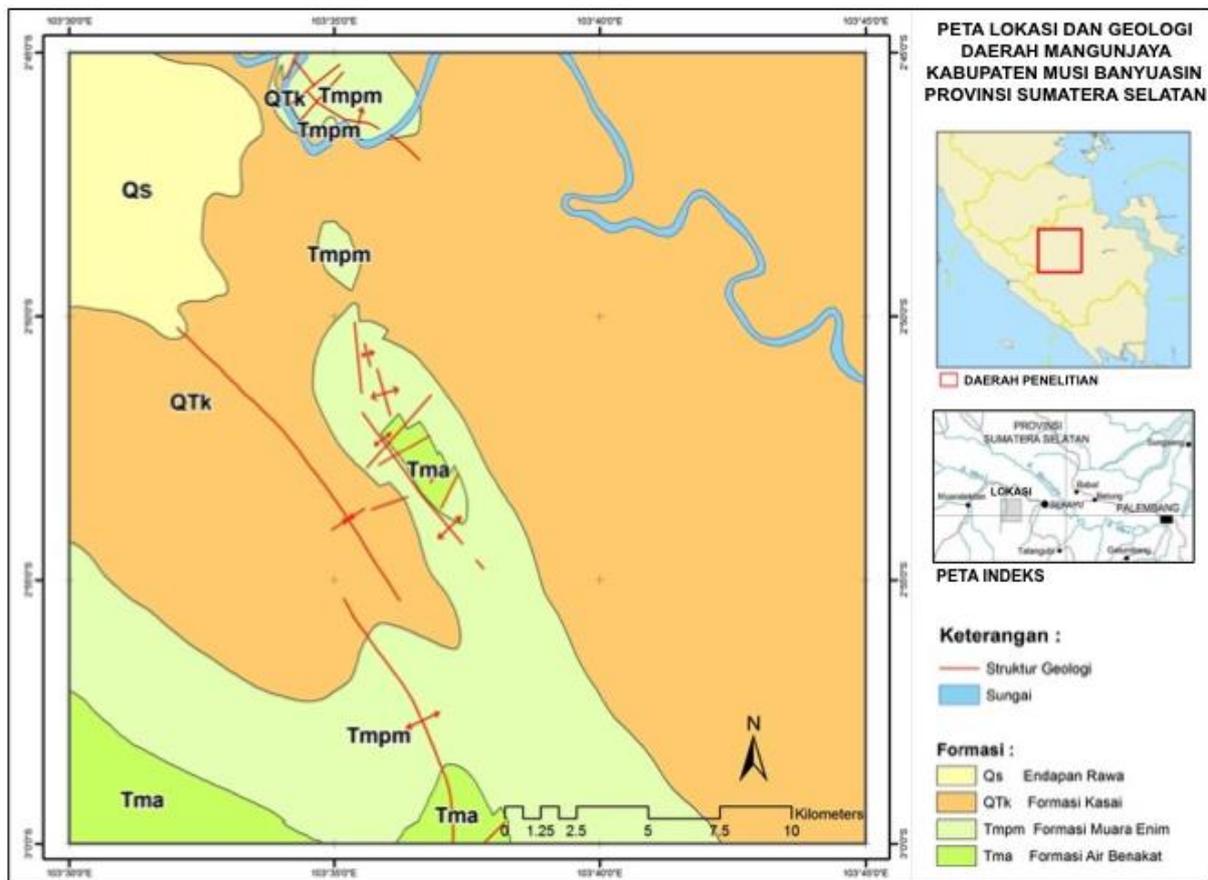
Anggota M2 mempunyai lapisan batubara utama, yaitu Lapisan Petai, Lapisan Suban/Pengadang, dan Lapisan Mangus. Anggota M2 disusun oleh perselingan batulanau dengan batulempung dan sisipan batupasir dan batubara (Ilyas dkk., 2000).

Anggota M3 mempunyai lapisan batubara utama, yaitu Lapisan Burung dan Lapisan Benuang. Anggota M3 disusun oleh batupasir dan sedikit perselingan batulanau dengan batulempung serta

beberapa lapisan batubara (Ilyas dkk., 2000).

Anggota M4 mempunyai lapisan batubara utama, yaitu Lapisan Kebon, Lapisan Babat, Lapisan Lematang, dan Lapisan Niru. Anggota M4 disusun oleh perselingan batupasir dan batulempung di bagian bawah, perselingan batulanau, dan batulempung di bagian atas serta beberapa lapisan batubara (Ilyas dkk., 2000).

Formasi Muaraenim di daerah penelitian mempunyai ketebalan antara 400-600 m yang diketahui dari hasil pengeboran minyak bumi dan mempunyai kemiringan relatif kecil, umumnya kurang dari 10° (Ilyas dkk., 2000).



Gambar 1. Peta lokasi dan geologi daerah penelitian (Ibrahim dkk., 2017)

Tabel 1. Stratigrafi daerah Mangunjaya dan sekitarnya (Shell, 1978, dalam Ilyas, dkk., 2000)

UMUR		FORMASI & ANGGOTA		CEKUNGAN SUMATERA SELATAN (Shell Mijnbouw, 1978)	
				PEMERIAN LITOLOGI	LAPISAN BB
PLIOSEN		KASAI		Batulempung, biru-hijau, batupasir hijau glaukonitan, batu apung, lensa batubara	
M I O S E N	A T A S	M	M4	Batulempung tufaan, hijau kebiruan, lempung pasiran, pasir halus-kasar, abu-abu – putih, sedikit glaukonit tebal 120 – 200 m, mengandung lapisan batubara Niru, Lematang, Babat dan Kebon	■ Niru ■ Lematang ■ Babat ■ Kebon
		R	M3	Perselingan batupasir dan batulanau, biru-hijau, batulempung abu-abu, hijau dan coklat, horizon pasir 3 – 6 m terletak 40 m diatas lapisan batubara Mangus dan terdapat kantong-kantong gas. Tebal 100 – 280 m mengandung lapisan batubara Benuang dan Burung	■ Benuang ■ Burung
		E	M2	Batulempung dan batulempung pasiran, coklat-abu-abu, batupasir halus – sedang, abu-abu coklat, bagian bawah berwarna hijau abu-abu, tebal 40 – 120 m mengandung lapisan batubara Mangus, Suban/Pengadang, dan Petai	■ Mangus ■ Suban/Pengadang ■ Petai
		I	M1	Batupasir, batulanau dan batulempung, abu-abu kecoklatan dan sedikit glaukonitan, tebal 100 – 250 m mengandung lapisan batubara Merapi dan Kladi	■ Merapi ■ Kladi
	N	T E N G A H	AIR BENAKAT		Batulempung dan serpih pasiran, abu-abu kecoklatan dan abu-abu kebiruan, sebagian napalan, batupasir halus, abu-abu kehijauan, glaukonitan.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisis *microcleat* dengan mikroskop petrografi batuan terhadap sampel batubara dari lapisan I, J (Lapisan Benuang), dan K (Lapisan Burung), yaitu anggota M3 Formasi Muaraenim.

Analisis *microcleat* digunakan untuk melihat *face cleat*, *butt cleat*, mengukur spasi, dan mengukur *aperture* untuk menghitung pendekatan permeabilitas. Rumus perhitungan pendekatan permeabilitas berdasarkan sistem *cleat* menggunakan rumus dari Harpalani dan Chen (1995) dalam Suarez-Ruiz dan Crelling (2008) yang diadopsi untuk digunakan pada lapisan batubara. Rumus tersebut sebagai berikut:

$$k = b^3/12s$$

- dengan k = permeabilitas (mD)
- b = lebar rekahan/*aperture* (mm)
- s = *spacing* (mm)

Analisis laboratorium seperti peringkat batubara, proksimat, petrografi organik, kandungan gas, dan komposisi gas mengacu pada laporan batubara daerah Mangunjaya PSDMBP (2017).

Analisis data dilakukan dengan cara menghubungkan semua data yang ada menggunakan korelasi regresi, kemudian diambil kesimpulan melihat faktor-faktor yang ada.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Lapisan Batubara

Data batubara pada penelitian ini didapatkan dari hasil pengeboran pada titik MJ02 yang telah dilakukan oleh PSDMBP pada tahun 2017 di daerah Mangunjaya. Bor MJ02 memiliki total kedalaman 485 m, menembus 11 lapisan batubara, dengan ketebalan bervariasi antara 0,36 s.d.14,35 m. Lapisan batubara diberikan notasi E, F, G, I, J, K, L, M, N, O, dan P. Lapisan batubara disetarakan dengan Anggota M4, yaitu Lapisan Kebon (Lapisan E), Anggota

M3 yaitu Lapisan Benuang (Lapisan J) dan Burung (Lapisan K), serta Anggota M2 yaitu Lapisan Mangus (Lapisan O) dan Suban (Lapisan P), sedangkan Lapisan F, G, I, L, M, N merupakan lapisan gantung atau bukan merupakan lapisan utama, seperti terlihat pada Tabel 2.

Batubara di daerah penelitian secara megaskopis mempunyai warna hitam kecoklatan, kusam (10% cerah), gores coklat kehitaman, mengotori tangan, terdapat resin dan pirit, masih terlihat sisa tumbuhan, pengotor pada beberapa bagian berupa batubara lempungan dan batupasir kasar, pecahan subkonkoidal, *cleat* kadang terlihat, keras, rapuh, batas kontak dengan lapisan batuan lainnya gradasi hingga tegas (Ibrahim dkk., 2017).

Penelitian ini mengambil sampel batubara untuk dilakukan analisis *microcleat* pada lapisan I, J, dan K. Lapisan-lapisan batubara ini merupakan Anggota M3 Formasi Muaraenim. Anggota M3 merupakan lapisan batubara yang cukup tebal, dengan kedalaman lapisan batubara yang belum dalam, serta peringkat batubara sedang (5.100-6.100 kal/gr, adb). Anggota M3 ini dapat menjadi target batubara selain anggota M2 yang telah terbukti mempunyai potensi gas metana batubara.

Batubara Lapisan I pada lubang bor MJ02 berada pada kedalaman 79,30-81,18 meter dengan ketebalan 1,88 meter. Secara megaskopis berwarna hitam kecoklatan, masih terdapat sisa tumbuhan, dan berlapis. Kontak tajam planar dengan batulempung di bagian atasnya dan tajam tak beraturan dengan batupasir halus di bagian bawah (Ibrahim dkk., 2017).

Batubara Lapisan J/Benuang pada lubang bor MJ02 berada pada kedalaman 93,00-99,25 meter dengan ketebalan 6,25 meter. Lapisan batubara ini berwarna hitam kecoklatan, masih terdapat sisa tumbuhan, dan berlapis. Kontak tajam planar dengan batulempung di bagian atasnya dan tajam tak beraturan dengan batupasir halus dibagian bawah (Ibrahim dkk., 2017).

Batubara Lapisan K/Burung pada lubang bor MJ02 berada pada kedalaman 117,65-123,33 meter dengan ketebalan 5,68 meter. Pengotor pada lapisan batubara ini hanya resin dengan nodul batupasir, terdapat sisa tumbuhan, berlapis, kontak atas gradasi tak beraturan dengan batulanau, dan kontak bawah tegas planar dengan batupasir sangat halus hingga halus (Ibrahim dkk., 2017).

Tabel 2. Kedalaman lapisan batubara dari bor MJ02 (Ibrahim dkk., 2017)

Kedalaman Batubara MJ02			
Atap Lapisan (m)	Dasar Lapisan (m)	Tebal (m)	Lapisan Batubara
9,20	23,55	14,35	E / Kebon
27,07	29,33	2,26	F
44,50	45,45	0,95	G
79,30	81,18	1,88	I
93,00	99,25	6,25	J / Benuang
117,65	123,33	5,68	K / Burung
152,16	152,52	0,36	L1
153,25	153,90	0,65	L2
182,45	182,85	0,40	M
228,16	228,96	0,80	N
260,46	271,10	10,64	O / Mangus
281,30	282,80	1,50	P / Suban

Hasil analisis proksimat dan nilai kalori batubara dari Lapisan I, J, dan K (Tabel 3), yaitu kandungan karbon tertambat (*Fixed Carbon / FC*) antara 37,25-42,25% (adb), kandungan air (*Moisture / M*) antara 9,78-12,03% (adb), zat terbang (*Volatile Matter / VM*) antara 43,16-48,66% (adb), kandungan abu (*Ash*) antara 2,85-4,43% (adb), dan berat jenis antara 1,38-1,46. Nilai kalori batubara antara 5.561-5.952 kal/gram (adb) atau 6.596-6.908 kal/gram (daf). Rata-rata nilai kalori Lapisan I, J, dan K yaitu 5.868 kal/gram (adb), 5.774 kal/gram (adb), dan 5.735 kal/gram (adb).

Hasil analisis petrografi organik (Tabel 3) memiliki nilai reflektansi vitrinit antara 0,24-0,32%. Komposisi maseral didominasi oleh vitrinit antara 58,4-92,6%, inertinit antara 1,8-33,6%, dan liptinit antara 0,8-13,2%. Material mineral yang ditemukan berupa lempung antara 0,8-7,6%, oksida besi pada beberapa sampel sebesar 0,2%, dan pirit antara 0,4-2,4%. Rata-rata reflektansi vitrinit Lapisan I, J, dan K yaitu 0,27%, 0,27%, dan 0,28%. Berdasarkan ASTM (1992), dilihat dari nilai reflektansi vitrinit, maka batubara Lapisan I, J, dan K termasuk dalam batubara peringkat lignit.

Menurut Sosrowidjojo (2013), *reservoir* lapisan batubara di Muaraenim yang mempunyai potensi GMB memiliki maseral vitrinit antara 58,9-83%, reflektansi vitrinit antara 0,3-0,5%, kandungan karbon tertambat (FC) antara 18,4-48,4% (adb), kandungan air (M) antara 12,4-24,5% (adb), zat terbang (VM) antara 29,1-53,97% (adb), kandungan abu (*ash*) antara 5,6-19,8% (adb), dan berat jenis antara 1,3-1,5. Berdasarkan nilai-nilai properti batubara untuk GMB tersebut, lapisan batubara I, J, dan K pada penelitian ini masih berada pada rentang tersebut, sehingga menjanjikan untuk menjadi *reservoir* GMB.

Potensi GMB

Analisis kandungan gas dalam batubara dilakukan dengan metode desorpsi menggunakan kanister, sementara analisis komposisi gas dilakukan menggunakan alat gas kromatografi yang diuji pada saat kegiatan lapangan. Hasil analisis komposisi gas menunjukkan prosentase gas metana dan gas lainnya seperti hidrogen, oksigen, nitrogen, dan karbondioksida.

Kandungan gas total dalam batubara rata-rata dari Lapisan I sebesar 2,1025 scf/ton, Lapisan J sebesar 4,9462 scf/ton, dan Lapisan K sebesar 8,5177 scf/ton. Prosentase gas metana rata-rata Lapisan I sebesar 11,85%, Lapisan J sebesar 23,22%, dan Lapisan K sebesar 47,22%. Kandungan gas metana rata-rata dari Lapisan I sebesar 0,2485 scf/ton, Lapisan J sebesar 1,1617 scf/ton, dan Lapisan K sebesar 3,9999 scf/ton. Kandungan gas dalam batubara meningkat dengan semakin dalamnya lapisan batubara. Prosentase gas metana juga meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman lapisan batubara (Tabel 4).

Berdasarkan hasil eksplorasi GMB oleh badan usaha di Cekungan Sumatra Selatan yang dikumpulkan Divisi Perencanaan Eksplorasi (2016), lapisan batubara anggota M3 Formasi Muaraenim memiliki ketebalan antara 2-12 m, dengan kandungan gas antara 12-76 scf/ton, pada kedalaman >300 m (Tabel 5). Apabila kandungan gas dan komposisi gas metana semakin meningkat dengan diiringi bertambahnya kedalaman lapisan batubara, maka diinterpretasikan lapisan batubara I, J, dan K pada penelitian ini, dengan kedalaman >300 m, akan memiliki kandungan gas yang sesuai pada rentang tersebut, sehingga mempunyai potensi GMB.

Tabel 3. Hasil analisis proksimat dan petrografi organik (Ibrahim dkk., 2017)

Sampel	M	VM	FC	Ash	SG / RD		Kalori	Rata-rata kalori	% Rv	Komp, Maseral (%)			Material Mineral (%)		Rata-rata % Rv
					% (adb)	(adb)				V	I	L	Lempung	Oksida Besi	
I - 18	10,43	47,73	38,7	3,14	1,38	5840	5868	0,27	63,2	24,6	8,2	2	-	-	2,0
I - 19	10,16	48,66	37,25	3,93	1,44	5896		0,27	66,6	15,8	13,2	3,2	3,2	0,2	0,2
J - 20	11,71	43,53	40,78	3,98	1,46	5561	5774	0,26	92,6	1,8	2,8	1,4	0,2	0,2	1,2
J - 21	9,78	47,07	38,81	4,34	1,42	5817		0,24	61,0	29,4	3,2	5,6	-	-	0,8
J - 23	11,53	46,06	39,02	3,39	1,44	5678	5735	0,24	74,0	18,2	2,8	3,0	0,2	0,2	1,8
J - 22	10,49	47,64	38,6	3,27	1,45	5860		0,31	58,4	33,6	0,8	5,4	-	-	1,8
J - 24	10,63	48,46	37,7	3,21	1,41	5952	5774	0,29	64,0	28,8	3,0	3,0	-	-	1,0
K - 25	11,70	44,96	39,06	4,28	1,44	5637		0,32	81,0	8,1	0,8	7,6	-	-	2,4
K - 26	11,04	46,56	38,96	3,44	1,41	5828	5735	0,26	72,2	9,6	2,0	4,6	-	-	1,6
K - 27	11,39	44,39	41,20	3,02	1,43	5805		0,29	68,8	25,2	4,0	0,8	-	-	1,2
K - 28	11,36	43,54	42,25	2,85	1,46	5728	5774	0,28	74,2	22,0	1,0	2,4	-	-	0,4
K - 29	12,03	43,16	41,38	4,43	1,38	5677		0,27	76,4	11,0	8,6	3,6	-	-	0,4

Tabel 4. Hasil kandungan dan komposisi gas dalam batubara (Ibrahim dkk., 2017)

Sampel	Kedalaman (m)	Q1	Q2	Q3	Qtotal	Gas (scf/ton)	Rata-rata Gas (scf/ton)	CH ₄ rata-rata (%)	Rata-rata CH ₄ (%)	Gas metana (scf/ton)	Rata-rata Gas metana (scf/ton)
		(ml)	(ml)	(ml)	(ml)						
I - 18	79,85 - 80,40	0,00	104,00	0,00	104,00	1,95	2,10	12,33	11,86	0,24	0,25
I - 19	80,55 - 81,10	0,00	112,00	0,00	112,00	2,25		11,38		0,26	
J - 20	93,60 - 94,15	21,00	143,00	0,00	164,00	3,51	4,95	15,10	23,22	0,53	1,16
J - 21	94,58 - 94,13	50,80	274,00	0,00	324,80	5,83		14,54		0,85	
J - 23	96,10 - 96,65	35,70	230,50	0,00	266,20	4,57	4,95	31,61	47,23	1,44	3,99
J - 22	97,80 - 98,35	38,80	239,00	0,00	277,80	4,82		25,88		1,25	
J - 24	98,50 - 99,00	17,00	285,00	0,00	302,00	6,01	8,52	28,97	47,23	1,74	3,99
K - 25	117,60 - 118,16	70,90	428,00	0,00	498,90	9,14		42,97		3,93	
K - 26	118,75 - 119,30	72,10	468,30	0,00	540,40	9,92	8,52	46,13	47,23	4,58	3,99
K - 27	120,00 - 120,56	32,99	384,50	0,00	417,49	7,72		53,82		4,16	
K - 28	120,95 - 121,50	26,70	383,00	0,00	409,70	7,55	8,52	50,34	47,23	3,80	3,99
K - 29	122,75 - 123,31	27,70	427,00	0,00	454,70	8,25		42,88		3,54	

Tabel 5. Hasil Eksplorasi GMB di Cekungan Sumatra Selatan (Divisi Perencanaan Eksplorasi, 2016)

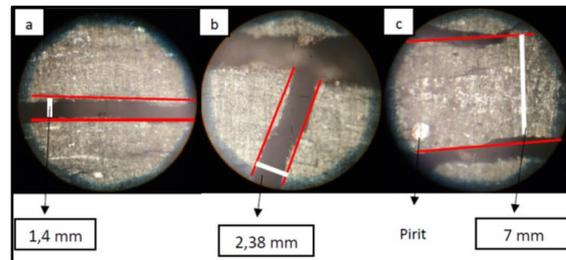
BASIN	AREA	WORKING AREA	DEPTH TARGET	FORMATION/ZONE	SEAMS	GAS CONTENT (Scf/ton)	PERMEABILITY (mD)	PRODUCTION TEST (gas)	
					THICKNESS (m)				
South Sumatera	Muara Enim	ME	450 - 650 m	Muara Enim	M4	x	15 - 46 Scf/Ton	48 - 90 mD	11 - 120 Mscfd
		ME I			M3	2 - 6 m	12 - 76 Scf/Ton	92 mD	
		ME II			M2	6 - 23 m	55 - 199 Scf/Ton	7 - 16 mD	
		ME III			M1	1 - 3 m	103 Scf/Ton	x	
	Suban	Suban I	400 - 550 m	Muara Enim	M4	5 - 18 m	18 - 22 Scf/Ton	38 - 52 mD	x
		Suban II			M3	x	60 - 74 Scf/Ton	x	
					M2	6 - 7 m	80 - 120 Scf/Ton	x	
					M1	x	x	x	
	Tanjung Enim	Tanjung Enim	350 - 500 m	Muara Enim	M4	x	x	x	0.03 Mscfd
					M3	x	x	x	
					M2	4 - 8 m	107 - 122 Scf/Ton	x	
					M1	x	x	x	
	Ogan Komeriing	Ogan Komeriing I	400 - 550 m	Muara Enim	M4	0.9 m	35 Scf/Ton	x	10 Mscfd
		Ogan Komeriing II			M3	2 - 12 m	22 - 65 Scf/Ton	x	
					M2	2 - 14 m	33 - 89 Scf/Ton	10 - 35 mD	
					M1	x	x	x	
	Air Benakat	Air Benakat I	300 - 400 m	Muara Enim	M4	3 - 9.9 m	28 - 82 Scf/Ton	13 - 27 mD	x
		Air Benakat II			M3	2 - 8 m	x	x	
		Air Benakat III			M2	2.5 - 10 m	38 - 108 Scf/Ton	2 - 2.5 mD	
					M1	x	x	x	

Analisis Microcleat

Karakteristik *cleat* (rekahan batubara) dapat dilihat melalui pengamatan terhadap jenis *cleat*, jarak antar-*cleat* (spasi), lebar bukaan (*aperture*), pengisi, panjang, orientasi bidang *cleat*, dan derajat fragmentasi *cleat*. Terdapat dua *cleat* dalam batubara, yaitu *face cleat* yang merupakan *cleat* utama, biasanya tidak terpotong oleh bidang *cleat* lainnya, dan *butt cleat* yang merupakan bidang *cleat* lainnya, biasanya tegak lurus terhadap bidang *face cleat* dan terpotong oleh adanya *face cleat*. Analisis *microcleat* dilakukan di bawah mikroskop untuk melihat spasi *cleat*, *aperture*, pengisi, dan panjang *cleat*, terhadap delapan sampel batubara lapisan I, J, dan K.

Sampel I19 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 80,55-81,10 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel I19 memperlihatkan *cleat* yang banyak dan memiliki rekahan yang jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. Batubara ini memiliki bukaan (*aperture*) yang sedang dan tidak terisi mineral. Selain itu terdapat juga bukaan yang sempit pada beberapa tempat, khususnya pada *butt cleat*. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Terdapat mineral

pirit pada sampel yang ditemukan pada bagian luar bukaan. Pengukuran *aperture* pada sampel ini menghasilkan 45 pengukuran *face cleat*, 25 pengukuran *butt cleat*, dan 18 pengukuran spasi (Gambar 2).



Gambar 2. Analisis *microcleat* sampel I19. a). *face cleat* b). *butt cleat* c). spasi

Sampel J21 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 94,13-94,58 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel J21 memperlihatkan rekahan yang banyak dan jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. Memiliki variasi bukaan dari yang lebar hingga menyempit pada *face cleat*, serta di beberapa tempat terisi mineral. Pada *butt cleat* bukaan sedang hingga sempit. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Terdapat oksidasi pada sampel yang ditemukan pada bagian luar bukaan. Pengukuran *aperture* pada

sampel ini menghasilkan 42 pengukuran *face cleat*, 24 pengukuran *butt cleat*, dan 17 pengukuran spasi.

Sampel J23 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 96,10-96,65 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel J23 memperlihatkan rekahan yang banyak tetapi kurang jelas, sehingga sulit untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. Memiliki bukaan yang lebar, akan tetapi kebanyakan terisi mineral pada *face cleat*. Pada *butt cleat* bukaan sedang hingga sempit. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Terdapat sklerotinit dari jamur menunjukkan lingkungan oksidasi dan lembab, ditemukan pada bagian luar bukaan, serta banyak ditemukan mineral pada *aperture*. Pengukuran *aperture* pada sampel ini menghasilkan 42 pengukuran *face cleat*, 20 pengukuran *butt cleat*, dan 16 pengukuran spasi.

Sampel J24 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 98,50-99,00 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel J24 memperlihatkan rekahan yang banyak, di beberapa tempat memiliki rekahan yang hancur, sehingga sulit membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. Pada beberapa tempat memiliki bukaan yang lebar dan masih terdapat mineral pirit serta proses oksidasi. Selain itu terdapat bukaan yang sempit dan tidak menerus, sehingga kemenerusan *cleat* terputus. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Pengukuran *aperture* pada sampel ini menghasilkan 47 pengukuran *face cleat*, 16 pengukuran *butt cleat*, dan 15 pengukuran spasi.

Sampel K25 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 117,60-118,16 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel K25 memperlihatkan rekahan yang banyak dan jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. *Face cleat* memiliki bukaan yang lebar hingga sempit, pada beberapa tempat terisi mineral. *Butt cleat* memiliki bukaan yang sempit serta kemenerusan patah-patah, sehingga tidak menerus. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Pengukuran *aperture*

pada sampel ini menghasilkan 38 perhitungan *face cleat*, 23 pengukuran *butt cleat*, dan 16 pengukuran spasi.

Sampel K26 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 118,75-119,30 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel K26 memperlihatkan rekahan yang sedikit tetapi cukup jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. *Face cleat* memiliki bukaan yang lebar hingga sempit. *Butt cleat* memiliki bukaan yang lebar, pada beberapa tempat terisi mineral, serta kemenerusan yang patah-patah. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Terdapat mineral pirit pada beberapa tempat di bagian luar *aperture*. Pengukuran *aperture* pada sampel ini menghasilkan 35 perhitungan *face cleat*, 18 pengukuran *butt cleat*, dan 14 pengukuran spasi.

Sampel K27 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 120,00-120,56 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel K27 memperlihatkan rekahan yang sedikit tetapi cukup jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. *Face cleat* memiliki bukaan yang lebar, di sekitar dan bagian dalam *aperture* terdapat beberapa mineral. *Butt cleat* memiliki bukaan yang sedang hingga sempit, beberapa tempat terisi mineral serta kemenerusan patah-patah. Jarak spasi antar-*cleat* lebar. Terdapat mineral pirit di beberapa tempat. Pengukuran *aperture* pada sampel ini menghasilkan 32 perhitungan *face cleat*, 15 pengukuran *butt cleat*, dan 12 pengukuran spasi.

Sampel K28 diperoleh dari lapisan batubara pada kedalaman 120,95-121,50 m. Hasil analisis *microcleat* pada sampel K28 memperlihatkan rekahan yang sedikit tetapi cukup jelas, sehingga mudah untuk membedakan antara *face cleat* dan *butt cleat*. *Face cleat* memiliki bukaan yang cukup jelas. *Butt cleat* memiliki bukaan yang lebar hingga sempit, dengan kemenerusan yang patah-patah. Jarak spasi antar *cleat* lebar. Terdapat proses oksidasi pada beberapa tempat di luar bagian *aperture*. Pengukuran *aperture*

pada sampel ini menghasilkan 40 perhitungan *face cleat*, 20 pengukuran *butt cleat*, dan 14 pengukuran spasi.

Cleat yang bukaannya terisi oleh mineral akan cenderung menghambat gas keluar dibandingkan dengan *cleat* yang bukaannya terbuka. *Cleat* yang terisi ini juga akan mengurangi permeabilitas dari batubara. Hal ini terlihat pada beberapa sampel yang memiliki bukaan terisi mineral, *cleat* cenderung tidak menerus, sehingga dapat mempengaruhi nilai permeabilitas (Linggadipura, dkk., 2016; Yudha dan Purnama, 2019).

Cleat juga dapat terbentuk oleh adanya aktivitas tektonik dan proses pematubaraan. *Cleat* daerah Mangunjaya diinterpretasikan banyak dipengaruhi aktivitas tektonik. Hal ini terlihat oleh pengamatan jarak spasi *cleat* dan *aperture cleat* yang tidak mempunyai hubungan dengan proses pembebanan atau proses pematubaraan. *Cleat* akibat proses endogenik atau bersamaan pematubaraan akan cenderung tegak lurus bidang perlapisan, serta akibat tekanan dan temperatur *cleat* cenderung mengecil. *Cleat* akibat eksogenik atau gaya tektonik akan cenderung memiliki dua pasang *cleat* yang saling membentuk sudut, serta tidak terlalu berpengaruh terhadap tekanan dan temperatur (Linggadipura, dkk., 2016; Yudha dan Purnama, 2019).

Perhitungan Permeabilitas

Perhitungan permeabilitas dengan rumus merupakan metode pendekatan terhadap nilai permeabilitas dari suatu sampel batubara yang dianalisis *microcleat*. Pendekatan permeabilitas ini digunakan untuk membantu dalam menganalisis suatu *reservoir* GMB. Hasil permeabilitas dari rumus mungkin saja akan berbeda dengan hasil nilai permeabilitas dengan metode tes langsung, akan tetapi nilai pendekatan permeabilitas sangat berguna untuk analisis lebih lanjut. Perhitungan permeabilitas menggunakan data dari *face cleat* sebagai rekahan utama dalam batubara.

Sampel I19 memiliki nilai *aperture* 1,0 mm, spasi 3,6 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,02 mD. Sampel J21 memiliki nilai *aperture* 1,6 mm, spasi 4,4 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,08 mD. Sampel J23 memiliki nilai *aperture* 2,0 mm, spasi 6,6 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,10 mD. Sampel J24 memiliki nilai *aperture* 1,2 mm, spasi 3,8 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,04 mD. Sampel K25 memiliki nilai *aperture* 1,6 mm, spasi 3,7 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,09 mD. Sampel K26 memiliki nilai *aperture* 1,8 mm, spasi 2,8 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,17 mD. Sampel K27 memiliki nilai *aperture* 1,6 mm, spasi 5,4 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,06 mD. Sampel K28 memiliki nilai *aperture* 2,4 mm, spasi 3,6 mm, dan pendekatan permeabilitas sebesar 0,32 mD.

Nilai pendekatan permeabilitas terkecil terdapat pada sampel I19 pada kedalaman 81,1 m, sedangkan terbesar terdapat pada sampel K28 pada kedalaman 121,50 m. Rata-rata nilai pendekatan permeabilitas lapisan I, J, dan K, yaitu 0,02 mD, 0,07 mD, dan 0,16 mD. Nilai permeabilitas dalam lapisan batubara meningkat dengan semakin dalamnya lapisan batubara (Tabel 6).

Apabila lapisan batubara I, J, dan K berada pada kedalaman target GMB, yaitu >300 m, maka berdasarkan penelitian semakin dalam lapisan batubara dengan nilai permeabilitas semakin bertambah, anggota M3 Formasi Muaraenim dapat mempunyai potensi GMB. Menurut Sosrowidjojo (2013), potensi *reservoir* GMB di Formasi Muaraenim mempunyai nilai permeabilitas hingga 10 mD, sedangkan menurut hasil eksplorasi GMB oleh badan usaha di Cekungan Sumatra Selatan yang dikumpulkan Divisi Perencanaan Eksplorasi (2016), nilai permeabilitas anggota M3 Formasi Muaraenim dapat mencapai 92 mD.

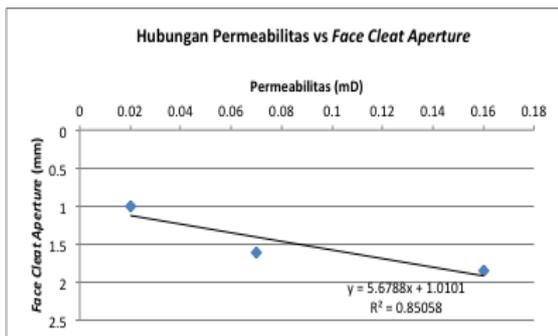
Tabel 6. Hasil Perhitungan Permeabilitas

Sampel	Kedalaman (m)	Face Cleat Aperture (mm)	Face Cleat Spasi (mm)	Pendekatan Permeabilitas (mD)	Rata-rata Pendekatan Permeabilitas (mD)
I - 19	80,55 - 81,10	1,00	3,60	0,02	0,02
J - 21	94,58 - 94,13	1,60	4,40	0,08	
J - 23	96,10 - 96,65	2,00	6,60	0,10	
J - 24	98,50 - 99,00	1,20	3,80	0,04	0,16
K - 25	117,60 - 118,16	1,60	3,70	0,09	
K - 26	118,75 - 119,30	1,80	2,80	0,17	
K - 27	120,00 - 120,56	1,60	5,40	0,06	
K - 28	120,95 - 121,50	2,40	3,60	0,32	

Korelasi Regresi

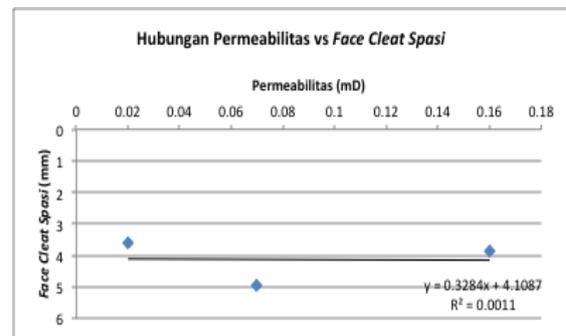
Hasil perhitungan permeabilitas dimasukkan dalam grafik untuk dihubungkan dengan berbagai parameter lainnya. Titik-titik korelasi dalam grafik juga dihubungkan dengan garis regresi linier untuk mendapatkan persamaan dan koefisien regresi. Nilai yang di plot hanya tiga mewakili nilai rata-rata berbagai parameter dari lapisan batubara I, J, dan K.

Keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap *face cleat aperture* berbanding lurus, sehingga semakin besar atau lebar *aperture face cleat* maka nilai permeabilitasnya juga semakin besar (Gambar 3).



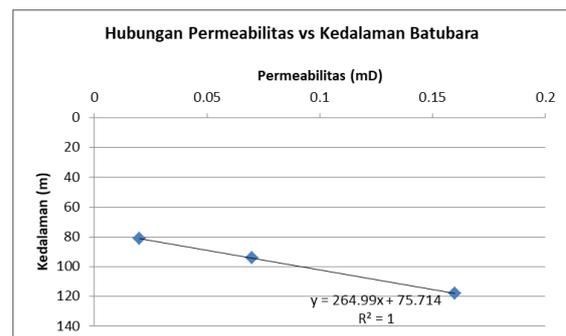
Gambar 3. Grafik permeabilitas terhadap *face cleat aperture*

Keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap *face cleat spasi* tidak saling berhubungan. Dapat diinterpretasikan bahwa pada penelitian ini nilai permeabilitas tidak berpengaruh langsung terhadap spasi *face cleat* (Gambar 4).



Gambar 4. Grafik permeabilitas terhadap *face cleat spasi*

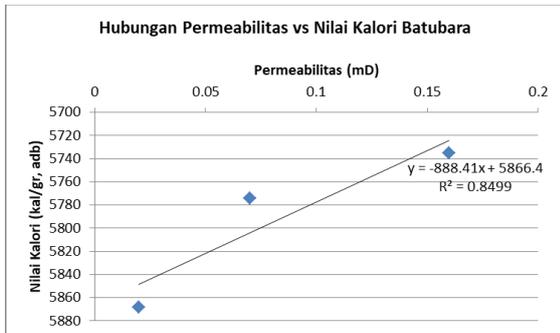
Keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap kedalaman lapisan batubara berbanding lurus, sehingga semakin dalam lapisan batubara maka semakin besar nilai permeabilitasnya (Gambar 5).



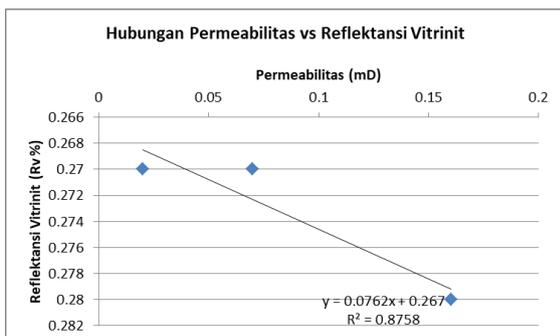
Gambar 5. Grafik permeabilitas terhadap kedalaman lapisan batubara

Keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap nilai kalori batubara berbanding terbalik (Gambar 6), sedangkan keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap reflektansi vitrinit

berbanding lurus (Gambar 7). Nilai kalori batubara meningkat dengan nilai permeabilitas yang semakin mengecil, sedangkan reflektansi vitrinit semakin meningkat diikuti nilai permeabilitas yang semakin besar.

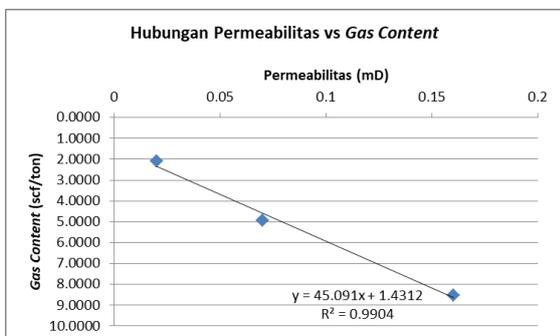


Gambar 6. Grafik permeabilitas terhadap nilai kalori batubara



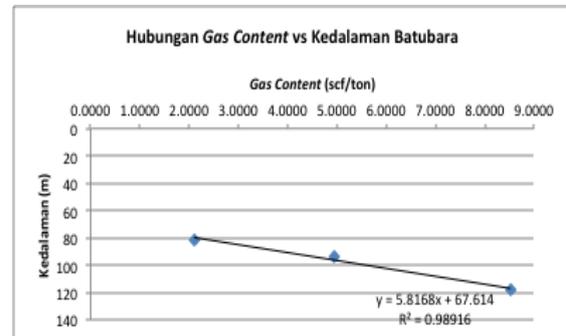
Gambar 7. Grafik permeabilitas terhadap reflektansi vitrinit

Keterkaitan antara pendekatan permeabilitas terhadap kandungan gas berbanding lurus, sehingga semakin besar nilai permeabilitas, maka semakin besar juga nilai kandungan gasnya (Gambar 8).



Gambar 8. Grafik permeabilitas terhadap gas content

Keterkaitan antara kedalaman lapisan batubara terhadap kandungan gas berbanding lurus, sehingga semakin dalam lapisan batubara maka semakin besar kandungan gas (Gambar 9).



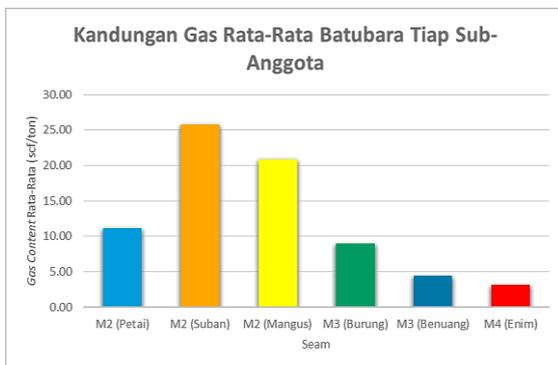
Gambar 9. Grafik kandungan gas terhadap kedalaman lapisan batubara

Grafik korelasi kedalaman terhadap kandungan gas mendapatkan persamaan $y = 5,8168 x + 67,614$, maka apabila dimasukkan nilai ambang batas kandungan gas minimal 10 scf/ton sesuai kriteria lapisan batubara yang berpotensi untuk GMB berdasarkan hasil diskusi dengan Divisi Perencanaan Eksplorasi (2016),, maka diperlukan kedalaman lapisan batubara minimal 125,78 m. Apabila kedalaman lapisan batubara sesuai kriteria potensi gas metana batubara minimal berada pada kedalaman 300 m, dihitung menggunakan persamaan, maka akan didapatkan kandungan gas sebesar 39,95 scf/ton.

Grafik korelasi permeabilitas terhadap kandungan gas mendapatkan persamaan $y = 45,091 x + 1,4312$, maka apabila dimasukkan kandungan gas minimal 10 scf/ton, didapatkan permeabilitas 0,19 mD. Apabila dimasukkan kandungan gas 39,95 scf/ton, dengan harapan mempunyai kedalaman lapisan batubara 300 m, maka diperlukan permeabilitas sebesar 0,85 mD. Dengan demikian, apabila tidak melihat faktor lain, hanya berdasarkan perhitungan, dengan asumsi korelasi kedalaman terhadap kandungan gas, serta korelasi permeabilitas terhadap kandungan gas, maka anggota M3 Formasi

Muaraenim pada daerah Mangunjaya akan mempunyai potensi gas metana batubara yang cukup menjanjikan sesuai kriteria potensi GMB, yaitu kedalaman minimal lapisan batubara 300 m, kandungan gas 39,95 scf/ton, dan diperlukan permeabilitas lapisan batubara sebesar 0,85 mD.

Cekungan Sumatra Selatan saat ini masih merupakan cekungan yang memiliki potensi GMB cukup baik di Indonesia. Berdasarkan hasil rangkuman data oleh Divisi Perencanaan Eksplorasi (2019) dalam paparan mengenai GMB, sebagian besar badan usaha GMB di Cekungan Sumatra Selatan menyasar anggota M2 Formasi Muaraenim. Anggota M2 secara potensi memang lebih menjanjikan dibandingkan dengan anggota lainnya (Gambar 10), akan tetapi dalam penelitian ini memperlihatkan, apabila anggota M3 Formasi Muaraenim mempunyai kedalaman yang cukup untuk GMB, ketebalan batubara yang cukup tebal, serta kondisi *reservoir* GMB dengan permeabilitas yang bagus, maka bukan tidak mungkin anggota M3 akan menjadi target GMB di Cekungan Sumatra Selatan.



Gambar 10. Kandungan gas tiap anggota Formasi Muaraenim (Corinna, 2019)

Menurut Sosrowidjojo, 2013, potensi *reservoir* GMB di Formasi Muaraenim mempunyai nilai permeabilitas hingga 10 mD, *gas content* lebih besar dari 15 scf/ton, kandungan gas metana hingga 90%, tebal lapisan batubara berkisar 10 m, dengan kedalaman antara 400 – 800 m. Berdasarkan data tersebut, maka potensi GMB di Formasi Muaraenim masih cukup

baik, sehingga penelitian dan pembuktian masih sangat dibutuhkan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisis *microcleat*, semakin dalam lapisan batubara, maka *aperture face cleat* semakin lebar. Terlihat dari pengamatan dibawah mikroskop, beberapa mineral seperti pirit, lempung, dan oksida besi mengisi *cleat*.

Lebar *aperture face cleat* memengaruhi nilai permeabilitas. Semakin besar nilai permeabilitas, maka semakin besar kandungan gasnya. Penelitian membuktikan bahwa semakin dalam lapisan batubara, maka semakin besar nilai permeabilitas, dan semakin besar kandungan gasnya. *Cleat* pada daerah penelitian diinterpretasikan di kontrol oleh aktivitas tektonik, *aperture* yang diamati merupakan *aperture* eksogenik yang tidak terpengaruhi oleh pembebanan atau proses pematubaraan. Hal ini dilihat dari hubungan antara peringkat batubara dari nilai kalori batubara dan reflektansi vitinit yang saling tidak berhubungan, serta tidak terkait dengan spasi dan *aperture cleat*. Kedalaman sampel batubara yang masih dangkal juga memengaruhi proses terjadinya *cleat* pada daerah penelitian.

Anggota M3 Formasi Muaraenim mempunyai potensi GMB dengan target kedalaman >300 m sehingga cukup untuk *reservoir* GMB, ketebalan batubara cukup tebal, serta kondisi permeabilitas baik. Penelitian ini memperlihatkan anggota M3 Formasi Muaraenim dapat mempunyai kandungan gas 39,95 scf/ton, pada permeabilitas lapisan batubara sebesar 0,85 mD, dengan kedalaman lapisan batubara 300 m.

Saran

Pengujian permeabilitas secara langsung perlu dilakukan pada lubang bor pada target lapisan batubara, sehingga dapat membandingkan asumsi-asumsi yang ada. Pembuktian kandungan gas dan

permeabilitas pada anggota M3 dari Formasi Muaraenim perlu dilakukan untuk melihat potensi anggota M3 pada kedalaman minimal 300 m.

DAFTAR PUSTAKA

- Bishop, M.G., 2001, *South Sumatra Basin Province, Indonesia: The Lahat/Talang Akar-Cenozoic Total Petroleum System*, United State Geological Survey, Colorado.
- Corinna, A., 2019, *Skripsi : Pengaruh Karakteristik Batubara Terhadap Gas Content pada Formasi Muaraenim di Cekungan Sumatra Selatan*, Universitas Padjajaran, Bandung.
- Darman, H. dan Sidi, F.H., 2000, *An Outline of The Geology of Indonesia*, Ikatan Ahli Geologi Indonesia, Jakarta.
- Divisi Perencanaan Eksplorasi, 2016, *Materi presentasi: Tahapan dan Pencapaian Eksplorasi GMB Indonesia*, SKK Migas, Jakarta.
- Divisi Perencanaan Eksplorasi, 2019, *Materi presentasi: Sumber Daya Migas Unkonvensional (GMB)*, SKK Migas, Jakarta.
- Ibrahim, M.A., Rahmat, S.B., Ulfa, R.M., Priyono, Susana, N., 2017, *Evaluasi Potensi CBM dan Batubara Bawah Permukaan Daerah Mangunjaya dan sekitarnya, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatra Selatan*, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung. Laporan tidak dipublikasikan.
- Ilyas, S., Ibrahim, D., Fatimah, 2000, *Pengkajian Endapan Batubara Bersistem Dalam Cekungan Sumatra Selatan Di Daerah Sekayu – Mangunjaya, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatra Selatan*, Direktorat Sumberdaya Mineral, Bandung. Laporan tidak dipublikasikan.
- Linggadipura, R.D., Prasetyo, M.H., Dimas, E., 2016, *Karakteristik Kuantitatif Cleat Sebagai Indikator Gas Metana Batubara di Kabupaten Bengkulu Utara, Provinsi Bengkulu*, Proceedings Seminar Kebumihan Ke-9, hal. 199-210.
- Patra Nusa Data, 2006, *Indonesia Basin Summaries*, PT Patra Nusa Data, Jakarta.
- PSDMBP, 2020, *Laporan Neraca Sumber Daya Batubara, Gambut, dan GMB*, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung.
- Sosrowidjojo, I.B., 2013, *Coal Geochemistry of The Unconventional Mearaenim Coalbed Reservoir, South Sumatra Basin: A Case Study From The Rambutan Field*, Indonesian Mining Journal, Vol.16, No.2, p. 71-81.
- Suarez-Ruiz, I. dan Crelling, J.C., 2008, *Applied Coal Petrology*, Elsevier, Burlington.
- Yudha, S.S. dan Purnama, A.B., 2019. Identifikasi karakteristik kekar batubara Lapisan Batubara D berbasis pengamatan singkapan, korelasi data log sonic dan kualitas massa batuan (RQD). *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, vol. 15, no. 2, h. 77-88.

Diterima	: 15 Februari 2021
Direvisi	: 22 Februari 2021
Disetujui	: 18 Mei 2021

**KARAKTERISTIK SERPIH MINYAK PADA FORMASI SINAMAR
BERDASARKAN DATA PENGEBORAN BRP-02 DI DAERAH RANTAU PANDAN
PROVINSI JAMBI**

**CHARACTERISTICS OF OIL SHALES IN SINAMAR FORMATION
BASED ON BRP-02 DRILL HOLE DATA AT RANTAU PANDAN AREA
JAMBI PROVINCE**

Robet Lumban Tobing

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
trebortobing@gmail.com

ABSTRAK

Serpah minyak merupakan batuan sedimen halus yang mengandung material organik dan dapat menghasilkan minyak ketika diekstraksi. Formasi Sinamar di daerah penelitian diduga merupakan formasi pembawa serpah minyak. Formasi ini terletak di bagian barat dan tenggara daerah penelitian dan diperkirakan berumur Oligosen. Berdasarkan data sumur BRP-02, litologi Formasi Sinamar di daerah penelitian tersusun oleh serpah, batulanau, batupasir dan batulempung karbonan. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakter serpah minyak pada Formasi Sinamar yang tersebar di daerah Rantau Pandan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. Sebanyak 25 sampel batuan serpah diambil dari sumur pengeboran untuk dilakukan analisis-analisis: maseral, reflektansi vitrinit, pirolisis, *total organic carbon* (TOC) dan ekstraksi batuan. Hasil analisis maseral yang dilakukan diketahui bahwa sampel batuan didominasi oleh maseral liptinit. Hasil analisis TOC menunjukkan bahwa kandungan material organik sampel batuan berkisar 3,40-17,60% merupakan batuan sedimen yang berpotensi baik hingga sangat baik sebagai batuan sumber hidrokarbon. Tingkat kematangan material organik berada pada tahap belum matang hingga lewat matang. Berdasarkan data hasil ekstraksi batuan yang dilakukan terhadap sampel batuan diperoleh kandungan minyak berkisar 10 -150 liter/ton batuan atau dengan rata-rata 56 liter/ton batuan.

Kata kunci: serpah minyak, material organik, analisis pirolisis, analisis TOC, ekstraksi batuan

ABSTRACT

Oil shales is defined as fine sedimentary rock that contains organic material and can produce oil when extracted. The Sinamar Formation in the study area is thought to be a carrier for oil shales. This formation is located in the western and southeastern parts of the study area and is thought to have age of Oligocene. Based on BRP-02 well data, lithology of the study area consists of shales, siltstone, sandstone and carbonaceous clays. The purpose of this study was to determine the character of the oil shales in the Sinamar Formation, which is scattered in the Rantau Pandan area, Bungo Regency, Jambi Province. As many as 25 samples of rock obtained from drilling wells were analyzed for maceral, pyrolysis, total organic carbon (TOC) and extraction of rock. The results of the maceral analysis show that the rock samples are dominated by liptinite maceral. TOC analysis show that the organic material in the samples is about 3.40 to 17.60% which is potentially good to very good as hydrocarbon source rock. The level of organic maturity is immature to over maturity. Based on the rock extraction data from the samples, result of the oil content is about 10 to 150 liters/tons of rock with average 56 liters/tons of rock.

Keywords: oil shales, organic material, pyrolysis analysis, TOC analysis, extraction of rocks

PENDAHULUAN

Serpit minyak (*oil shales*) merupakan batuan sedimen halus yang mengandung material organik dan dapat menghasilkan minyak ketika diekstraksi (Yen & Chilingarian, 1976; Hutton, 1987; Dyni, 2006; Lee *et al.*, 2007; Ruiz *et al.*, 2012; Tobing, 2016). Komponen mineral yang terkandung pada serpit minyak umumnya terdiri dari mineral lempung, kuarsa, karbonat dan pirit (Crisp *et al.*, 1987; Slatt & Rodriguez, 2012; Tobing, 2016).

Serpit minyak terendapkan dalam suatu lingkungan yang tenang, baik lingkungan air asin maupun air tawar, seperti cekungan laut terisolasi, rawa-rawa, danau dan delta. Kandungan material organik serpit minyak umumnya berasal dari alga, tetapi dapat juga berasal dari sisa-sisa tumbuhan (Yen & Chilingarian, 1976; Tobing, dkk., 2011).

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakter serpit minyak hasil pengeboran BRP-02 pada Formasi Sinamar yang tersebar di daerah Rantau Pandan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi.

METODE

Penelitian ini menggunakan data hasil pengeboran dangkal hingga kedalaman 100 meter dan pengambilan sampel batuan hasil pengeboran untuk analisis laboratorium. Analisis laboratorium yang dilakukan terdiri dari analisis maseral, analisis reflektansi vitrinit (Rv) dengan menggunakan mikroskop sinar pantul, analisis pirolisis, analisis *total organic carbon* (TOC) dan ekstraksi batuan.

GEOLOGI

Geologi daerah penelitian mengacu pada peta geologi bersistem lembar Painan dan bagian timurlaut lembar Muarasiberut yang diterbitkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (Rosidi dkk., 1996). Daerah penelitian (Gambar 1) berada pada cekungan busur belakang (Harahap dkk., 2003) yang terletak di

sebelah barat laut Cekungan Sumatra Selatan.

Morfologi di daerah penelitian secara umum dicirikan oleh satuan perbukitan bergelombang sedang dan pedataran. Morfologi perbukitan bergelombang sedang menempati bagian baratdaya dengan ketinggian 150-400 meter di atas permukaan laut (dpl). Satuan pedataran menempati hampir seluruh daerah penelitian dengan ketinggian berkisar 25-150 meter dpl.

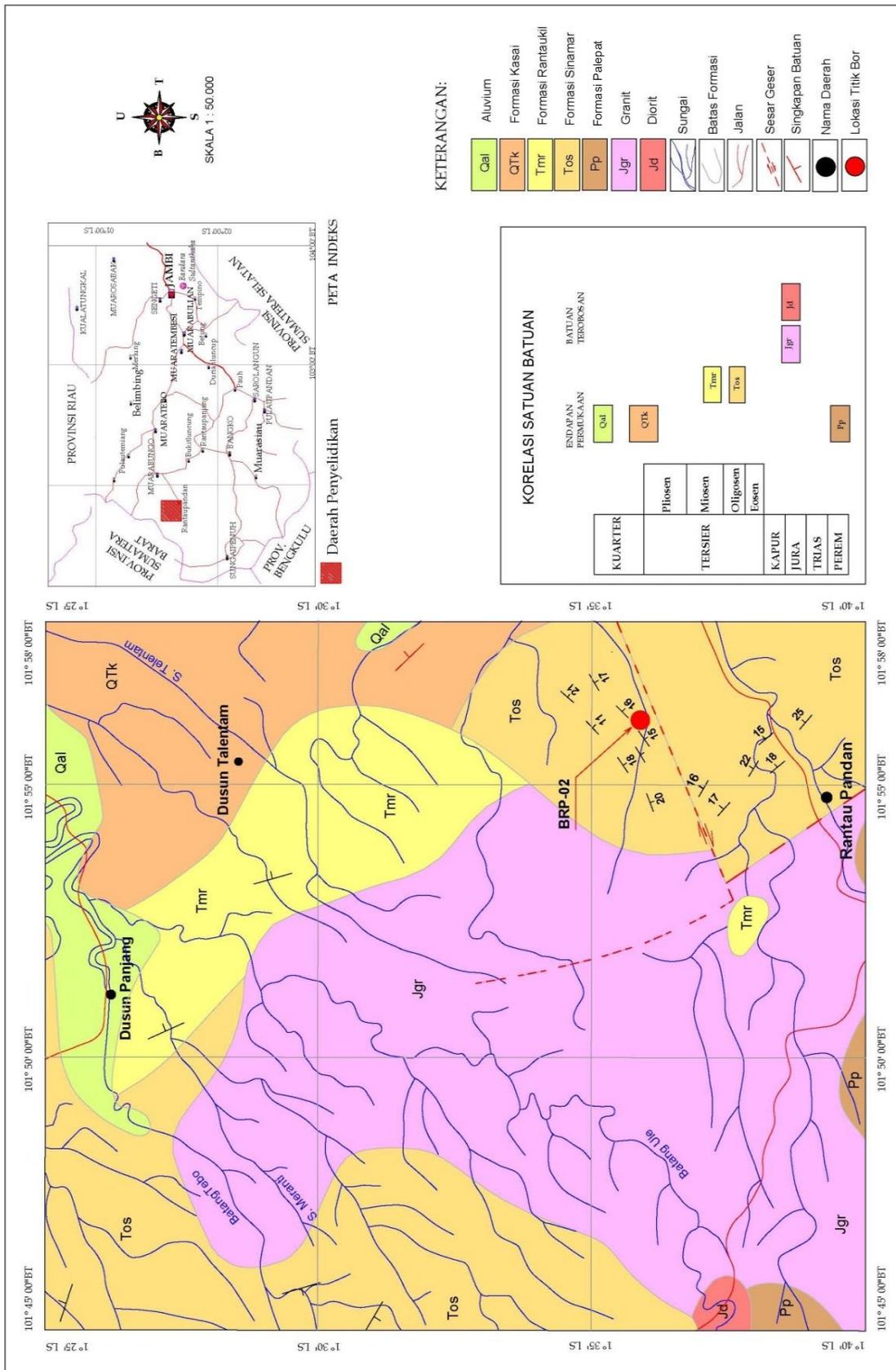
Stratigrafi daerah penelitian tersusun oleh batuan pra-Tersier dan Tersier (Rosidi dkk., 1996). Kelompok batuan pra-Tersier berumur Perem hingga Jura, sementara kelompok batuan Tersier berumur Eosen hingga Pliosen. Kelompok batuan pra-Tersier umumnya bertindak sebagai batuan alas berupa batuan granit, kemudian cekungan ini terisi oleh batuan sedimen Tersier. Stratigrafi daerah penelitian dari yang tertua hingga muda dapat diuraikan sebagai berikut:

Formasi Palepat (Pp) berumur Perem, tersusun oleh lava dan tuf. Formasi ini juga mengandung batulanau keras terkonsolidasi, batutanduk, serpit dan batugamping hablur berlapis baik.

Diorit (Jd) berumur Jura, susunannya berkisar antara diorit, hornblenda sampai kuarsa dengan bintik-bintik mineral mafik, secara setempat terkena kloritisasi dan terubah sebagai stok. Batuan ini menerobos Formasi Palepat.

Granit (Jgr) berumur Jura, tersusun oleh granit, biotit, hornblenda sampai granodiorit dengan bintik-bintik mineral mafik, plagioklas jenis oligoklas.

Formasi Sinamar (Tos) berumur Oligosen, tersusun oleh konglomerat, batupasir konglomeratan, batupasir kuarsa mengandung mika, batupasir arkose, batulempung, napal, batubara dan serpit. Ketebalan formasi ini diperkirakan mencapai 750 meter.



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Rosidi dkk., 1996)

Formasi Rantauikil (Tmr) terendapkan di atas Formasi Sinamar, berumur Oligosen Akhir hingga Miosen, tersusun oleh batupasir lempungan, batupasir tufan, batupasir gampingan, batulempung pasir, batulempung tufan dan lensa tipis batugamping.

Secara tidak selaras, di atas Formasi Rantauikil terendapkan Formasi Kasai (QTK) berumur Plio-Plistosen yang tersusun oleh tuf batuapung, batupasir tufan dengan sisipan bentonit dan sedikit lignit. Formasi ini memiliki ketebalan mencapai 700 meter. Pada kala Holosen terendapkan Aluvium (Qal), terdiri dari lempung, lanau, pasir dan kerikil.

Struktur geologi yang berkembang di daerah penelitian terdiri dari sesar geser manganan (*dextral*) dengan arah relatif timurlaut-baratdaya dan struktur antiklin dengan arah relatif tenggara-baratlaut.

SUMBER DATA

Data yang digunakan dalam tulisan ini berasal dari data sampel batuan hasil pengeboran prospeksi sumur BRP-02 pada Formasi Sinamar yang dilakukan oleh tim pengeboran, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (PSDMP) (Tobing dkk., 2016). Titik koordinat lokasi pengeboran ini berada pada koordinat 01°35'58,6" LS-101°56'10,6" BT. Sumur pengeboran ini menembus batuan yang merupakan bagian dari Formasi Sinamar hingga kedalaman 100 meter dengan ketebalan total batuan sedimen 97 meter dan lapisan tanah penutup 3 meter. Puncak lapisan batuan berada pada kedalaman 3 meter dengan kemiringan lapisan 22°. Urutan batuan hasil pengeboran mulai dari lapisan paling bawah ke lapisan paling atas adalah sebagai berikut:

Lapisan serpih pada kedalaman 100,00 hingga 23,00 meter, memiliki ciri batuan berwarna abu-abu kehitaman hingga kecoklatan, berukuran butir lempung, struktur berlapis, menyerpih, keras hingga

agak keras. Di beberapa tempat terdapat sisipan batupasir berukuran halus hingga sedang, sisipan batulanau dan lempung karbonan. Pada kedalaman 23,00 hingga 14,40 meter ditemukan serpih berwarna abu-abu terang, berukuran butir lempung, menyerpih, lunak, terdapat sisipan batupasir berwarna abu-abu terang, berbutir sedang hingga kasar. Pada kedalaman 14,40 hingga 8,00 meter dijumpai lapisan batupasir berwarna abu-abu terang, berukuran butir sedang hingga kasar, di beberapa tempat disisipi kerikil. Pada kedalaman 8,00 hingga 3,00 meter ditemukan endapan berukuran kerikil hingga kerakal.

Dari sumur BRP-02 tersebut diambil sebanyak 25 sampel serpih untuk diekstraksi dan 7 sampel dengan notasi BRP 2-03, BRP 2-06, BRP 2-10, BRP 2-14, BRP 2-17, BRP 2-21 dan BRP 2-25 dilakukan analisis-analisis: maseral, reflektansi vitrinit (Rv), pirolisis dan TOC. Data hasil analisis yang telah dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Di dalam analisis maseral dengan menggunakan mikroskop sinar pantul, kelompok maseral dapat dibedakan satu dengan yang lain berdasarkan derajat reflektivitasnya. Inertinit adalah maseral yang memiliki reflektivitas yang tinggi, sedangkan liptinit adalah sebaliknya. Pengamatan maseral liptinit lebih efektif dilakukan dengan model refleksi fluoresen. Intensitas fluoresen material organik berkurang dengan meningkatnya kematangan (Cook, 1982). Perbedaan sifat fisika dan kimia juga dapat menyebabkan keberagaman warna dan intensitas fluoresen untuk tiap jenis liptinit. Sifat-sifat fluoresen liptinit berhubungan erat dengan tingginya kandungan hidrogen. Kekayaan material organik dalam batuan sedimen dapat diperkirakan secara semi kuantitatif mengikuti standar pada Tabel 2.

Tabel 1. Data hasil analisis : maseral, Rv, TOC, pirolisis dan ekstraksi batuan

No.	Kode	Litologi	Kedalaman (m)	Minyak (l/ton)	Maseral (%)			TOC (%)	S1 (mg/gr batuan)	S2 (mg/gr batuan)	S3 (mg/gr batuan)	Tmaks (°C)	PY	HI	OI	
	Sapel Batuan				Rv	Liptinit	Vitrinit									Inertinit
1	BRP.2-01	Serpilh	14 - 15	70												
2	BRP.2-02	Serpilh	18 - 19	60												
3	BRP.2-03	Serpilh	23 - 24	15	0,42	10,0 - 50,00	2,0-10,00	0	3,4	0,2	13,34	0,41	438,3	13,54	393	12
4	BRP.2-04	Serpilh	25 - 26	50												
5	BRP.2-05	Serpilh	27 - 28	20												
6	BRP.2-06	Serpilh	30 - 31	115	0,41	10,0 - 50,00	10,0 - 50,00	0,1 - 0,5	17,58	1,03	73,68	0,89	430,1	74,71	419	5
7	BRP.2-07	Serpilh	33 - 34	90												
8	BRP.2-08	Serpilh	35,5 - 36,5	140												
9	BRP.2-09	Serpilh	39 - 40	15												
10	BRP.2-10	Serpilh	42 - 43	150	0,37	10,0 - 50,00	2,0-10,00	0	6,41	3,77	18,17	1,12	527,7	21,94	284	18
11	BRP.2-11	Serpilh	45 - 46	45												
12	BRP.2-12	Serpilh	48 - 49	30												
13	BRP.2-13	Serpilh	51 - 52	40												
14	BRP.2-14	Serpilh	54 - 55	35	0,35	10,0 - 50,00	0,5 - 2,00	0	4,01	0,25	22,61	2,74	435,4	22,86	563	68
15	BRP.2-15	Serpilh	58,5 - 59,5	10												
16	BRP.2-16	Serpilh	63 - 64	50												
17	BRP.2-17	Serpilh	67 - 68	65	0,41	10,0 - 50,00	2,0-10,00	0	7,36	0,55	55,5	1,18	439,2	56,05	754	16
18	BRP.2-18	Serpilh	69 - 70	80												
19	BRP.2-19	Serpilh	73 - 74	60												
20	BRP.2-20	Serpilh	78 - 79	35												
21	BRP.2-21	Serpilh	82 - 83	50	0,36	10,0 - 50,00	0,5 - 2,00	0	5,85	0,45	37,31	1,88	433,8	37,76	638	32
22	BRP.2-22	Serpilh	87 - 88	50												
23	BRP.2-23	Serpilh	90 - 91	60												
24	BRP.2-24	Serpilh	94 - 95	40												
25	BRP.2-25	Serpilh	97,5 - 98,5	25	0,33	10,0 - 50,00	2,0-10,00	0	4,16	0,38	25,79	2,6	437,8	26,17	619	62

Keterangan:

- S1 : Hidrokarbon bebas yang dihasilkan pada temperatur 300°C
- S2 : Senyawa hidrokarbon dan oksigen yang dihasilkan pada temperatur berkisar 300°C - 550°C
- S3 : Senyawa oksigen yang terbentuk pada saat temperatur menurun dari 550°C - 300°C
- PY : Potential Yield
- HI : Hidrogen Index
- OI : Oxygen Index

Tabel 2. Terminologi kelimpahan material organik (Cook, 1982)

Kelimpahan Kualitatif	Volume Material Organik (%)
Absent/Absen	0
Rare/Jarang	<0.1
Sparse/Sedikit	0.1 – 0.5
Common/Sedang	0.5 – 2.0
Abundant/Banyak	2.0 – 10.0
Major/Berlimpah	10.0 – 50.0
Dominant/Istimewa	>50.0

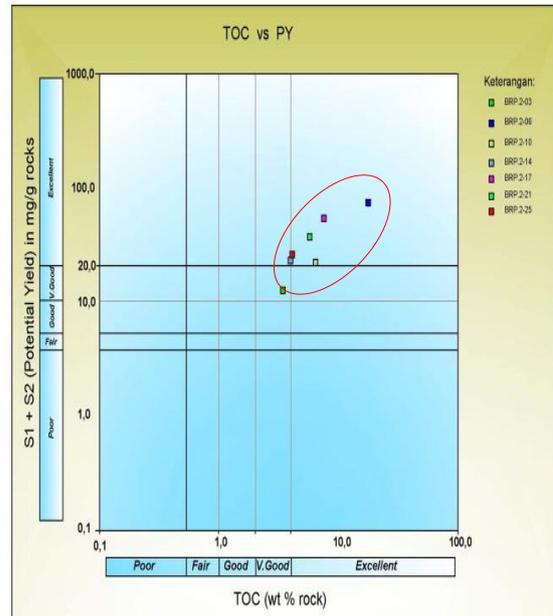
Berdasarkan terminologi Cook (1982), secara mikroskopik, material organik sampel batuan dari daerah penelitian terdiri dari maseral liptinit berkisar 10,0-50,0% (berlimpah), maseral vitrinit berkisar 0,5-2,0% hingga 10,0-50,0% (sedang hingga berlimpah) dan maseral inertinit berkisar 0,1-0,5% (sedikit). Secara keseluruhan, kandungan maseral terbanyak di dalam sampel batuan didominasi oleh maseral liptinit.

Analisis TOC dimaksudkan untuk mengetahui kelimpahan material organik pada suatu sampel batuan. Berdasarkan data hasil analisis TOC yang dilakukan, diketahui kandungan material organik pada sampel batuan berkisar 3,40-17,60%. Menurut Waples (1985), batuan sedimen yang memiliki kandungan material organik <0,5% tidak memiliki potensi sebagai batuan sumber hidrokarbon, sedangkan batuan sedimen dengan kandungan material organik antara 1,0-2,0% merupakan batuan yang cukup baik sebagai batuan sumber hidrokarbon. Material organik >2,0% merupakan batuan yang berpotensi baik hingga sangat baik sebagai batuan sumber hidrokarbon.

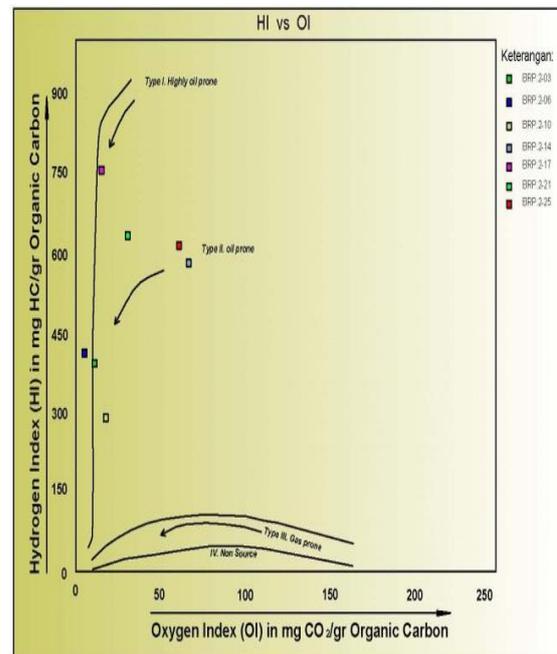
Plot silang antara TOC terhadap PY (*potential yield*) memperlihatkan bahwa potensi sampel batuan untuk menghasilkan hidrokarbon termasuk dalam kriteria sangat baik hingga istimewa (Gambar 2).

Plot silang antara HI (*hydrogen index*) terhadap OI (*oksigen index*) pada diagram van Krevelen (Gambar 3)

memperlihatkan bahwa material organik sampel batuan merupakan kerogen Tipe I dan Tipe II yang memiliki kecenderungan menghasilkan minyak.



Gambar 2. Plot silang antara TOC vs PY

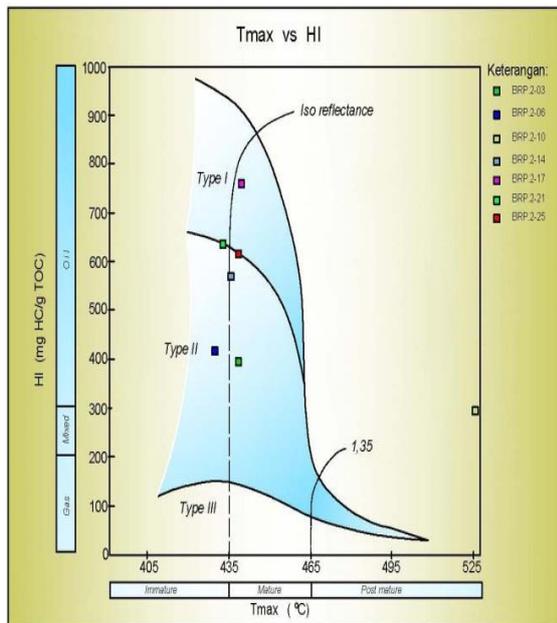


Gambar 3. Plot silang antara HI vs OI

Tahap kematangan termal material organik diperoleh dari analisis pirolisis dan reflektansi vitrinit. Secara umum, awal kematangan material organik memiliki nilai R_v sebesar 0,6% dengan nilai T_{maks}

(temperatur maksimum) berkisar 435-445°C. Puncak kematangan terjadi pada Rv 0,65-0,9% dengan nilai Tmaks 445-450°C serta akhir kematangan terjadi pada Rv 0,9-1,35% dengan nilai Tmaks 450-470°C dan lewat matang terjadi sekitar Rv>1,35% dengan nilai Tmaks >470°C (Peters & Cassa, 1994).

Nilai Tmaks sampel batuan hasil analisis diperoleh berkisar 430,1-527,7°C. Plot silang antara nilai Tmaks terhadap HI pada diagram (Gambar 4) menunjukkan bahwa material organik berada pada tahap belum matang (*immature*) hingga lewat matang (*over mature*).



Gambar 4. Plot silang antara Tmaks vs HI

Berdasarkan data hasil analisis reflektansi vitrinit, nilai Rv berkisar 0,33-0,42% mengindikasikan bahwa material organik berada pada tahap belum matang.

Banyaknya kandungan minyak di dalam sampel batuan dapat diketahui melalui proses ekstraksi batuan. Menurut Lee *et al.* (2007) proses ekstraksi batuan untuk menghasilkan minyak disebut dengan istilah *fischer assay*, yaitu suatu proses pemanasan sampel batuan hingga temperatur 298-773°K (25-500°C) untuk menghasilkan minyak. Dari hasil analisis ekstraksi batuan yang dilakukan terhadap

sampel batuan diperoleh kandungan minyak berkisar 10 hingga 150 liter/ton.

Pembahasan

Hasil pengeboran sumur BRP-02, batuan di daerah penelitian dari lapisan paling bawah ke atas tersusun oleh serpih yang relatif tebal, berwarna abu-abu kehitaman hingga kecoklatan, berukuran butir lempung, menyerpih, keras hingga agak keras. Kandungan material organik sampel batuan didominasi oleh maseral liptinit, sedangkan vitrinit dan inertinit hadir dalam jumlah sedikit. Liptinit adalah kelompok maseral yang berasal dari zat lilin, lipid dan bagian dari tumbuhan seperti spora, kutikula dan resin (Hutton, 2006). Liptinit merupakan kerogen Tipe II yang memiliki kecenderungan untuk menghasilkan minyak (Waples, 1985).

Jumlah keseluruhan kandungan material organik pada sampel batuan dikategorikan berlimpah. Kelimpahan material organik dan ketebalan endapan serpih merupakan penciri suatu kondisi lingkungan pengendapan yang relatif tenang dan produktivitas organik melimpah pada saat terjadinya proses sedimentasi.

Hasil analisis TOC, kandungan material organik pada sampel batuan berkisar 3,40-17,60% mengindikasikan bahwa endapan serpih di daerah penelitian memiliki potensi baik hingga sangat baik untuk menghasilkan hidrokarbon (Waples, 1985). Nilai HI berkisar 284 hingga 754 mgHC /gramTOC mengindikasikan bahwa sampel batuan memiliki kecenderungan menghasilkan minyak dan sedikit gas (Peters dan Cassa, 1994).

Berdasarkan data hasil pengukuran Tmaks, terdapat 2 sampel batuan dengan notasi BRP 02-06 dan BRP 02-21 dikategorikan belum matang, 4 sampel batuan dengan notasi BRP 02-03, BRP 02-14, BRP 02-17 dan BRP 02-25 dikategorikan awal matang dan 1 sampel batuan dengan notasi BRP 02-10 dikategorikan lewat matang. Terjadinya anomali tingkat kematangan pada sampel dengan notasi BRP 02-10 diduga

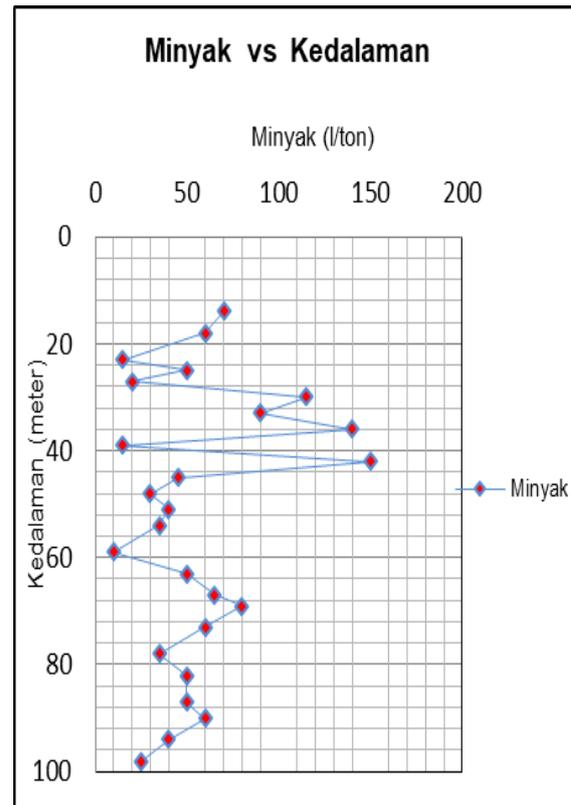
disebabkan terjadinya perubahan temperatur yang cukup tinggi di sekitar lokasi sampel batuan tersebut. Meningkatnya kematangan suatu material organik terjadi ketika material organik tersebut mengalami temperatur tinggi untuk jangka waktu yang cukup lama (Waples, 1985). Perubahan temperatur tersebut dapat disebabkan oleh oleh penurunan cekungan, pembebanan lapisan penutup, konduktivitas panas yang berasal dari batuan di sekitarnya atau tekanan akibat tektonik (Stone & Cook, 1979; Teichmuller, 1987; dalam Herudiyanto, 2003).

Hasil analisis Rv menunjukkan bahwa seluruh sampel batuan dikategorikan belum matang. Terdapat perbedaan hasil pengukuran antara Tmaks dan Rv pada 5 sampel batuan dengan notasi BRP 02-03, BRP 02-10, BRP 02-14, BRP 02-17 dan BRP 02-25. Berdasarkan hasil analisis pirolisis, kelima sampel ini dikategorikan berada pada tahap awal matang hingga lewat matang, sementara hasil pengukuran reflektansi vitrinit mengindikasikan bahwa sampel batuan dikategorikan berada pada tahap belum matang. Menurut Subroto (2004), analisis reflektansi vitrinit memiliki kelemahan dalam menentukan tingkat kematangan suatu batuan sumber hidrokarbon. Hal ini disebabkan oleh maseral vitrinit yang ditemukan pada sampel batuan sedimen halus merupakan material organik yang telah tertata ulang atau material lain (bukan vitrinit) yang terpadatkan dan sering teramati sebagai maceral vitrinit, sehingga tingkat kematangan yang teramati tidak sesuai dengan nilai kematangan sebenarnya.

Plot silang antara minyak hasil ekstraksi batuan terhadap kedalaman batuan (Gambar 5) mengindikasikan bahwa sampel batuan yang paling potensial berada pada kedalaman 30 meter hingga 42 meter dengan kandungan minyak 90 liter/ton hingga 150 liter/ton.

Lapisan berikutnya pada kedalaman 62 meter hingga 90 meter memperlihatkan kandungan minyak 35 liter/ton hingga 80

liter/ton dan lapisan batuan paling atas pada kedalaman 14 meter hingga 18 meter dengan kandungan minyak 60 liter/ton hingga 70 liter/ton. Bila dirata-ratakan kandungan minyak yang diperoleh dari 25 sampel batuan adalah 56 liter/ton batuan. Nilai ekonomis serpih minyak diperkirakan berkisar 25 liter/ton hingga 40 liter/ton batuan (Dyini, 2006).



Gambar 5. Plot silang antara Minyak vs Kedalaman sampel batuan.

KESIMPULAN

Litologi batuan sumur BRP-02 pada Formasi Sinamar dari bagian bawah ke atas tersusun oleh serpih, batulanau, batupasir dan batulempung karbonan. Kandungan material organik sampel batuan didominasi oleh maseral liptinit dengan kategori berlimpah. Nilai TOC berkisar 3,40% hingga 17,60% dengan tingkat kematangan material organik berada pada tahap belum matang hingga lewat matang. Kandungan minyak hasil ekstraksi sampel batuan berkisar 10 hingga 150 liter/ton batuan atau dengan rata-rata 56 liter/ton batuan. Berdasarkan

data-data hasil analisis yang dilakukan dapat diketahui bahwa endapan serpih pada Formasi Sinamar di daerah penelitian merupakan batuan serpih minyak (*oil shales*) yang memiliki potensi baik hingga sangat baik untuk menghasilkan hidrokarbon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala PSDMBP, Koordinator Bidang Batubara dan rekan-rekan kerja di lingkungan PSDMBP yang telah memberikan masukan dan saran sehingga tulisan ini dapat dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Cook, A.C. (1982): *The origin and petrology of organic matter in coal, oil shales and petroleum source rocks*, University Wollongong, Australia.
- Crisp, P.T., Ellis, J., Hutton, A.C., Korth, J., Martin, F.A., and Saxby, J.D. (1987): *Australian oil shale: A compendium of geological and chemical data*, University of Wollongong, Australia.
- Dyni, J.R. (2006): Geology and resources of some world oil-shale deposits, *Scientific investigation report 2005-5294*, USGS, Reston, Virginia.
- Harahap, B., Syaiful, B., Baharuddin, Suwarna, N., Panggabean, H., Simanjuntak, T.O. (2003), *Stratigraphic Lexicon of Indonesia*, (Special Publication No. 29), Geological Research and Development Centre, Bandung.
- Herudiyanto (2003): *Petrographic characteristics of some Indonesian oil shales based on microscopic analysis*: Workshop on oil shales resources in Indonesia, Directorate of Mineral Resources Inventory, Special Publication, No.102.
- Hutton, A.C. (1987): *Petrographic classification of oil shales: International Journal of Coal Geology*, vol.8 (3), p. 203-231.
- Hutton, A.C. (2006): Organic petrography and classification of oil shales: *Oil shales workshop*, University of Wollongong, Australia.
- Lee, S., Speight, J.G., and Loyalka, S.K. (2007): *Handbook of alternative fuel technologies*, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Peters, K.E. and Cassa, M.R. (1994): *Applied source rock geochemistry: The petroleum system from source rock to trap*, AAPG, Memoirs 60.
- Rosidi, H.M.D., Tjokrosoepetro, S., Pendowo, B., Gafoer, S., dan Suharsono, (1996), *Peta Geologi Lembar Painan dan Bagian Timurlaut Muarasiberut, Sumatra*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Ruiz, I. S., Flores, D., Filho, J. G. M., Hackley, P. C., (2012), *Review and update of the applications of organic petrology: Part 1, geological applications*, International Journal of Coal Geology, vol. 99, p. 54-112.
- Slatt, R. M. and Rodriguez, N., (2010), *Comparative Sequence Stratigraphy and Organic Geochemistry of North American Unconventional Gas Shales: Commonality or Coincidence*, AAPG Hedberg Conference, Austin, Texas.
- Subroto, E.A., (2004): *Pengenalan geokimia petroleum*, Departemen Teknik Geologi, ITB, Bandung.
- Tobing, R. L., Wibisono, S.A., Simatupang, D.P., (2011); *Petrografi organik dan retorting conto batuan hasil pemboran Sumur BH-02 Anggota Atas Formasi Telisa untuk mengetahui potensi serpih minyak di Daerah Padanglawas, Sumatra Barat: Buletin Sumber Daya Geologi*, vol.6 (3), p. 161-169.
- Tobing, R. L., Triono, U., Priyono., Setiawan, W., (2016), *Prospeksi Bitumen Padat di Daerah Dusun Panjang, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi*, PSDMBP, Bandung.

Tobing, R. L., (2016); *Kematangan termal dan estimasi kandungan minyak endapan serpih Formasi Sinamar di Daerah Dusun Panjang, Provinsi Jambi: Buletin Sumber Daya Geologi*, vol.11 (2), p. 93-101.

Waples, D.W. (1985): *Geochemistry, in petroleum exploration*, International Human Resources Development Cooperation, Boston.

Yen, T.F. and Chilingarian, G.V. (1976): *Oil shale*, Elsevier, Amsterdam.

Diterima	: 3 November 2020
Direvisi	: 24 Februari 2021
Disetujui	: 24 Mei 2021

KAOLINITISASI DAN MOBILITAS UNSUR TANAH JARANG PADA PROFIL PELAPUKAN BATUAN GUNUNGAPI DI PUNCAK MANDEH, SUMATRA BARAT**KAOLINITIZATION AND RARE EARTH ELEMENTS MOBILIZATION OF A VOLCANIC ROCK WEATHERING PROFILE IN PUNCAK MANDEH, WEST SUMATRA****Ronaldo Irzon, Kurnia, Purnama Sendjaja, dan Verry E. Setiawan**Pusat Survei Geologi
ronaldoirzon18@gmail.com**ABSTRAK**

Proses pelapukan berlangsung di permukaan bumi terutama pada wilayah beriklim tropis dan menyebabkan mobilisasi elemen dari batuan induk. Pelapukan menarik untuk dipelajari karena seringkali dikaitkan dengan pengayaan bahan-bahan ekonomis seperti besi, alumina, dan UTJ. Profil pelapukan batuan gunungapi Tersier tersebar di Sumatra yang beriklim tropis. Studi ini bertujuan untuk menjabarkan proses kaolinitisasi dan proses mobilisasi UTJ pada profil pelapukan batuan gunungapi di timur Puncak Mandeh, Sumatra Barat. Perangkat XRF dan ICP-MS dimanfaatkan untuk mengukur kelimpahan oksida utama, unsur jejak, dan UTJ. Kenaikan IOL terbukti terjadi searah dengan tingkat pelapukan. Kaolinitisasi pada pelapukan di Puncak Mandeh ditunjukkan oleh diagram segitiga $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_{3T}$. Feldspar dan mika yang rentan terhadap pelapukan langsung berubah menjadi kaolinit pada tahap awal pelapukan untuk menjelaskan variasi oksida utama pada profil pelapukan. Proses pelapukan telah meningkatkan jumlah alumina dan besi secara signifikan relatif terhadap batuan induk. Tidak terdapat pengayaan UTJ pada horizon pelapukan dibandingkan dengan komposisinya pada batuan induk. Sebagian Ce teroksidasi menjadi Ce^{4+} dan tertinggal di horizon saprolit. Kondisi ini membuat mobilitas Ce yang searah tingkat pelapukan berbeda dengan unsur UTJ lainnya.

Kata kunci: batuan gunungapi, kaolinitisasi, pelapukan, UTJ**ABSTRACT**

The weathering process occurs on the Earth's surface, especially in tropical climates, and causes the parent rock's mobilization of elements. Weathering is interesting because it is often associated with the enrichment of economic materials such as iron, alumina, and REEs. The weathering profile of Tertiary volcanic rocks is spread across tropical Sumatra. This study aims to describe REEs' kaolinitization and mobilization process on the weathering profile of volcanic rocks in the east of Mandeh Peak, West Sumatra. XRF and ICP-MS devices are utilized to measure the abundance of major oxides, trace elements, and REEs. The increase in IOL is proven to occur in the same direction as weathering levels. A triangular diagram of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_{3T}$ indicates kaolinitization on weathering at Mandeh Peak. Feldspar and mica were prone to weathering and instantly turn into kaolinite in the early stages of weathering to explain the main oxide variations in weathering profiles. The weathering process has increased the amount of alumina and iron significantly relative to the parent rock. There is no REEs enrichment on any of the weathering horizons other than its composition on the parent rocks. Part of Ce is oxidized into Ce^{4+} and left on the saprolite horizon. This condition makes Ce's mobility in the direction of weathering level is different from other REEs.

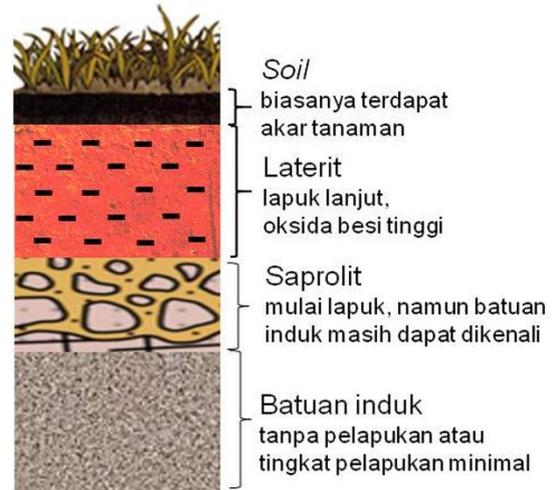
Keywords: kaolinitization, REE, volcanic rock, weathering

PENDAHULUAN

Pelapukan adalah proses dekomposisi batuan maupun mineral di permukaan bumi. Proses ini mudah ditemukan di berbagai wilayah dengan bermacam jenis batuan induk dan dapat dimanfaatkan untuk menjelaskan kondisi lingkungan pada masa lampau (Fernández-Caliani dan Cantano, 2010; Bazilevskaya dkk., 2013; Sahoo dkk., 2017; Fernández-Caliani, 2018). Mekanisme ini lebih rentan terjadi pada wilayah tropis akibat adanya derajat kelembaban tinggi dan siklus hujan sepanjang tahun (Fernández-Caliani, 2018; Permanajati dkk., 2018; Meshram dkk., 2019). Selain iklim, intensitas pelapukan juga dipengaruhi oleh beberapa faktor lain, seperti umur, struktur, tekstur, distribusi pori, permeabilitas dan komposisi batuan induk (Alam dkk., 2012; Labus dan Bochen, 2012; Bazilevskaya dkk., 2013; Garzanti dkk., 2014; Irzon dan Abdullah, 2018). Pada umumnya, suatu profil pelapukan dapat dibagi menjadi beberapa horizon dari bawah ke atas searah pelapukan, yaitu batuan induk, saprolit, laterit, dan soil (Gambar 1). Lebih lanjut, profil pelapukan dapat diklasifikasi menjadi lebih banyak horizon berdasarkan ragam kenampakan megaskopisnya di lapangan (Fernández-Caliani, 2018; Ohandja dkk., 2020; Tupaz dkk., 2020).

Ragam mineral sekunder seperti oksida besi, bauksit, dan kaolinit lazim terjadi akibat pelapukan mineral kaya besi, mineral berkadar alumina tinggi, dan K-felspar secara berurutan (Abedini dan Calagari, 2016). Oleh sebab itu, terdapat mobilisasi unsur yang berasosiasi terhadap proses pelapukan karena pembentukan mineral sekunder tersebut. Meskipun pada awalnya Unsur Tanah Jarang (UTJ) dianggap resisten terhadap alterasi, kelompok unsur ini justru dapat terkayakan pada mineral sekunder yang berasosiasi dengan pelapukan seperti monasit, cerianit, alanit, dan xenotim (Du dkk., 2012; Abedini dan Calagari, 2016; Fernández-Caliani, 2018; dos Santos dkk., 2019). Fakta tersebut mendorong penelitian selanjutnya hingga ditemukan deposit

unsur tanah jarang (UTJ) tipe *ion-adsorption* pada beberapa wilayah Asia Tenggara (Yussof dkk., 2013; Sanematsu dkk., 2015; Handoko dan Sanjaya, 2018; Yaraghi dkk., 2020). Penelitian-penelitian tersebut menyimpulkan bahwa terdapat kemungkinan pengayaan jumlah UTJ pada horizon pelapukan tertentu dibandingkan dengan batuan induknya.



Gambar 1. Beberapa horizon yang secara umum terdapat pada suatu profil pelapukan batuan (modifikasi dari Irzon dkk. (2016))

Wilayah Sumatra kini adalah hasil amalgamasi Lempeng *West Sumatra* yang merupakan pecahan dari Cathaysia dan barat Lempeng Sibumasu yang berasal dari Gondwana (Metcalfe, 2017; Irzon dkk., 2020). Bagian dari Sumatra yang merupakan wilayah *West Sumatra* dan Sibumasu dipisahkan oleh garis imajiner yang disebut *Medial Sumatra Tectonic Zone* (MSTZ). Batuan tertua yang tersingkap di Sumatra diperkirakan berumur Paleozoikum dan terdiri dari batuan metamorfik maupun batuan intrusif. Kedua jenis batuan tersebut terus terbentuk hingga zaman Kuartar dan melibatkan beberapa lempeng samudra maupun benua, yaitu Palaeo-Tethys, Meso-Tethys, India-Australia, *West Sumatra*, dan Sibumasu. Jajaran Bukit Barisan terbentuk akibat penunjaman Lempeng Samudra India-Australia ke bawah Lempeng *West Sumatra* sejak periode Eosen (Zulkarnain, 2016; Liu dkk.,

2019). Penunjaman tersebut masih berlangsung hingga kini dengan rerata kecepatan 5,7 cm/tahun (Liu dkk., 2019).

Pulau Sumatra dilintasi oleh ekuator dan merupakan pulau terbesar ke-6 di dunia. Seluruh wilayah Sumatra berada tidak jauh dari garis ekuator sehingga beriklim tropis yang sangat rentan terhadap pelapukan. Penelitian mengenai korelasi pelapukan terhadap perubahan komposisi batuan pada pulau-pulau di bagian timur Sumatra telah dibahas (Irzon dkk., 2016; Irvani, 2017). Kelimpahan UTJ pada horizon laterit di Kabupaten Singkep terkayakan hingga lebih dari empat kali lipat daripada batuan induknya (Irzon dkk., 2016). Bauksitisasi di Pulau Selayar adalah hasil pelapukan batuan kaya alumina dengan kandungan Al_2O_3 dan Fe_2O_{3T} tertinggi mencapai masing-masing 37,39% dan 23,84% secara berurutan (Irzon, 2018). Namun demikian, belum ada penelitian yang menjelaskan dampak pelapukan terhadap mobilisasi UTJ di bagian barat Pulau Sumatra, terutama di wilayah Sumatra Barat. Di wilayah Puncak Mandeh, Kabupaten Pesisir Selatan, Sumatra Barat terdapat singkapan batuan gunungapi, batuan intrusi, dan endapan permukaan. Profil-profil pelapukan dari batuan gunungapi dapat dijumpai di sisi jalan raya pada daerah yang berada di Provinsi Sumatra Barat ini. Studi ini bertujuan untuk menjabarkan proses kaolinitisasi dan proses mobilisasi UTJ pada profil pelapukan batuan gunungapi di timur Puncak Mandeh.

METODOLOGI

Penelitian ini terdiri dari lima sampel yang diperoleh dari suatu profil pelapukan batuan gunungapi yang meliputi batuan induk, horizon saprolit, horizon laterit bawah, horizon laterit atas, dan *soil* (Gambar 2a). Setiap sampel diambil secara berhati-hati karena garis batas antar horizon tidak merata. Batuan induk (tebal ≈ 40 cm) diperkirakan berkomposisi andesit hingga dasit, keabuan, kuat, keras dan pejal (Gambar 2b). Meskipun sudah mengalami pelapukan tingkat menengah, karakter

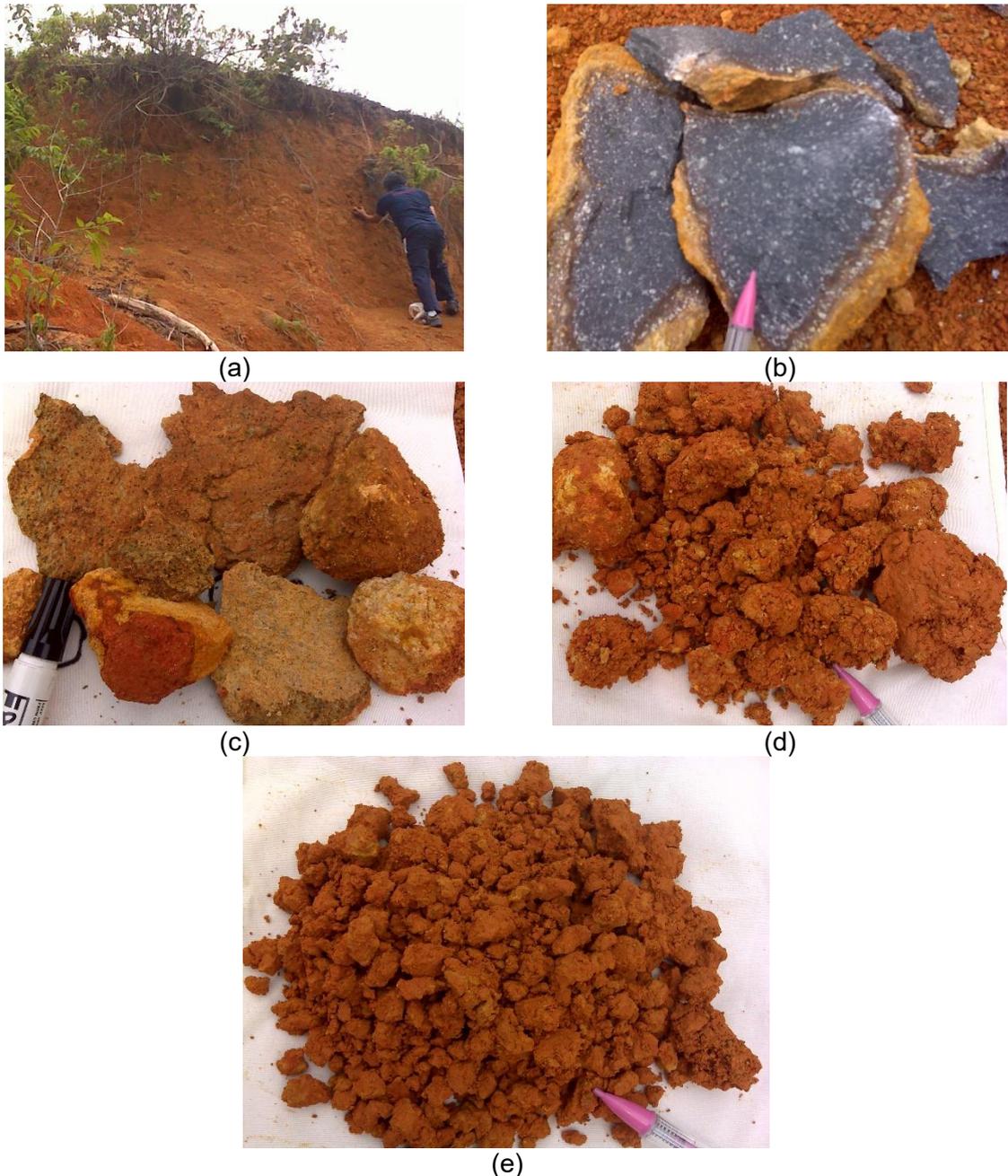
batuan induk masih dapat terlihat secara megaskopis pada sampel dari horizon saprolit dengan rerata ketebalan sekitar 50 cm (Gambar 2c). Karena terdapat perbedaan kontras secara megaskopis, horizon laterit dapat diklasifikasi menjadi dua lapisan. Horizon laterit bawah (tebal hampir 1 m) berwarna merah lebih pucat daripada horizon laterit atas (50 cm). Selain itu, beberapa kerikilan batuan beku lapuk lanjut masih dapat dijumpai pada horizon laterit bawah (Gambar 2d) sedangkan sampel dari horizon atas relatif tanpa material tersebut (Gambar 2e). Masih terdapat akar tetumbuhan pada horizon *soil* yang berwarna gelap. Horizon paling atas ini memiliki ketebalan sekitar 20 cm.

Setelah pencatatan mengenai kondisi profil singkapan berikut kondisi dan deskripsi setiap sampel, material studi dikirim ke Pusat Survei Geologi di Bandung untuk diperiksa kandungan geokimianya menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Inductively Coupled Plasma – Mass Spectrometry* (ICP-MS). Perangkat pertama digunakan untuk mengetahui kandungan oksida utama, yaitu SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_{3T} , CaO , MgO , MnO , K_2O , Na_2O , dan P_2O_5 . Pada sisi lain, konsentrasi unsur jejak maupun UTJ (Li, Sc, V, Ga, Rb, Sr, Y, Nb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Ta, Th, dan U) diukur menggunakan ICP-MS. Batuan induk dicuci dan dipisahkan dari bagian-bagian lapuk pada tepiannya sebelum digerus hingga didapatkan besar butir -200 *mesh*. Pada sisi lain, sampel lain tidak melalui proses pencucian sehingga langsung ke tahap penggerusan.

Metode *pressed pellet* dipilih dan dipergunakan untuk analisis XRF dalam studi ini dengan runtunan yang dijelaskan oleh Irzon dkk. (2018). Teknik destruksi menggunakan tiga jenis asam, yaitu asam klorida (HCl), asam nitrat (HNO_3), dan asam format (HF) diaplikasikan sebelum pengukuran menggunakan ICP-MS seperti dijelaskan oleh Irzon dkk. (2020). Sampel berikut larutan asam direaksikan dalam cawan Teflon dan dipanaskan di atas *hotplate* untuk mempercepat destruksi.

Penambahan asam perklorat tidak dibutuhkan karena seluruh sampel tampak terlarut sempurna tepat sesaat sebelum seluruh larutan mengering. Asam nitrat 2% ditambahkan ke dalam cawan Teflon berisi sampel untuk membuat larutan induk yang kemudian diencerkan lebih lanjut pada hari pengujian dengan ICP-MS. Kualitas

pengukuran yang baik diperlukan agar didapatkan interpretasi yang baik, salah satunya adalah dengan pengujian *Certified Standard Material* (CRM). Oleh sebab itu, dua buah CRM (AGV-2 dan GBW-7113) turut dianalisis dalam studi ini untuk mengetahui akurasi pengukuran.



Gambar 2. Kondisi lapangan profil pelapukan dan sampel yang dipelajari: a) profil singkapan secara umum yang berlokasi di timur Puncak Mandeh; b) batuan induk yang diperkirakan berkomposisi andesit-dasit; c) bongkah-bongkah yang mirip batuan induk pada horizon saprolit; d) sampel dari bagian bawah horizon laterit dengan warna merah pucat; e) sampel dari horizon laterit atas berwarna merah gelap

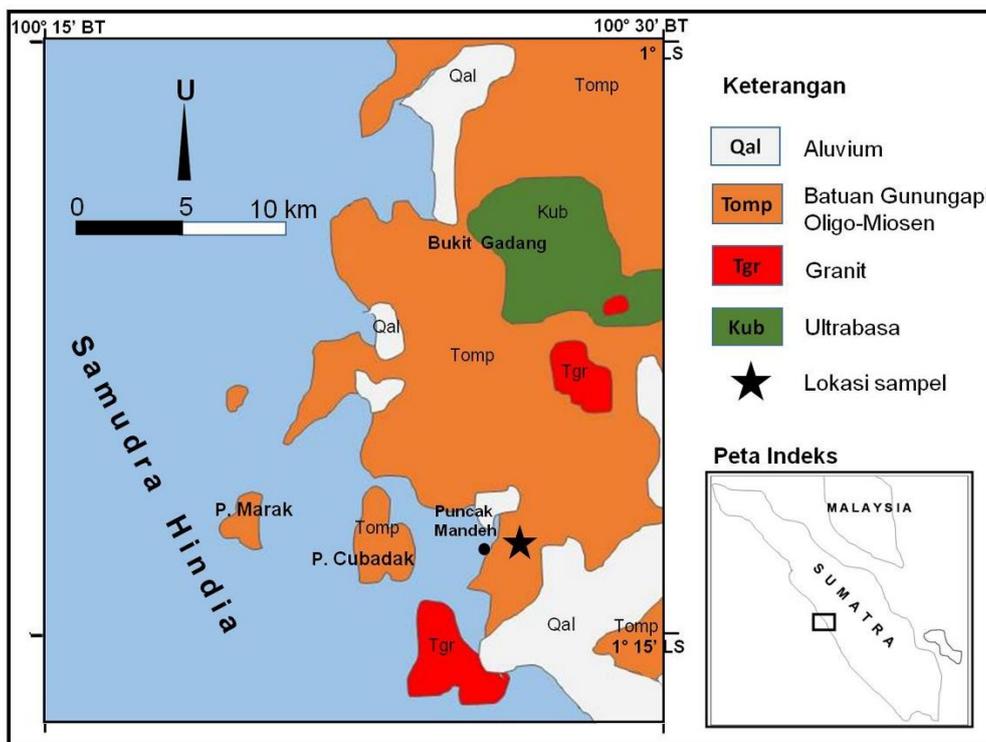
Terdapat beragam metoda kalkulasi untuk menentukan derajat pelapukan batuan, seperti CIA (*Chemical Index of Alteration*), PIA (*Plagioclase Index of Alteration*), CALMAG (*flux of calcium and magnesium*), dan IOL (*Index of Lateritization*). Metode IOL telah digunakan pada studi sebelumnya dalam mempelajari profil pelapukan batuan (Babechuk dkk., 2014; Sahoo dkk., 2017; Ohandja dkk., 2020; Tupaz dkk., 2020) dan diadaptasi dalam studi ini untuk dapat membandingkan tingkat pelapukan setiap horizon. IOL berbasis pada tiga oksida utama (SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_{3T}) dan dikalkulasi berdasarkan persamaan (1) berikut:

$$\text{IOL} = 100 \times ((\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3T}) / (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_{3T})) \dots\dots\dots 1)$$

GEOLOGI

Daerah penelitian berada di utara dari Peta Geologi Lembar Painan dan Bagian Timurlaut Lembar Muara Siberut berskala 1:250.000 (Rosidi dkk., 1996). Terdapat empat satuan batuan yang berada di

sekitar wilayah studi, yaitu Ultrabasa, Granit, Batuan Gunungapi Oligo-Miosen, dan Aluvium. Batuan Ultrabasa diperkirakan terbentuk pada zaman Kapur dan disimpulkan sebagai batuan yang tertua di sekitar Kabupaten Painan. Satuan batuan tersebut diduga bersentuhan dengan batuan Paleozoikum dan terdiri dari diabas yang terserpentinisasi, serpentinit, maupun harzburgit. Sesuai dengan namanya, Batuan Gunungapi Oligo-Miosen terbentuk pada kala Oligosen Akhir hingga Miosen Awal. Profil yang diteliti merupakan hasil pelapukan batuan gunungapi ini. Satuan Batuan Gunungapi Oligo-Miosen tersingkap pada sebagian besar daerah penelitian dan terdiri dari lava, breksi, tuf, dan ignimbrit. Granit di Painan yang terdiri dari granit hornblenda sampai granodiorit terbentuk pada zaman Tersier. Batuan intrusif tersebut menerobos Formasi Barisan (tidak terdapat di sekitar wilayah penelitian) dan Batuan Gunungapi Oligo-Miosen (Rosidi dkk., 1996). Lanau, pasir, dan kerikil membentuk endapan aluvium pada zaman Kuartar (Gambar 3).



Gambar 3. Geologi regional wilayah Kabupaten Pesisir Selatan (Rosidi dkk., 1996). Profil yang diteliti dalam studi sebagai pelapukan batuan gunungapi berumur Oligo-Miosen

HASIL DAN PEMBAHASAN

Batuan induk dapat dikelompokkan dalam batuan beku *intermediate* dengan kadar SiO₂ 66,24%. Kelimpahan oksida alumina dan besi pada batuan tersebut dikategorikan menengah, yaitu masing-masing 15,77% dan 5,24% secara berurutan (Tabel 1). Komposisi CaO, Na₂O, dan K₂O >2% sedangkan TiO₂, P₂O₅, dan MnO <1%. Batuan induk terindikasi telah mengalami pelapukan tingkat rendah dengan mengacu pada kadar LOI sekitar 3%. Kandungan SiO₂, CaO, dan MnO semakin menurun dari bawah hingga atas profil yang diteliti. Pada sisi lain, peningkatan signifikan ditunjukkan oleh jumlah Al₂O₃ dan Fe₂O_{3T} seiring dengan tingkat pelapukan hingga mencapai 1,5-2 kali lipat dari komposisinya dalam batuan induk. *Loss of Ignition* (LOI) pada keempat horizon pelapukan berada dalam rentang yang sempit, yaitu 14,77% hingga 15,49%. Kadar UTJ pada studi ini berada dalam

tingkat menengah yaitu 91 ppm (horizon soil) - 157 ppm (batuan induk).

Index of Lateritization (IOL) pada batuan induk (24,10) naik secara drastis menjadi 35,80 pada horizon saprolit. Indeks ini terus menaik menuju horizon laterit bawah (38,30) dan horizon laterit atas (41,20), namun sedikit menurun pada horizon soil (39,80). Peningkatan nilai IOL adalah implikasi dari pengurangan SiO₂ relatif terhadap jumlah Al₂O₃ dan Fe₂O_{3T} (Babechuk dkk., 2014; Ohandja dkk., 2020). Sejumlah akar tetumbuhan yang dijumpai pada horizon *soil* bukan representasi dari Al₂O₃ maupun Fe₂O_{3T}, namun merupakan bahan volatil. Kondisi tersebut dapat menjelaskan penurunan IOL yang disertai dengan kenaikan LOI pada horizon ini dibandingkan dengan horizon di bawahnya (Tabel 2). Perubahan rasio kelimpahan oksida utama dan UTJ keempat horizon pelapukan relatif terhadap batuan induk ditampilkan dalam bentuk grafis pada Gambar 4.

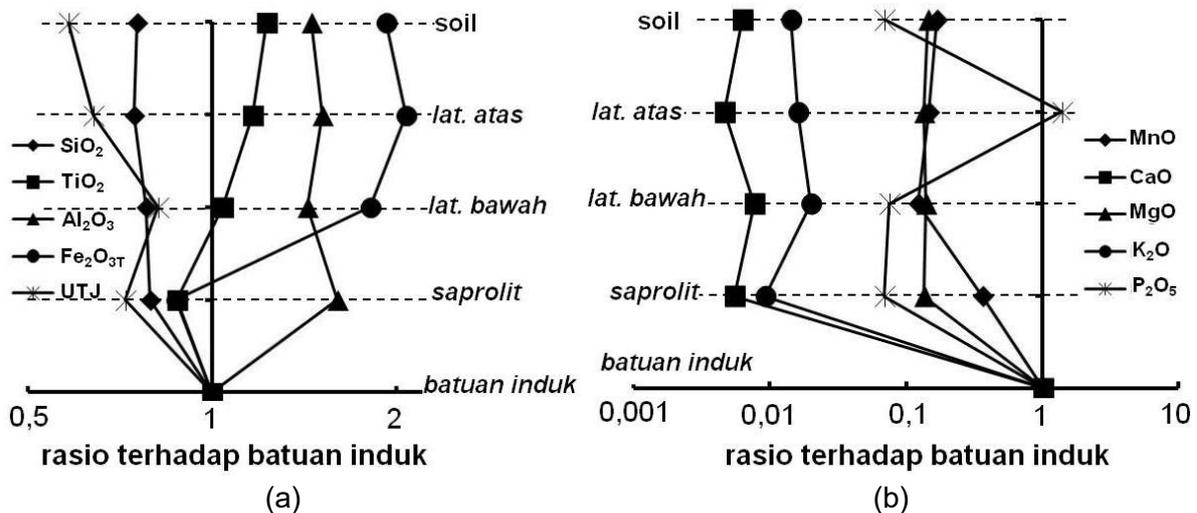
Tabel 1. Komposisi oksida utama, unsur jejak, UTJ, dan beberapa rasio pada studi di Puncak Mandeh

	Batuan Induk	Saprolit	Laterit bawah	Laterit atas	Soil
Oksida utama (%)					
SiO ₂	66,24	52,50	51,58	49,41	49,99
TiO ₂	0,53	0,46	0,55	0,61	0,65
Al ₂ O ₃	15,77	25,20	22,58	23,83	22,93
Fe ₂ O _{3T}	5,24	4,57	9,47	10,84	10,08
MnO	0,09	0,03	0,01	0,01	0,02
CaO	2,64	0,01	0,02	0,01	0,02
MgO	1,01	0,14	0,14	0,14	0,15
Na ₂ O	3,08	0,01	0,01	<0,01	<0,01
K ₂ O	2,29	0,02	0,05	0,04	0,03
P ₂ O ₅	0,23	0,02	0,02	0,32	0,02
LOI	3,08	15,41	15,49	14,77	15,07
Unsur Jejak dan UTJ (ppm)					
Li	16,79	13,44	26,68	25,05	20,61
Sc	10,87	11,84	17,40	17,48	14,86
V	54,41	37,04	65,51	88,43	84,74
Ga	17,58	24,96	33,53	36,72	34,37
Rb	56,86	1,98	3,13	3,05	2,48
Sr	237,80	1,50	21,51	15,84	7,69
Y	32,07	13,15	16,86	14,19	11,70
Nb	5,12	4,11	6,12	6,58	7,54
Ba	549,60	88,22	95,18	101,60	95,87
La	30,37	18,78	30,04	21,39	16,31
Ce	58,13	63,02	53,03	44,88	48,65
Pr	8,52	4,51	6,68	4,92	3,79
Nd	32,40	15,41	22,41	16,39	12,33

	Batuan Induk	Saprolit	Laterit bawah	Laterit atas	Soil
Sm	6,53	2,50	3,76	2,71	1,98
Eu	1,36	0,38	0,67	0,48	0,32
Gd	5,37	2,23	2,94	2,32	1,88
Tb	0,78	0,43	0,52	0,46	0,41
Dy	6,34	2,58	3,46	2,91	2,39
Ho	0,98	0,53	0,63	0,57	0,51
Er	2,71	1,26	1,69	1,44	1,19
Tm	0,32	0,24	0,26	0,25	0,23
Yb	3,31	1,57	2,26	1,89	1,51
Lu	0,31	0,23	0,26	0,25	0,23
Ta	0,70	0,69	0,71	0,72	0,71
Th	4,66	5,01	5,82	6,59	8,85
U	4,79	2,58	0,67	0,34	0,11
Σ UTJ	157,43	113,67	128,61	100,86	91,73

Tabel 2. Index of Lateritization (IOL), anomali, dan rasio kimia dalam studi ini

	Batuan Induk	Saprolit	Laterit bawah	Laterit atas	Soil
IOL	24,10	35,80	38,30	41,20	39,80
Fe/Sc	3374,43	2701,86	3809,77	4340,96	4748,32
Ce/Ce*	0,76	2,72	0,81	1,11	2,22
Eu/Eu*	0,31	0,12	0,17	0,16	0,13
(La/Yb) _N	6,19	8,06	8,96	7,63	7,28
La/Th	6,52	3,75	5,16	3,25	1,84
Sm/Nd	0,20	0,16	0,17	0,17	0,16
Th/U	0,97	1,94	8,69	19,38	80,45



Gambar 4. Rasio kelimpahan oksida utama dan UTJ setiap horizon pelapukan terhadap batuan induk: a) SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O_{3T}, dan UTJ; dan b) MnO, CaO, MgO, K₂O, dan P₂O₅

PEMBAHASAN

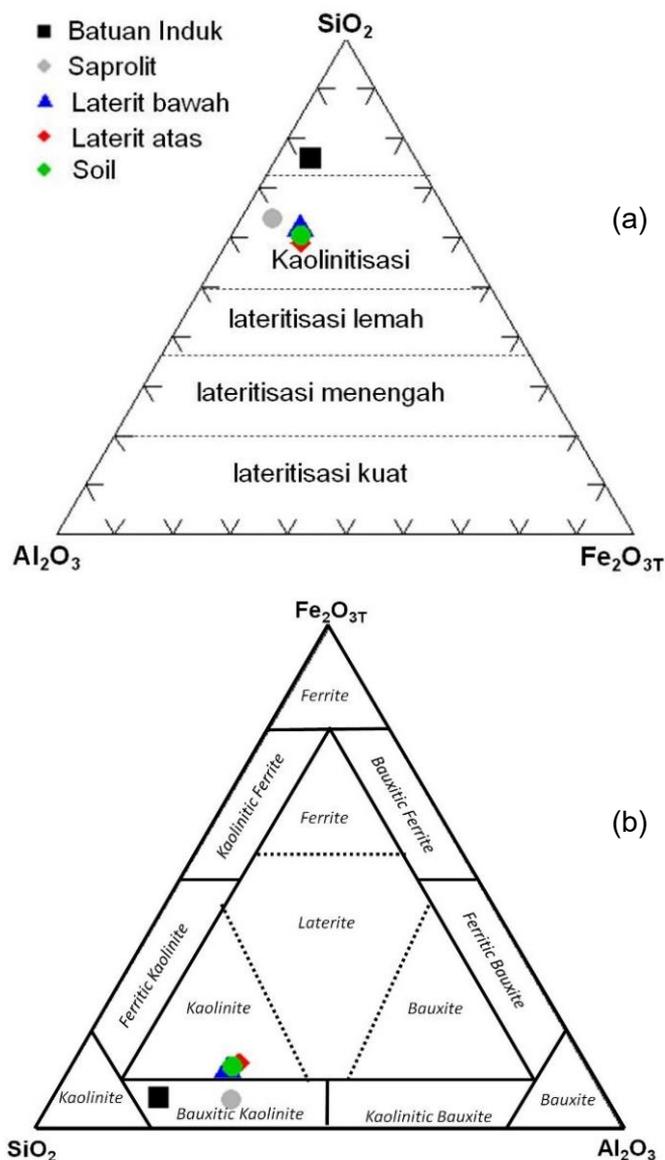
Proses Kaolinitisasi

Mayoritas oksida utama pada horizon pelapukan adalah SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O_{3T} dengan rerata 51,12%, 23,64%, dan 8,74% secara berurutan. Diagram segitiga untuk membedakan jenis pelapukan berdasarkan kadar SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O_{3T}. Berdasarkan

diagram tersebut, seluruh sampel hasil pelapukan berada dalam bidang kaolinitisasi (Gambar 5a). Menggunakan perbandingan oksida yang sama, terdapat diagram segitiga lainnya untuk membedakan kaolinitisasi, feritisasi, dan bauksitisasi pada proses pelapukan. Pelapukan batuan pada profil yang dipelajari lebih mengarah ke kaolinitisasi

dari pada bauksitisasi maupun pengayaan besi sebagaimana terlihat pada Gambar 5b. Hanya horizon saprolit yang berkarakter *bauxitic kaolinite* karena berkadar alumina paling tinggi. Meskipun terjadi peningkatan, kadar alumina dan besi pada profil di sini masih lebih kecil dibandingkan dengan *stockpile* bauksit di Pulau Selayar (Irzon, 2018). Bahan yang telah lama tak terjual di wilayah Kepulauan Riau tersebut memiliki kandungan Al_2O_3 dan Fe_2O_{3T} masing-masing sebesar 37% dan 23,84%, secara berurutan.

Pada tahap awal pelapukan, oksida alkali dan alkali tanah (K_2O , Na_2O , CaO , dan MgO) mudah terlarut akibat reaksi mineral mudah lapuk dengan larutan asam yang dapat berasal dari air hujan (Fernández-Caliani dan Cantano, 2010). Felspar dan mika, terutama biotit, disebut sebagai dua jenis mineral yang paling rentan terhadap kaolinitisasi dengan mekanisme yang telah dijabarkan oleh Fernandez-Caliani (2018) seperti pada persamaan 2-4 berikut ini:



Gambar 5. Dua diagram segitiga komposisi Al_2O_3 - SiO_2 - Fe_2O_{3T} mengenai pelapukan: a) Horizon pelapukan pada profil yang dipelajari dikategorikan mengalami kaolinitisasi; dan b) profil di Puncak Mandeh cenderung mengalami pengayaan kaolinit daripada bauksit maupun ferit (sumber Aleva (1994))

Tabel 3. Beberapa koefisien korelasi yang penting pada studi kaolinitisasi di Puncak Mandeh

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	ΣUTJ	Nb	Ta	Th
SiO ₂	1,00	-0,45	-0,90	0,99	0,97	0,97	0,96	0,90	-0,51	-0,49	-0,64
TiO ₂		1,00	0,06	-0,43	-0,25	-0,24	-0,22	-0,55	0,98	0,85	0,87
Al ₂ O ₃			1,00	-0,87	-0,96	-0,95	-0,96	-0,82	0,10	0,10	0,35
MnO				1,00	0,97	0,97	0,96	0,82	-0,52	-0,51	-0,60
CaO					1,00	1,00	1,00	0,84	-0,33	-0,29	-0,51
K ₂ O						1,00	1,00	0,84	-0,32	-0,29	-0,51
P ₂ O ₅							1,00	0,83	-0,31	-0,25	-0,51
ΣUTJ								1,00	-0,55	-0,40	-0,79
Nb									1,00	0,83	0,89
Ta										1,00	0,56
Th											1,00

Karakter UTJ

Kadar UTJ pada penelitian ini telah dinormalisasi terhadap konsentrasi *chondrite* (Boynton, 1984) untuk menghilangkan efek Oddo-Harkins dan diplot ke dalam diagram laba-laba. Jumlah UTJ pada setiap sampel berada pada rentang 8 hingga 100 kali komposisi *chondrite* (Gambar 6a). Kemiringan curam dapat diperhatikan pada kenaikan nomor atom dari UTJ-ringan, sedangkan UTJ-berat cenderung landai. Hampir seluruh unsur pada grup UTJ berkarakter sama, diantaranya yaitu terdapat di alam dengan bilangan oksidasi +3 kecuali Ce dan Eu. Cerium juga terdapat di alam dengan bilangan oksidasi +4 sedangkan Europium dengan valensi +2. Oleh sebab itu, besaran anomali pada kedua unsur tersebut dijadikan petunjuk mengenai proses pembentukan batuan, korelasi antar batuan, alterasi, maupun pelapukan (Burnham dan Berry, 2014; Irzon dkk., 2020; Arianto dkk., 2020). Nilai anomali Ce (Ce/Ce*) dan Eu (Eu/Eu*) dihitung berdasarkan persamaan (5) dan (6) berikut:

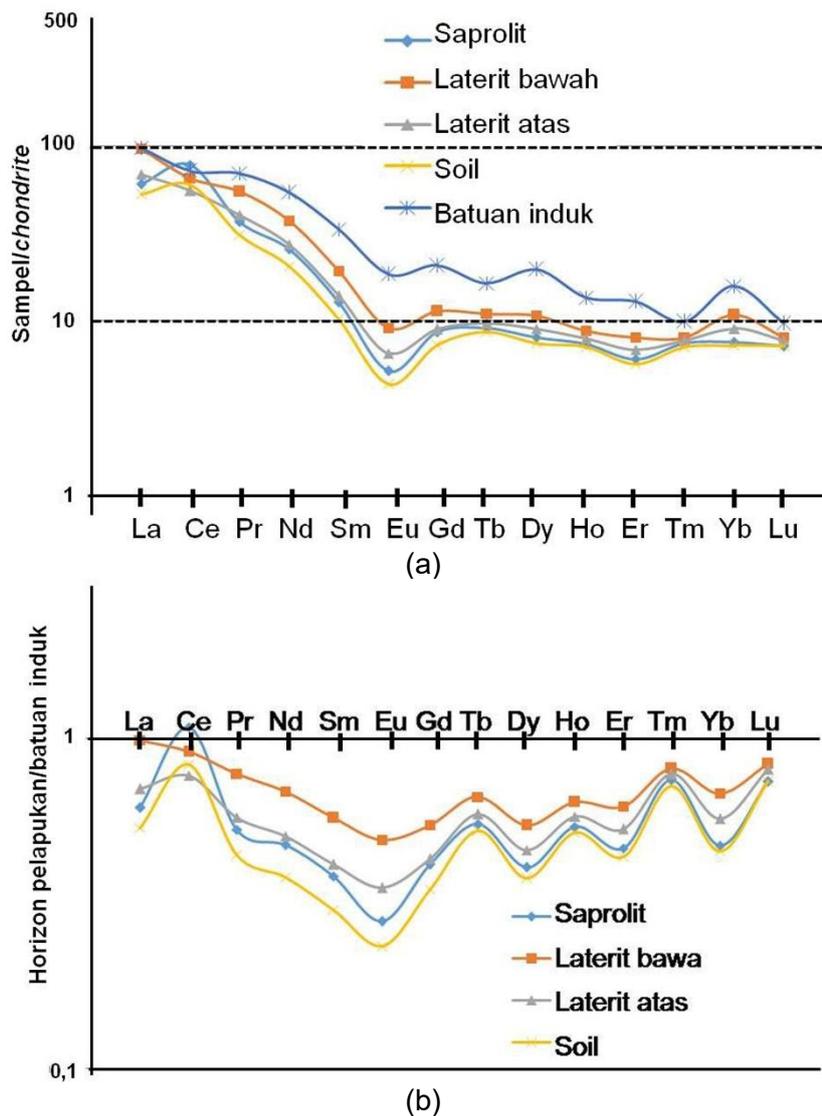
$$Ce/Ce^* = Ce_N^2 / (La_N \times Pr_N) \dots\dots\dots 5$$

$$Eu/Eu^* = Eu_N^2 / (Sm_N \times Gd_N) \dots\dots\dots 6$$

Ce_N, La_N, Pr_N, Eu_N, Sm_N, dan Gd_N adalah hasil normalisasi jumlah setiap elemen pada sampel terhadap konsentrasi *chondrite*

(Boynton, 1984). Ce/Ce* tampak beragam dalam rentang 0,76 (batuan induk) hingga 2,72 (saprolit). Pada sisi lain, Anomali Eu negatif terindikasi pada seluruh sampel pada kisaran Eu/Eu* dari 0,12 (horizon soil) sampai 0,31 (batuan induk).

Ce diketahui dapat terfraksionasi dari sesama UTJ lain selama proses pelapukan basal, granit, batuan metamorf, batuan sedimen, dan meteorit akibat perubahan dari Ce³⁺ menjadi Ce⁴⁺ (Yusuf dkk., 2013; Irzon, 2018; Tohar dkk., 2020; Yaraghi dkk., 2020). Pada keempat horizon pelapukan, horizon laterit bawah memiliki konsentrasi UTJ yang paling tinggi. Namun demikian, kadar Ce tertinggi justru terdapat pada horizon saprolit. Hal ini dapat disebabkan oleh pembentukan CeO₂ yang bersifat stabil dan tidak mobile pada horizon saprolit. Pada tahap pelapukan selanjutnya, ion-ion UTJ lain berpindah ke horizon di atasnya, sedangkan Ce⁴⁺ dalam bentuk CeO₂ tetap tertinggal di horizon saprolit untuk menjelaskan variasi komposisi Ce pada profil yang dipelajari. Kerentanan mineral felspar pada tahap awal pelapukan dikonfirmasi oleh penurunan nilai Eu/Eu* secara drastis dari batuan induk menuju saprolit. Eu/Eu* tidak banyak berubah di empat horizon pelapukan karena sebagian besar felspar maupun mika telah lapuk di horizon saprolit (Bazilevskaya dkk., 2013; Abedini dan Calagari, 2016).



Gambar 6. Diagram laba-laba UTJ pada studi ini: a) konsentrasi pada setiap sampel dinormalisasi terhadap kadar *chondrite*; dan b) rasio komposisi setiap horizon pelapukan terhadap batuan induk

Pola yang mirip dapat diamati pada diagram normalisasi komposisi setiap horizon pelapukan terhadap batuan induk (Gambar 6b) untuk menekankan keseragaman derajat mobilitas UTJ. Hanya kandungan Ce pada saprolit lebih tinggi daripada batuan induk, sedangkan unsur lain pada horizon manapun terdeteksi lebih rendah. Deret Nd hingga Gd tampak mengalami penurunan kadar paling berat pada setiap horizon pelapukan. Terdapat korelasi positif kuat antara kadar UTJ terhadap SiO_2 dengan koefisien korelasi (r) 0,90, MnO ($r = 0,82$), CaO ($r = 0,84$), K_2O ($r = 0,84$), dan P_2O_5 (0,83) seperti dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan korelasi tersebut terdapat

kemungkinan bahwa apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$) merupakan mineral yang berasosiasi dengan UTJ pada pelapukan di Puncak Mandeh. Pada sisi lain, kecil kemungkinan bahwa UTJ di sini berasosiasi dengan monasit berdasarkan berkorelasi negatif jumlah UTJ terhadap Th dan Al dengan koefisien korelasi -0,79 dan -0,82 secara berurutan (Tabel 3). Kesimpulan ini dapat dikonfirmasi melalui studi petrografi pada masa mendatang.

Beberapa rasio yang melibatkan elemen UTJ banyak dimanfaatkan dalam studi pelapukan, seperti $(\text{La}/\text{Yb})_N$, La/Th , dan Sm/Nd . Ukuran fraksionasi UTJ sebagai

indikasi pemisahan antara UTJ-ringang dan UTJ-berat selama proses geokimia dihitung berdasarkan rasio $(La/Yb)_N$ (Su dkk., 2017; Yussof dkk., 2019; Ohandja dkk., 2020; Yaraghi dkk., 2020). Meskipun dalam rentang yang sempit, proses pelapukan di Puncak Mandeh meningkatkan derajat fraksionasi UTJ ($(La/Yb)_N = 6,19$) pada batuan induk hingga mencapai maksimal pada horizon laterit bawah ($(La/Yb)_N = 8,96$) seperti tercantum pada Tabel 2. Peningkatan rasio tersebut menunjukkan presipitasi UTJ-ringang yang lebih baik selama proses pelapukan dibandingkan dengan UTJ-berat. Kecuali pada batuan induk, ratio La/Th (1,84 - 3,75) maupun Sm/Nd (0,16 - 0,20) relatif konstan di keempat horizon pelapukan. Konsistensi tersebut bermakna bahwa meski telah terjadi fraksionasi UTJ pada keempat horizon pelapukan, perubahan jumlahnya tidak substansial (Sahoo dkk., 2017).

KESIMPULAN

Batuan gunungapi di daerah penelitian telah mengalami proses kaolinisasi akibat pelapukan. Meskipun kadar alumina dan besi mengalami peningkatan akibat pelapukan, jumlahnya belum berkategori ekonomis. Kaolinisasi berasosiasi dengan penurunan drastis kelimpahan K_2O , CaO, dan MgO dari batuan induk ke horizon saprolit tetapi dengan derajat perubahan yang relatif minimum pada horizon-horizon lain. Proses ini kemungkinan besar terjadi akibat perubahan feldspar dan mika. Diagram normalisasi konsentrasi UTJ menunjukkan pola yang serupa, yaitu penurunan curam pada UTJ-rendah dan cenderung lebih landai pada UTJ-berat. Tidak terdapat pengayaan UTJ pada horizon pelapukan tertentu pada profil yang diteliti. Pembentukan Ce^{4+} membuat beberapa bagian dari Ce tertinggal pada horizon saprolit. Kondisi ini mengakibatkan derajat mobilisasi Ce menuju horizon pelapukan selanjutnya berbeda dengan UTJ lain. Pelapukan felspar-mika dan dugaan apatit sebagai mineral yang berasosiasi terhadap UTJ dapat dijelaskan melalui analisis mikroskopis pada masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada Kepala Pusat Survei Geologi atas izin penggunaan data dalam studi ini. Dana penelitian ini berasal dari kegiatan eksplorasi UTJ Bidang Geosains Pusat Survei Geologi di wilayah Sumatra Barat. Bapak Joko Subandrio telah memberi banyak masukan mengenai penggunaan data geokimia. Terimakasih atas asistensi Ibu Irfanny Agustiani, Ibu Erna, Ibu Indah, dan Ibu Citra dalam analisis laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Abedini, A. and Calagari, A. A., 2016. Geochemical characteristics of the Arabshah kaolin deposit, Takab geothermal field, NW Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(9), 548.
- Alam, S. Sunarminto, B. H. and Siradz, S.A., 2012. Karakteristik bahan induk tanah dari formasi geologi kompleks ultramafik di Sulawesi Tenggara. *Jurnal Agroteknos*, 2(2), hal. 112-120.
- Aleva, G.J.J., 1994. *Laterites: Concepts, Geology, Morphology and Chemistry*. Wageningen, Netherlands: International Soil Reference and Information Centre (ISRIC).
- Arianto, Sosidi, H. Prismawiryanti dan Pusptasari, D.J., 2020. Pemisahan Logam Tanah Jarang dari Limbah (Tailing) Emas Poboya dengan Metode Pengendapan. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 6(1), hal.9-17.
- Babechuk M.G., Widdowson M., and Kamber B.S. 2014. Quantifying chemical weathering intensity and trace element release from two contrasting basalt profiles, Deccan Traps, India. *Chem Geol* 363, p.56–75.
- Bazilevskaya, E., Lebedeva, M., Pavich, M., Rother, G., Parkinson, D. Y., Cole, D., and Brantley, S. L., 2013. Where fast weathering creates thin regolith and slow weathering creates thick regolith. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), p.847-858.

- Boynton, W.V. (1984). Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2, 63-114, 1984.
- Burnham, A.D. and Berry, A.J., 2014. The effect of oxygen fugacity, melt composition, temperature and pressure on the oxidation state of cerium in silicate melts. *Chemical Geology*, 366, p.52-60.
- Du, X., Rate, A.W. and Gee, M.M., 2012. Redistribution and mobilization of titanium, zirconium and thorium in an intensely weathered lateritic profile in Western Australia. *Chemical Geology*, 330, p.101-115.
- dos Santos, J.C.B., Le Pera, E., de Oliveira, C.S., de Souza Júnior, V.S., de Araújo Pedron, F., Corrêa, M.M. and de Azevedo, A.C., 2019. Impact of weathering on REE distribution in soil-saprolite profiles developed on orthogneisses in Borborema Province, NE Brazil. *Geoderma*, 347, p.103-117.
- Fernández-Caliani, J.C. and Cantano, M., 2010. Intensive kaolinization during a lateritic weathering event in South-West Spain: mineralogical and geochemical inferences from a relict paleosol. *Catena*, 80(1), p.23-33.
- Fernández-Caliani, J.C., 2018. Rare-earth element and stable isotope signatures of kaolin from a Pliocene lateritic weathering profile at mid-latitude region (Andalusia, Spain): Implications for paleoweathering and paleoclimatic reconstructions. *Catena*, 167, p.160-170.
- Garzanti, E., Padoan, M., Setti, M., López-Galindo, A. and Villa, I.M., 2014. Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa). *Chemical Geology*, 366, p.61-74.
- Handoko, A.D. and Sanjaya, E., 2018, February. Characteristics and genesis of Rare Earth Element (REE) in western Indonesia. In *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* (Vol. 118, p. 012077).
- Irzon, R., Syafri, I., Hutabarat, J. and Sendjaja, P., 2016. REE Comparison Between Muncung Granite Samples and their Weathering Products, Lingga Regency, Riau Islands. *Indonesian Journal on Geoscience*, 3(3), p.149-161.
- Irzon, R., 2017. Pengayaan Logam Berat Mn, Co, dan Cr pada Laterit Nikel di Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 12(2), p.71-86.
- Irzon, R., 2018. Limbah Pencucian Bauksit Sebagai Sumber Unsur Tanah Jarang Potensial; Studi Kasus Pulau Selayar, Provinsi Kepulauan Riau. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 13(1), hal. 45-57.
- Irzon, R. and Abdullah, B., 2018. Element Mobilization During Weathering Process of Ultramafic Complex in North Konawe Regency, Southeast Sulawesi Based on A Profile from Asera. *Indonesian Journal on Geoscience*, 5(3), p.277-290.
- Irzon, R., Syafri, I., Hutabarat, J., Sendjaja, P. and Permanadewi, S., 2018. Heavy metals content and pollution in tin tailings from Singkep Island, Riau, Indonesia. *Sains Malaysiana*, 47(11), p.2609-2616.
- Irzon, R., Syafri, I., Ghani, A. A., Prabowo, A., Hutabarat, J. and Sendjaja, P., 2020. Petrography and geochemistry of the Pinkish Lagoi Granite, Bintan Island: Implication to magmatic differentiation, classification, and tectonic history. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 69, p.27-37.
- Irvani, I., 2017. Bentang Alam dan Pelapukan Batuan Beku Granit pada Lokasi Tapak PLTN di Teluk Inggris dan Sekitarnya Kabupaten Bangka Barat. In *Proceedings of National Colloquium Research and Community Service* (vol. 1, 5 p).
- Labus, M. and Bochen J., 2012. Sandstone degradation: an experimental study of accelerated weathering. *Environ Earth Sci*, 67, p.2027–2042.

- Liu, S., Suardi, I., Zheng, M., Yang, D., Huang, X. and Tong, P., 2019. Slab morphology beneath northern Sumatra revealed by regional and teleseismic traveltome tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(10), p.10544-10564.
- Marfil, S. and Maiza, P., 2012. Geochemistry of hydrothermal alteration in volcanic rocks. *Geochemistry–Earth’s System Processes*, pp.39-60.
- Meshram, R., Bhondwe, A., Jawadand, S., Raut, T., Dandekar, S., Joshi, V. and Randive, K., 2019. Formation of Lateritic Kaolin Deposit over Hoskote-Kolar Granodiorite: A Case Study from Nandigudi and Bavanhalli Localities, Kolar District, Karnataka. *Journal of Applied Geochemistry*, 21(2), p.201-211.
- Metcalfe I., 2017, Tectonic evolution of Sundaland, *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 63, p.27 – 60.
- Ohandja, H.N., Onana, V.L., Tang, S.D.N., Ze, A.N.O. and Ekodeck, G. E., 2020. Behavior of major, trace, and rare earth elements in an atypical lateritic profile overlying micaceous quartzites, Centre Cameroon: imprint of the parent rock structure. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(17), p.1-16.
- Permanajadi, I., Zakaria, Z., Hadian, M.S.D., Anwar, H.Z., dan Setijadi, E., 2018. Kajian Petrografi pada Zona Pelapukan Breksi Piroklastik terhadap Longsor Gunung Pawinihan, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah. *Dinamika Rekayasa*, 14(1), p.9-16.
- Pierre, C., Blanc-Valleron, M.M., Caquineau, S., März, C., Ravelo, A.C., Takahashi, K. and Zarikian, C.A., 2016. Mineralogical, geochemical and isotopic characterization of authigenic carbonates from the methane-bearing sediments of the Bering Sea continental margin (IODP Expedition 323, Sites U1343–U1345). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 125, p. 133-144.
- Rosidi, H.M.D., Tjokrosapoetro, S., Pendowo, B., Gafoer S. dan Suharsono, 1996. Peta Geologi Lembar Painan dan Bagian Timurlaut Lembar Muarasiberut, Sumatera, skala 1: 250.000. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung*.
- Sahoo, P.K., Guimarães, J.T.F., Souza-Filho, P.W.M., da Silva, M.S., Júnior, W.N., Powell, M.A., ... & Costa, V.E., 2017. Geochemical characterization of the largest upland lake of the Brazilian Amazonia: Impact of provenance and processes. *Journal of South American Earth Sciences*, 80, p.541-558.
- Sanematsu, K., Kon, Y. and Imai, A., 2015. Influence of phosphate on mobility and adsorption of REEs during weathering of granites in Thailand. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111, p.14-30.
- Su, N., Yang, S., Guo, Y., Yue, W., Wang, X., Yin, P. and Huang, X., 2017. Revisit of rare earth element fractionation during chemical weathering and river sediment transport. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(3), p.935-955.
- Tohar, S.Z. and Yunus, M.M., 2020. Mineralogy and BCR sequential leaching of ion-adsorption type REE: A novelty study at Johor, Malaysia. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 102947.
- Tupaz, C.A.J., Watanabe, Y., Sanematsu, K., Echigo, T., Arcilla, C. and Ferrer, C., 2020. Ni-Co Mineralization in the Intex Laterite Deposit, Mindoro, Philippines. *Minerals*, 10(7), 579.
- Yaraghi, A., Ariffin, K.S. and Baharun, N., 2020. Comparison of characteristics and geochemical behaviors of REEs in two weathered granitic profiles generated from metamictized bedrocks in Western Peninsular Malaysia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 104385.

Yusoff, Z.M., Ngwenya, B.T. and Parsons, I., 2013. Mobility and fractionation of REEs during deep weathering of geochemically contrasting granites in a tropical setting, Malaysia. *Chemical Geology*, 349, p.71-86.

Zulkarnain, I. (2016). Sumatra is not a Homogeneous Segment of Gondwana Derived Continental Blocks: A New Sight based on Geochemical Signatures of Pasaman Volcanic in West Sumatera. *RISSET Geologi dan Pertambangan*, 26(1), p.1-13.

Diterima	: 3 November 2020
Direvisi	: 23 Januari 2021
Disetujui	: 31 Mei 2021

TINJAUAN PUSTAKA KARAKTERISASI DAN POTENSI PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH (FABA)

REVIEW ON CHARACTERIZATION AND UTILIZATION POTENTIAL OF FLY ASH AND BOTTOM ASH (FABA)

Ferian Anggara^{1,2}, Himawan T.B.M. Petrus^{2,3*}, Dea Anisa Ayu Besari¹, Hotden Manurung³, dan Febry Yulindra Abdi Saputra²

¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Pusat Kajian Sumberdaya Bumi Non-Konvensional, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

³Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*bayupetrus@ugm.ac.id

ABSTRAK

*Fly ash dan bottom ash (FABA) merupakan limbah hasil sisa pembakaran batubara dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). FABA yang dihasilkan akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang harus dipenuhi. Komposisi FABA secara umum berupa silika, alumina, oksida besi, dan senyawa oksida lainnya. Abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara berpotensi secara ekonomis karena mengandung beberapa unsur berharga antara lain Ge, Ga, unsur tanah jarang (REY), Nb, Zr, V, Re, Au, Ag, dan logam dasar seperti Al. Karakteristik fisik dan kimia FABA merupakan aspek penting yang dapat memengaruhi, baik potensi penggunaan maupun metode pembuangan atau penyimpanan limbah yang akan dilakukan. Potensi pemanfaatan FABA telah banyak digunakan pada bidang geoteknik, salah satunya diaplikasikan sebagai material geopolimer. Selain itu, FABA juga mengandung *cenosphere* yang merupakan salah satu material bernilai ekonomis tinggi dan telah banyak diaplikasikan pada berbagai bidang industri. Berbagai teknik pemisahan material untuk meningkatkan potensi nilai guna FABA telah berhasil dikembangkan, antara lain metode ekstraksi *cenosphere*, logam berharga serta unsur jejak seperti REY, juga *unburned carbon*.*

Kata kunci: FABA, komposisi, pemanfaatan, REY, *cenosphere*, geopolimer

ABSTRACT

Fly ash and bottom ash (FABA) is defined as waste residu that is produced from coal combustion process in electric power plant. Its production will increase due to high demand of electric energy. It commonly consists of silica, alumina, ferric oxide, and others oxide. Coal ash is also an economically promising resource for extraction of several valuable elements, including Ge, Ga, rare earth elements and yttrium (REY), Nb, Zr, V, Re, Au, Ag, and base metals such as Al. Physical and chemical characteristics of FABA are important because it will affect their option of re-use and disposal method. Other potential utilization for FABA was involved geotechnical applications such as geopolymer material. Cenospheres are one of the most valuable materials found in FABA. To increase the potential use of FABA, many separation techniques have been developed to extract the value-added components, including: cenospheres, valuable metal and trace elements such as rare earth element and yttrium (REY), also the unburned carbon.

Keywords: FABA, composition, utilization, REY, *cenosphere*, geopolymer

PENDAHULUAN

Pembakaran batubara tidak hanya menghasilkan energi listrik namun juga menghasilkan limbah abu sisa pembakaran berupa *fly ash* dan *bottom ash* (FABA). Jumlah konsumsi batubara untuk kelistrikan dan bidang manufaktur pada tahun 2019 telah mencapai 138,42 juta ton (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2019), dengan estimasi limbah FABA yang dihasilkan diperkirakan akan mencapai 5% dari jumlah total batubara yang dibakar sehingga pada tahun 2019 diperkirakan mencapai 6,92 juta ton.

Berdasarkan pada Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021 tentang penyelenggaraan perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, FABA yang dihasilkan dari proses pembakaran batubara pada PLTU digolongkan sebagai limbah non-bahan berbahaya dan beracun (non-B3). Namun, pemanfaatan limbah FABA di dunia secara umum baru mencapai 25% dari jumlah total abu batubara yang dihasilkan dan 75% sisanya terbuang percuma sebagai limbah dan polusi (Sommerville *et al.*, 2013; Blissett and Rowson, 2012).

Karakterisasi sifat fisik dan komposisi penyusun FABA secara komprehensif telah banyak dilakukan di berbagai negara antara lain Bulgaria, Belanda, Italia, Turki, Yunani (Vassilev and Vassileva, 2007); Amerika Serikat (Kutchko and Kim, 2006), Kanada (Goodarzi, 2006), dan Australia (Ngu *et al.*, 2007). Sementara itu karakterisasi komponen penyusun FABA yang telah dilakukan di Indonesia masih terbatas pada FABA yang dihasilkan oleh PLTU di Pulau Jawa (Besari, 2018).

Karakterisasi FABA menjadi penting untuk dilakukan karena berkaitan dengan sistem daur ulang dan potensi pemanfaatan untuk jenis komponen penyusun FABA yang berbeda (Ranjbar and Kuenzel, 2017; Yao *et al.*, 2015).

Pada artikel ini akan diulas karakterisasi FABA, potensi, dan pemanfaatannya.

METODOLOGI

Artikel ini merupakan hasil tinjauan literatur yang memberikan gambaran karakter FABA dari pembakaran batubara di PLTU. Karakterisasi FABA dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat: fisik, kimiawi, dan geoteknik (Bhatt *et al.*, 2019; Reddy *et al.*, 2018). Karakterisasi FABA juga dapat menentukan pemanfaatan FABA tersebut. Berat jenis merupakan sifat fisik yang sangat penting untuk dianalisis, terkait dengan penggunaan FABA pada bidang geoteknik (Reddy *et al.*, 2018). Uji berat jenis digunakan untuk mengetahui nilai berat jenis FABA yang umumnya berkisar 1,6-3,1 (Bhatt *et al.*, 2019).

Sifat kimiawi FABA dapat dianalisis menggunakan analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX) (Reddy *et al.*, 2018). Metode yang digunakan untuk mengetahui karakteristik geoteknik FABA meliputi analisis distribusi ukuran butir, nilai *Atterberg limits*, kadar air maksimum, densitas kering maksimum, permeabilitas, konduktivitas hidrolis, dan sudut dari friksi internal Φ (Bhatt *et al.*, 2019).

KARAKTERISASI KOMPOSISI FABA

Metode pembakaran batubara yang paling umum, terutama untuk produksi energi dalam skala besar, adalah pembakaran bahan bakar bubuk (*pulverized coal*), juga disebut sebagai pembakaran fase-terfokus atau pembakaran dengan suspensi. Pada proses ini batubara ditumbuk menjadi bubuk halus dan diinjeksikan dengan aliran udara ke ruang tungku, sehingga menyala membentuk bola api pada kisaran suhu antara 1300°C - 1700°C. Sebagian besar abu yang dihasilkan dari proses ini bergerak sebagai partikel tersuspensi bersama dengan gas pembakaran, kemudian ditangkap oleh *electrostatic precipitators* (ESPs) atau peralatan filtrasi partikel lainnya seperti *bag house filter*, dengan abu tersebut dikenal sebagai *Fly Ash* (FA), sedangkan *bottom ash* (BA) adalah abu yang bercampur dengan fragmen hasil

pembakaran lainnya, terlepas dari endapan yang terbentuk pada dinding tungku pembakaran dan kemudian jatuh ke bagian bawah ruang pembakaran (Hower *et al.*, 2017a). FA tersusun oleh material yang bersifat heterogen yang umumnya berbentuk bulat dengan ukuran berkisar antara 0,5 μm – 300 μm sedangkan BA memiliki ukuran yang lebih kasar >0,5 μm (Chiang and Pan, 2017). Komposisi kimia FABA sangat bervariasi tergantung pada komposisi dan ukuran partikel batubara asal.

FA tersusun oleh partikel-partikel serbuk halus yang sebagian besar berbentuk bola, baik padat atau berlubang, dan sebagian besar bersifat amorf. Secara umum, abu batubara memiliki nilai berat jenis sekitar 2,0 namun dapat bervariasi sebagian besar berkisar mulai dari 1,6 s.d. 3,1. Variasi ini disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor seperti bentuk partikel, gradasi, dan komposisi kimia (Pandian, 2013). Berdasarkan distribusi ukuran butirnya, FA tersusun oleh partikel berukuran butir pasir hingga lanau. FA memiliki luas permukaan yang tinggi dengan nilai *bulk density* yang rendah (Ram *et al.*, 2014). Jumlah karbon yang tidak habis terbakar (*unburned carbon* / UC) dan senyawa besi yang tidak terbakar memengaruhi warna FA yang dihasilkan, sehingga dapat bervariasi dari oranye hingga merah tua, cokelat, atau putih hingga kuning (Ahmaruzzaman, 2010).

FA merupakan salah satu material dengan karakteristik yang paling kompleks karena dapat tersusun oleh komposisi mineral yang sangat bervariasi, 188 kelompok mineral yang terdiri dari 316 individu mineral ditemukan menjadi penyusun FA (Vassilev and Vassileva, 2007). Senyawa utama penyusun *coal fly ash* (CFA) adalah SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , dengan jumlah karbon yang bervariasi (direpresentasikan sebagai *loss on ignition* (LOI)), CaO, dan MgO (Sahoo *et al.*, 2016). FA dapat diklasifikasikan berdasarkan peringkat batubara asalnya meliputi FA bituminus, sub-bituminus, dan lignit (Meawad *et al.*, 2010). FA dari pembakaran lignit dan batubara sub-bituminus dicirikan oleh

konsentrasi kalsium dan magnesium oksida yang lebih tinggi dan berkurangnya persentase silika dan besi oksida, serta kandungan karbon yang lebih rendah, dibandingkan dengan FA batubara bituminus.

Sifat fisik dan kimia FA tidak hanya bergantung pada jenis batubara yang digunakan dalam proses pembakaran, namun juga pada teknik yang digunakan untuk membakar batubara. Sifat FA yang dihasilkan dipengaruhi oleh: (i) konfigurasi *boiler*, (ii) kondisi pembakaran dan suhu *boiler*, (iii) ukuran partikel batubara, dan (iv) peralatan *gas cleaning* (Mukherjee *et al.*, 2008).

Rangkuman variasi komposisi kimia FA di seluruh dunia memperlihatkan kelimpahan SiO_2 pada FA di India (50-60%) jauh lebih tinggi jika dibandingkan FA di Cina dan Amerika Serikat (AS) (36-38% hingga 57-58%). FA dari Yunani memiliki kelimpahan SiO_2 terendah khususnya untuk FA dari batubara peringkat lignit, yang secara umum memiliki kandungan SiO_2 rendah (Tabel 1). Kelimpahan Al_2O_3 relatif bervariasi untuk FA dari Cina dibandingkan dengan FA dari negara-negara lain yang terdaftar. Sedangkan kelimpahan Al_2O_3 untuk FA dari Belanda, Yunani, dan Afrika Selatan, tidak terlalu bervariasi. Kelimpahan CaO bervariasi, umumnya di atas 15% untuk FA dari AS, Jerman, Polandia, Yunani, dan Eropa yang secara keseluruhan FA menunjukkan sifat *self-cementing*.

Uji LOI (*loss of ignition*) digunakan untuk mengidentifikasi UC dan oksida logam pada FA (Bhatt *et al.*, 2019). Nilai LOI bervariasi seiring dengan perubahan kondisi proses pembakaran. Kisaran nilai LOI pada FA batubara di Eropa bervariasi umumnya berkisar 30%. Hal ini mengindikasikan banyaknya karbon yang tidak terbakar sehingga dapat mengurangi kegunaan abu terbang (Bhatt *et al.*, 2019).

Studi petrografi yang dilakukan oleh Hower (2012) menunjukkan bahwa FA tersusun oleh komponen anorganik dan organik dari

sis pembakaran batubara, dan material baru (*neoformed*) yang terbentuk pada boiler dan *flue gas stream* (Tabel 2). Hower

et al., (2017a) telah mengklasifikasikan komponen FA berdasarkan tekstur dan genetiknya (Tabel 3).

Tabel 1. Rangkuman variasi komposisi kimia FA dari berbagai negara di dunia

Negara	% Komposisi Kimia											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	LOI
Australia	31,1-68,6	17-33	1-27,1	0,1-5,3	0,1-2,9	0-2	0-0,6	1,2-3,7	0-1,5	0-3,9	nd	na
Banglades	55	24,7	7,7	6,2	1,1	0,7	1,1	na	na	0,9	0,1	na
Bulgaria	30,1-57,4	12,5-25,4	5,1-21,2	1,5-28,9	0,8-2,8	1,1-2,9	0,4-12,7	0,6-1	0,4-1,9	0,1-0,4	0-0,2	0,8-32,8
Kanada	35,5-62,1	12,5-23,2	3-44,7	1,2-13,3	0,5-3,2	0,4-3,1	0,2-7,8	0,4-1	0,1-7,3	0,1-1,5	na	0,3-9,7
Cina	35,6-57,2	18,8-55	2,3-19,3	1,1-7	0,8-0,9	0,7-4,8	1-2,9	0,2-0,7	0,6-1,3	1,1-1,5	nd	nd
Denmark	48-65	26-33	3,3-8,3	2,2-7,8	na	na	na	na	1,1-2,8	na	na	3,1-4,9
Eropa	28,5-59,7	12,5-35,6	2,6-21,2	0,5-28,9	0,4-4	0,6-3,8	0,1-12,7	0,5-2,6	0,1-1,9	0,1-1,7	0-0,2	0,8-32,8
Perancis	47-51	26-34	6,9-8,8	2,3-3,3	na	1,5-2,2	0,1-0,6	na	2,3-6,4	na	na	0,5-4,5
Jerman	20-80	1,0-19	1,0-22	2,0-52	0-2	0,5-11	1,0-15	0,1-1	0-2	na	na	0-5
Yunani	21-35	10-17,9	4,5-8,4	27,3-45	0,4-1	1,5-3,8	4-8,6	na	0,2-1	na	na	3,0-7,0
India	50,2-59,7	14-32,4	2,7-16,6	0,6-9	0,2-4,7	0,1-2,3	na	0,3-2,7	0,2-1,2	na	na	0,5-7,2
Israel	45,6-58,6	24,4-34,5	3-6,7	4,9-9,9	0,1	1,6-2,5	0,6-0,8	1,2-1,9	0-0,1	0,8-1,8	na	6
Italia	41,7-54	25,9-33,4	3-8,8	2,0-10	0-2,6	0-2,4	na	1-2,6	0-1	0-1,5	0-0,1	1,9-9
Jepang	53,9-63	18,2-26,4	4,2-5,7	2-8,1	0,6-2,7	0,9-2,4	0,3-1,4	0,8-1,2	1,1-2,1	na	na	0,5-2,1
Korea	50-55,7	24,7-28,7	3,7-7,7	2,6-6,2	1,1	0,7-1,1	0,5-1,1	na	na	0,9	0,1	4,3-4,7
Meksiko	59,6	22,8	5,6	3,1	1,3	0,9	0,4	0,9	0,5	0	na	na
Belanda	45,1-59,7	24,8-28,9	3,3-9	0,5-6,8	0,6-2,9	0,6-3,7	0,2-1,3	0,9-1,8	0,1-1,2	0,1-1,5	0-0,1	2,7-8,1
Cina Utara	43,7	44	3,5	0,9	0,9	0,4	0,7	1,5	0,3	na	na	10
Polandia	32,2-53,3	4-32,2	4,5-8,9	1,2-29,9	0,2-3,3	1,2-5,9	na	0,6-2,2	0,2-1,5	0,1-0,9	0-0,3	0,5-28
Rusia	40,5-48,6	23,2-25,9	na	6,9-13,2	1,9-2,6	2,6-4	na	0,5-0,6	1,2-1,5	0,3-0,4	0,2-0,4	na
Afrika Selatan	46,3-67	21,3-27	2,4-4,7	6,4-9,8	0,5-1	1,9-2,7	na	1,2-1,6	0-1,3	0,3-0,9	0-0,5	na
Spanyol	41,5-58,6	17,6-45,4	2,6-16,2	0,3-11,8	0,2-4	0,3-3,2	0,1-2,2	0,5-1,8	0-1,1	0,1-1,7	0-0,1	1,1-9,7
Spanyol	41,5-58,6	17,6-35,6	2,6-16	0,8-11,8	0,4-4	0,9-2,5	0,1-2,2	0,5-1,6	0,2-0,8	0,1-1,7	0-0,1	1,1-5,2
Turki	37,9-57	20,5-24,3	4,1-10,6	0,2-27,9	0,4-3,5	1-3,2	0,6-4,8	0,6-1,5	0,1-0,6	0,2-0,3	0	0,4-2,7
Amerika Serikat	34,9-58,5	19,1-28,6	3,2-25,5	0,7-22,4	0,9-2,9	0,5-4,8	0,1-2,1	1-1,6	0,2-1,8	0,1-1,3	na	0,2-20,5
Minimum	20,0	1,0	1,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Maksimum	80,0	55,0	44,7	52,0	4,7	11,0	15,0	3,7	7,3	3,9	0,5	32,8

Keterangan: nd = tidak terdeteksi, na = tidak dianalisis

Sumber: (Bhatt *et al.*, 2019)

Tabel 2. Komponen Penyusun FA

Anorganik	Organik
Material Baru (<i>Neoformed</i>): <ul style="list-style-type: none"> - Glass - Mulit - Spinel - Kapur - Sulfat - Mineral yang teroksidasi 	Material Baru (<i>Neoformed</i>): <ul style="list-style-type: none"> - Arang atau kokas isotropik - Arang atau kokas anisotropik
Turunan dari batubara atau bahan bakar : <ul style="list-style-type: none"> - Kuarsa - Sulfida - Fragmen batuan^a 	Turunan dari batubara atau bahan bakar : <ul style="list-style-type: none"> - Inertinit - Kokas minyak bumi - Karbon biomassa - Karbon pada fragmen batuan^a - Batubara yang terbakar sebagian^b

^aFragmen batuan umumnya memiliki permukaan gelas, mengelilingi mineral yang terbakar dan (terkadang) karbon

^bFragmen batubara yang terbakar sebagian dapat memiliki kenampakan yang menunjukkan berbagai tingkat devolatilisasi

Sumber: (Hower, 2012)

Tabel 3. Klasifikasi genetik dan tekstural komponen penyusun FA

Komponen Penyusun <i>Fly Ash</i> (FA)	
Klasifikasi Genetik	Klasifikasi Tekstural (untuk karbon/arang isotropik dan anisotropik, dan inertinit)
- Karbon/arang isotropik (dari vitrinit atau inertinit)	- <i>Tenuisphere</i>
- Karbon/arang anisotropik (dari vitrinit atau inertinit)	- <i>Crassispere</i>
- Inertinit	- <i>Tenuinetwork</i>
- <i>Glass</i>	- <i>Crassinetwork</i>
- Mulit	- <i>Inertoid</i>
- Spinel	- <i>Fusinoid</i>
- Kuarsa	- <i>Solid</i>
- Sulfida	- <i>Mineroid</i>
- Sulfat	- Campuran material berpori
- Batubara yang tidak terbakar	- Campuran material padatan
- Material organik non-batubara	
- Mineral lain/ material anorganik non-batubara	

Sumber: (Hower *et al.*, 2017a)

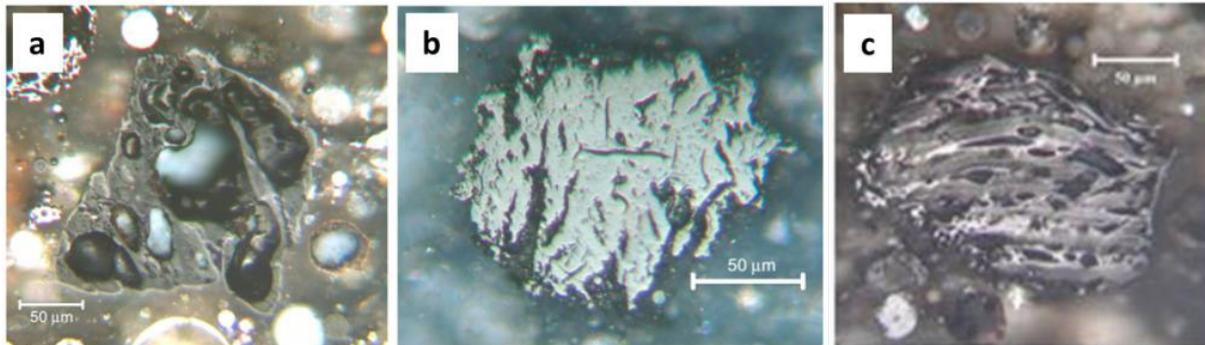
Keterdapatn UC pada FA mengindikasikan inefisiensi proses pembakaran batubara (Hower *et al.*, 2017b). Proporsi UC dalam jumlah yang melimpah mengindikasikan bahwa banyak energi yang hilang ketika proses pembakaran batubara berlangsung. Pembentukan UC dipengaruhi oleh berbagai kombinasi faktor yang meliputi peringkat dan komposisi maseral batubara, penggilingan batubara umpan yang buruk, penggunaan batubara umpan yang tidak cocok untuk *boiler*, serta kondisi pembakaran (Hower *et al.*, 2017b).

Terminologi “*unburned coal*” jarang digunakan, namun pada sebagian besar kasus, hal tersebut tidak dapat merepresentasikan sifat asli karbon yang ada pada FA (Hower *et al.*, 2017b). Batubara peringkat bituminus dengan kategori *caking coal* mengalami pelelehan dengan cepat dan terdevolatilisasi di *boiler*. Beberapa maseral vitrinit meleleh, terdevolatilisasi, dan pada akhirnya melewati *boiler* ke sistem pengumpulan abu. Bentuk asli maseral tersebut secara samar masih dapat dikenali pada beberapa FA (Gambar 1). Karbon pada FA telah mengalami devolatilisasi dan bukan merupakan batubara karena secara kimiawi tidak merepresentasikan partikel batubara aslinya (Hower *et al.*, 2017b). Karbon hasil pembakaran batubara peringkat lignit dan sub-bituminus yang tidak termasuk *caking coal* akan membentuk *char* (Gambar 1(b)).

Maseral inertinit umumnya melewati *boiler* dalam keadaan yang relatif utuh meskipun terdapat indikasi mengalami devolatilisasi dan pembakaran (Gambar 1 (c)). Komposisi FABA secara umum dominan tersusun oleh komponen anorganik meliputi fragmen batuan, kuarsa, mineral pembawa unsur Fe, mineral silikat suhu tinggi, *glass* dan mineral pengikat, serta komponen non-bahan bakar (Hower *et al.*, 2017b). Variasi kelompok mineral yang umum ditemukan pada FA dapat dilihat pada Tabel 4.

(a). Fragmen Batuan dan Kuarsa

Fragmen batuan yang ter vitrifikasi terbentuk karena proses pembakaran batubara yang tidak sempurna (Gambar 2). Pada beberapa kasus, *coked carbons* terlihat pada bagian dalam partikel fragmen batuan, yang menunjukkan bahwa pemanasan cukup untuk medevolatilisasi material organik, tetapi tidak mampu melakukan vitrifikasi secara menyeluruh pada seluruh butiran. Kuarsa merupakan mineral yang paling umum ditemukan pada abu batubara. Kuarsa pada abu batubara dapat berupa kuarsa primer maupun sekunder (a). Fragmen batuan; (b). Kuarsa. (Hower *et al.*, 2017b)). Kuarsa pada umumnya tidak meleleh ketika suhu pembakaran pada *boiler* mencapai 1400-1500°C sehingga dapat ditemukan pada FA dalam bentuk kristalin sebagai kuarsa primer (Hower, 2012).

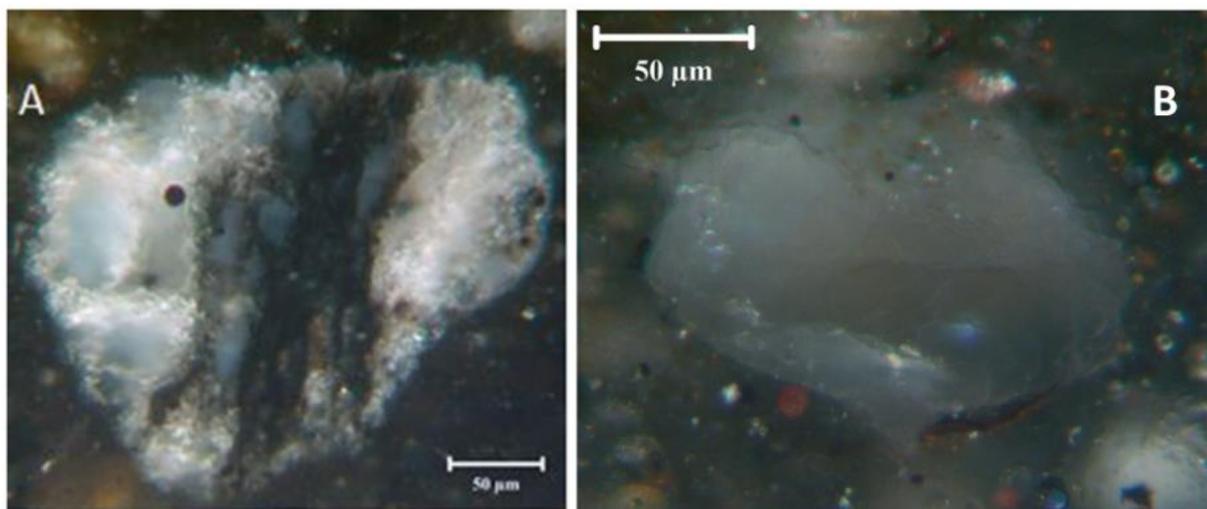


Gambar 1. (a). *Unburned coal*; (b). *Char*; (c). *Karbon turunan maseral inertinit*
 Sumber: (Hower *et al.*, 2017b)

Tabel 4. Skema perubahan mineral pada batubara selama proses pembakaran

Komponen Mineral	Pembakaran
Ca, Na, dll (pada karboksilat)	Kebanyakan menjadi sulfat; dapat pula bereaksi dengan SiO ₂ , dll, untuk membentuk silikat
Pirit	Teroksidasi menjadi hematit (Fe ₂ O ₃) atau magnetit (Fe ₃ O ₄); bereaksi dengan silikat
Karbonat	Terdisosiasi menjadi oksida; bereaksi dengan silikat
Mineral Lempung	Dehidrasi dan <i>sintering</i> ; kemungkinan menjadi mulit; reaksi produk dengan Fe ₂ O ₃ dari pirit, CaO dari karbonat, dan SiO ₂ , dll
Kuarsa	<i>Relict</i> ; bereaksi dengan aluminasilikat dari mineral lempung, dengan CaO dan Fe ₂ O ₃ untuk membentuk fase silikat kristal dan cair

Sumber: (Mraw *et al.*, 1983)



Gambar 2. (a). *Fragmen batuan*; (b). *Kuarsa*
 Sumber: (Hower *et al.*, 2017b)

(b). *Mineral Pembawa Unsur Fe*
 Mineral pembawa unsur Fe dapat bereaksi untuk membentuk senyawa oksida besi yang terpisah, namun Fe dalam bentuk lain

(misalnya bahan anorganik nonmineral) dapat berinteraksi dengan residu aluminosilikat dan berpotensi mengakibatkan *slagging* (Gambar 3).

Dekomposisi pirit dalam api pembakaran berlangsung cepat: 400 ms untuk pirit 53-63 μm dan 575 ms untuk pirit 75-90 μm , dimana transformasi awal dari pirit (Py) adalah ke pirotit (Po) (Srinivasachar *et al.*, 1990). Pada suhu pembakaran 1500°K dan S/(S-Fe) bernilai <0,1 atau 1400°K dan nilai S/(S-Fe) <0,17, magnetit mengalami kristalisasi dari lelehan. Konversi magnetit menjadi hematit terjadi secara lambat dan terbatas secara kinetik, membutuhkan lebih banyak waktu pada zona panas di dalam *furnace*. Hematit terbentuk dari proses dekomposisi mineral sulfida besi pada kondisi oksidasi. Hematit umumnya stabil pada suhu di bawah 1400°C. Berbeda dengan butiran pirit bebas, pirit dalam *clay bands* cenderung menyatu dengan mineral lempung dan silika untuk membentuk *glass* Fe-K-Al-Si (Abbott and Austin, 1985; Srinivasachar *et al.*, 1990).

Dalam nomenklatur petrografi istilah "spinel" digunakan sebagai kategori mineral yang luas, termasuk magnetit. Banyak mineral dalam keluarga spinel memiliki struktur cacat dan mencakup sejumlah elemen seperti Al, Mg, Ni, Cr, dan lainnya. Besi dalam mineral sekunder berasal dari dekomposisi Fe-sulfida dan mineral-mineral lain yang mengandung Fe dalam batubara. Mineral spinel dapat membentuk baik

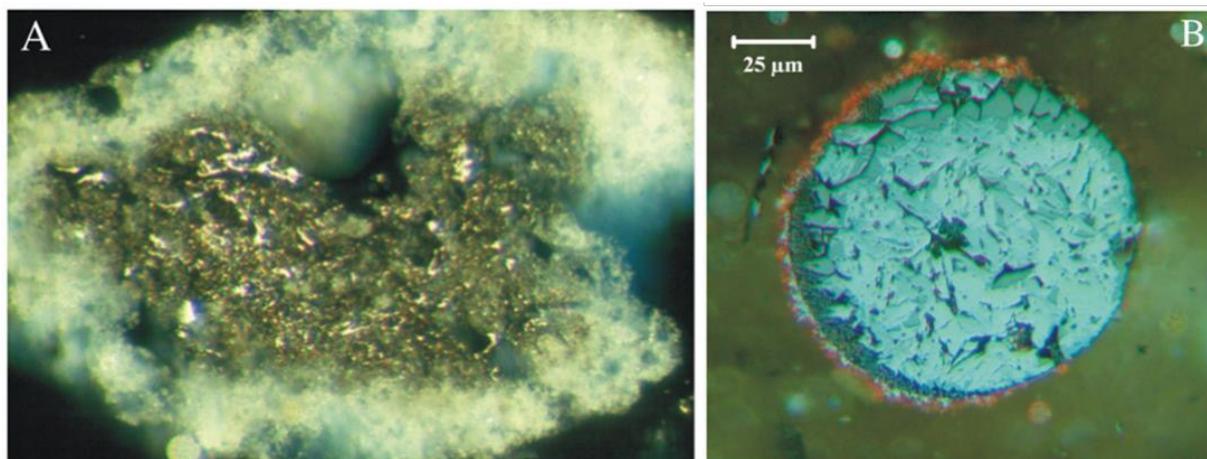
struktur dendritik halus maupun kasar dalam matriks *glass* (Gambar 3(b)).

(c). Mineral Silikat Suhu Tinggi

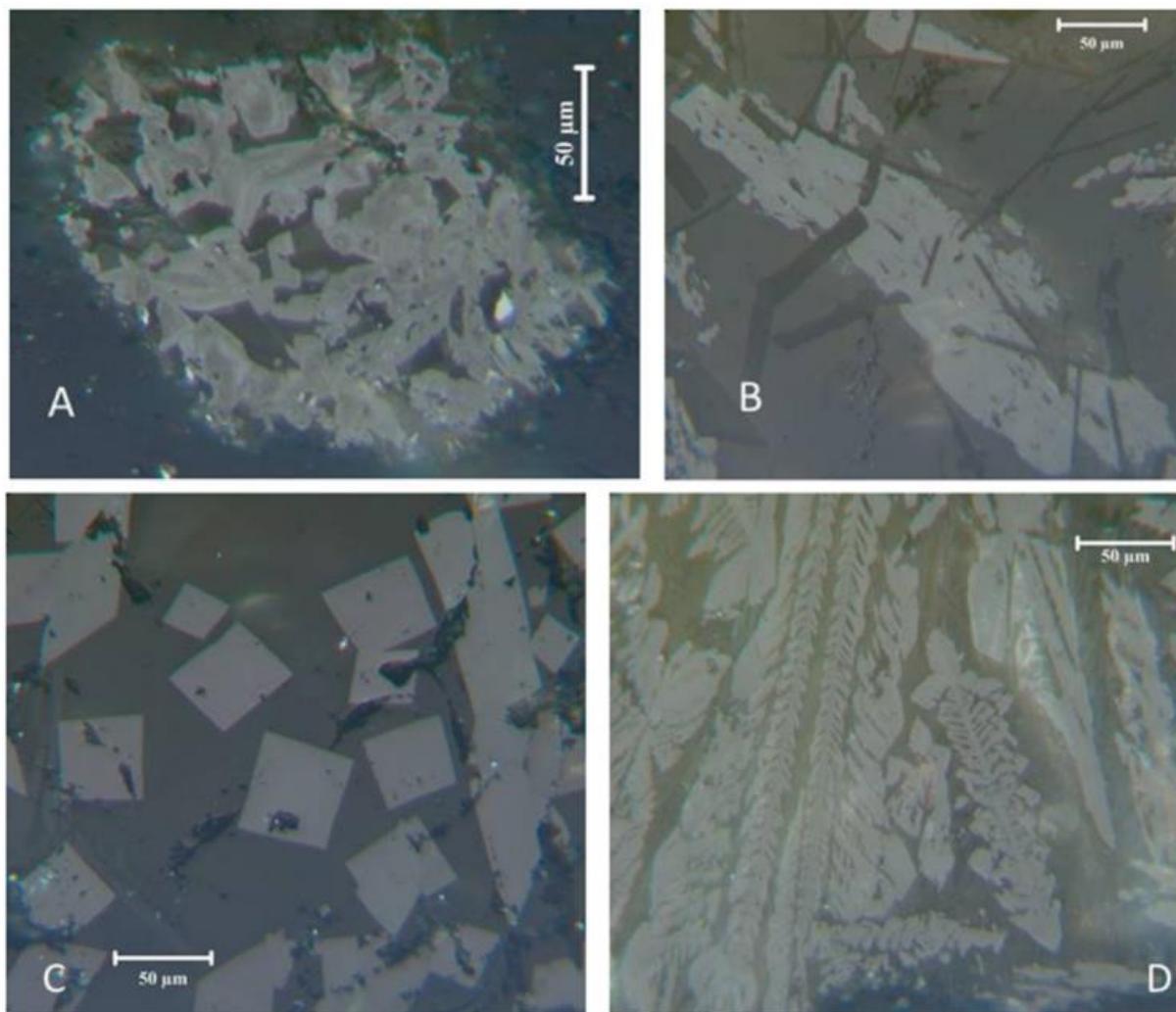
Mulit, anortit, dan mineral Al-Si lainnya dapat terbentuk melalui reaksi pada kondisi padat atau dapat mengkristal dari lelehan (Gambar 4). Fase mineral tergantung pada suhu yang dicapai dan kecepatan pendinginan, maupun komposisi kimia bahan serta potensi interaksi antara fase yang terlibat. Komponen BA cenderung mendingin lebih lambat dibanding FA. Pada sistem CaO-Al₂O₃-SiO₂, kristalisasi mulit terjadi pada rentang suhu 1200–1300°C.

(d). *Glass* dan Mineral Pengikat

Glass aluminosilikat amorf merupakan komponen yang umum ditemukan pada FABA (Gambar 5) yang terbentuk pada suhu di atas 1000°C. *Glass* berdasarkan morfologinya dapat dibedakan menjadi *cenospheres* (berbentuk bulat) dan *pleiospheres* (tidak berbentuk bulat sempurna). Material amorf (*glass*) kurang melimpah (57%-82%) pada abu yang dihasilkan dari sistem pembakaran FBC jika dibandingkan dengan pembakaran menggunakan sistem *pulverized-coal* yang menghasilkan *glass* mencapai 80%-97%. Hal tersebut terjadi disebabkan suhu operasional pada sistem FBC lebih rendah.



Gambar 3. (a).Fragmen batuan dengan *glassy rim*; (b). Dendritik spinel
Sumber: (Hower *et al.*, 2012)



Gambar 4. Mulit dan *neoformed minerals*
 Sumber: (Hower *et al.*, 2017b)

(e). Komponen Non-bahan Bakar

Material asing non-bahan bakar dapat ditemukan pada FABAs (Gambar 6) menunjukkan sepotong logam dengan struktur pelarutan yang bukan terbentuk dari mineral pada batubara asal melainkan dapat berasal dari bagian-bagian tabung uap yang terkelupas dalam boiler, pulverizer, dan dari tempat-tempat lain di sepanjang jalur yang dilewati batubara atau gas buang dan FA (Hower *et al.*, 2017b).

Karakteristik FA yang dihasilkan dari PLTU di Pulau Jawa tersusun oleh glass (50,7%), kuarsa (19,7%), mulit (12,6%), Mg-spinel (12,2%), Fe-spinel (9,5%), hematit (9,8%), magnetit (14,4%), K-felspar (4,9%), dan UC berkisar 12,4% (Besari, 2018). Sedangkan

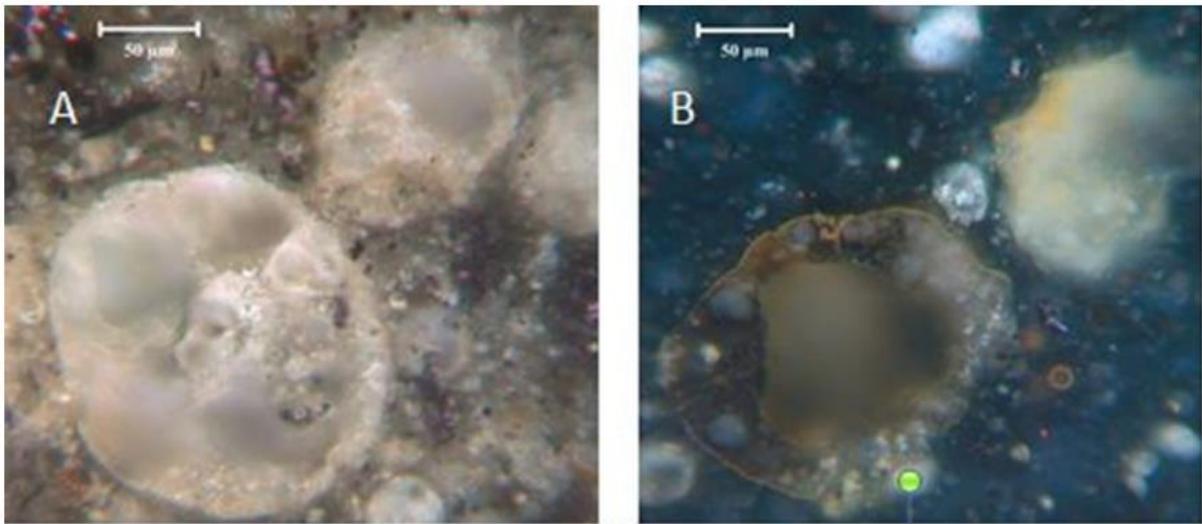
komposisi BA tersusun oleh glass (39,6%), kuarsa (16,2%), mulit (8,2%), spinel (15,3%), mineral oksida besi (16,4%), dan UC berkisar 19,3% (Besari, 2018).

Dai *et al.*, (2010) melakukan studi terkait kelimpahan dan distribusi mineral dan unsur pada FABAs hasil pembakaran batubara pada salah satu pembangkit listrik di Jungar di Mongolia. Berdasarkan studi tersebut diketahui bahwa komposisi mineral penyusun FABAs dapat dibedakan berdasarkan sifat magnetiknya yaitu terdiri dari fraksi magnetik dan fraksi non-magnetik. Kelompok mulit+korundum+kuarsa (MCQ), dan glass dikelompokkan ke dalam fraksi non-magnetik. Kelimpahan

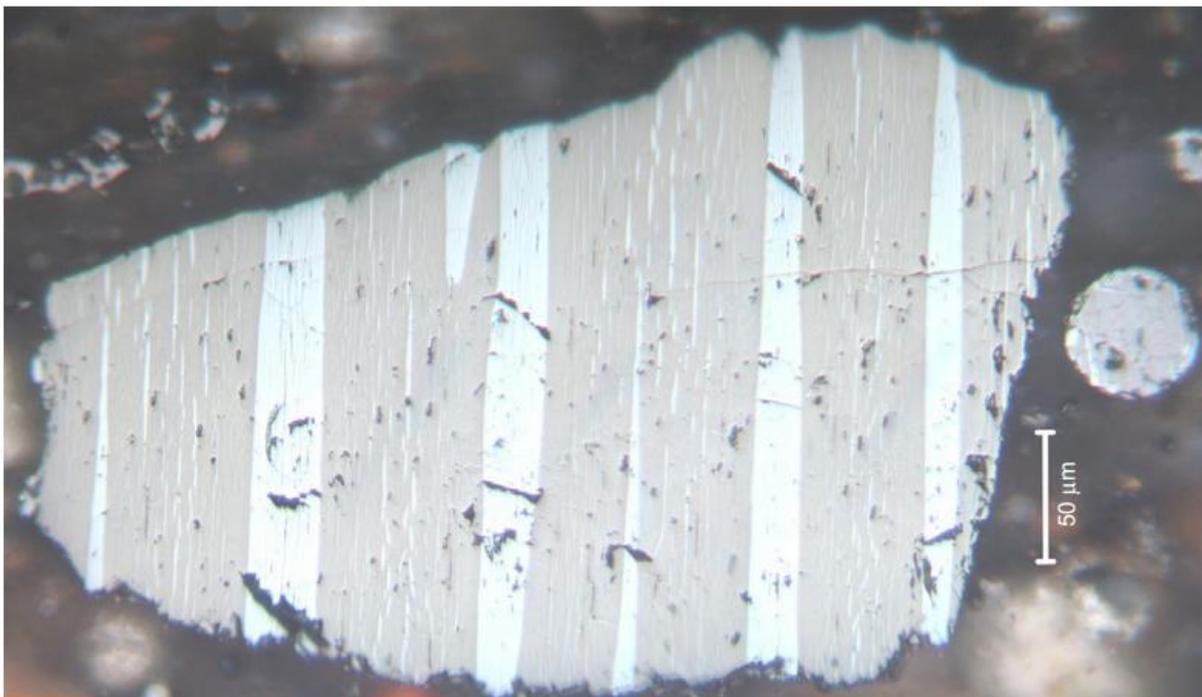
fraksi mineral penyusun FABA diperlihatkan pada Tabel 5.

CFA selain tersusun oleh material ekonomis seperti bahan magnetik, *cenospheres*, dan UC juga terdapat unsur jejak seperti V, Ga, Ge, Se, Li, Mo, U, Au, Ag, Pt, dan REY (USEPA, 1999; Meawad *et al.*, 2010). FABA dari PLTU di Pulau Jawa juga teridentifikasi

memiliki kandungan unsur jejak berupa REY (Besari, 2018). Kelimpahan rata-rata unsur jejak pada abu batubara dapat dilihat pada Tabel 6. Secara umum, kandungan unsur jejak yang ditemukan pada FA memiliki sifat volatilitas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan unsur jejak lainnya yang ditemukan pada BA (Gambar 7).



Gambar 5. (a). *Cenospheres*, (b). *Pleiospheres*
 Sumber: (Hower *et al.*, 2017b)



Gambar 6. Komponen non-bahan bakar berupa logam
 Sumber: (Hower *et al.*, 2017b)

Tabel 5. Kelimpahan mineral penyusun FA dan BA Jungar Power Plant

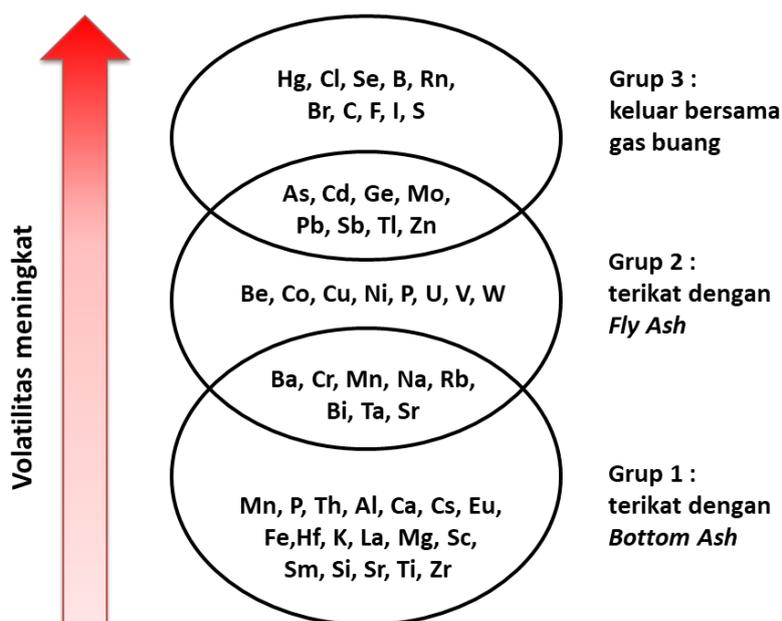
Sampel	Mineral					Glass	LOI
	Mulit	Korundum	Kuarsa	Kalsit	K-felspar		
Fly ash (w)	37,4	3,9	2,0	0,2	0,2	52,6	2,86
Fly ash (e)	34,9	4,0	1,6	0,3	0,2	54,8	3,15
Bottom ash	27,2	3,2	2,0	0,5	0,3	54,4	12,0

Sumber: (Dai et al., 2010)

Tabel 6. Konsentrasi kelimpahan unsur jejak pada FA (mg/kg)

Unsur	Median	Rentang
As	43,4	0,0003-391
Ba	806,5	0,02-10,850
Be	5	0,2-2105
B	311	2,98-2050
Cd	3,4	0,01-79
Cr	136	3,6-437
Co	35,9	4,9-79
Cu	112	0,2-655
F	29	0,04-320
Pb	56,8	0,02-273
Mn	250	24,5-750
Hg	0,1	0,013-49,5
Ni	77,7	0,1-1270
Se	7,7	0,0003-4,5
Sb	4,6	0,2-205
Ag	3,2	0,01-49,5
Sr	775	30-3885
Tl	9	0,15-85
V	252	43,5-5015
Zn	148	0,8-2200

Sumber: (USEPA, 1999; Meawad et al., 2010)



Gambar 7. Distribusi unsur pada BA, FA, dan flue gas berdasarkan sifat volatilitas
 Sumber: (after Clarke, 1993; Meij, 1994)

POTENSI PEMANFAATAN FABA

Pemanfaatan FA terbesar digunakan pada sektor pembuatan semen dan beton (44,19%), pembuatan jalan dan tanggul (15,25%), reklamasi daerah dataran rendah dan *land filling* (12,49%), *mine filling* (8,84%), pembuatan batu bata, balok, dan ubin (7,61%), bidang pertanian (2,47%), dan untuk bidang lainnya (9,14%) (Loya and Rawani, 2014).

Kontras dengan produksi FABA di Indonesia yang terus meningkat secara signifikan dalam jumlah besar, secara umum pemanfaatan FABA yang dilakukan masih sangat terbatas sebagai material untuk penanganan masalah lingkungan di pertambangan (material timbunan, reklamasi, penanganan air asam tambang, *roadbase* jalan tambang), beton, *paving block*, dan campuran semen (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2021).

Sifat fisik dan kimia FA memengaruhi potensi pemanfaatannya. Potensi pemanfaatan FA telah banyak diaplikasikan pada bidang geoteknik seperti stabilisasi tanah untuk jalan raya (Kolias *et al.*, 2005); material pengurukan untuk penggalian, parit penambangan, serta dinding penahan (Wang and Wu, 2006); *landfill liners* atau penutup (Cokca and Yilmaz, 2004); dan sebagai bahan geopolimer (Chindaprasirt *et al.*, 2011).

Untuk meningkatkan pemanfaatan FA, banyak teknik pemisahan telah dikembangkan, termasuk untuk memisahkan komponen bernilai ekonomis, seperti magnetit, aluminosilikat, *unburned carbon*, dan *cenosphere*. *Cenospheres* merupakan salah satu material berharga yang ditemukan FA karena memiliki sifat kuat tekan tinggi, ringan, daya serap air rendah, ketahanan kimia, dan ketahanan termal yang baik, menjadikannya cocok untuk berbagai aplikasi (Ranjbar and Kuenzel, 2017). Potensi pemanfaatan komponen penyusun FA lainnya antara lain sebagai berikut.

(a). *Sumber Rare Earth Element and Yttrium (REY)*

FA yang apabila tidak digunakan hanya dianggap sebagai limbah, di sisi lain merupakan sumber beberapa unsur berharga (*valuable elements*), termasuk *Rare earth elements and yttrium* atau REY (Ketris and Yudovich, 2009; Blissett *et al.*, 2014; Dai *et al.*, 2012; Dai *et al.*, 2014; Franus *et al.*, 2015; Besari, 2018). Kepentingan komersial REY tidak hanya terlihat pada seberapa banyak penggunaannya, tetapi pada kenyataan bahwa unsur-unsur tersebut sangat penting dalam berbagai aplikasi termasuk teknologi utama untuk menghasilkan energi bersih dan berkelanjutan (Alonso *et al.*, 2012; Du and Greadel, 2013; Seredin *et al.*, 2013). Sumber daya REY tidak terlalu langka (deposit telah ditemukan di 34 negara, menurut Yang *et al.*, (2013)), namun penambangan dan produksinya tidak murah dan dapat dikaitkan dengan dampak lingkungan yang signifikan (radioaktivitas unsur-unsur yang berasosiasi dengannya, seperti uranium dan thorium), memiliki substitusi yang rendah, dan tingkat daur ulang yang rendah, sebagian besar ekonomi negara di dunia termasuk Uni Eropa (UE) sangat bergantung pada impor unsur tersebut (Massari and Rubeti, 2013).

REY juga disebut sebagai unsur tanah jarang (UTJ), *rare earth metal* (logam jarang), dan *rare earth* (tanah jarang). Menurut Humphries (2010), REY didefinisikan sebagai sekelompok unsur logam yang termasuk ke dalam golongan transisi atau golongan lanthanida, ditambah dengan *yttrium* (Y) dan *scandium* (Sc). Golongan lanthanida merupakan logam transisi dari Grup 11B pada tabel periodik. Golongan lanthanida terdiri atas 15 unsur, dimulai dari lanthanum (nomor atom 57) hingga lutetium (nomor atom 71), termasuk dua unsur tambahan yaitu Y dan Sc.

REY digunakan pada berbagai bidang industri seperti pembuatan *fuel cells*, perangkat untuk *green energy*, baterai berkapasitas tinggi, dan magnet untuk

pembangkit tenaga angin (Zhanheng, 2011; Hoenderdal *et al.*, 2013; Franus *et al.*, 2015). Selain itu selama tiga dekade terakhir terjadi peningkatan penggunaan REY dalam aplikasi pembuatan berbagai perangkat teknologi tinggi seperti memori komputer, *compact disc*, baterai isi ulang, konverter autokatalitik, super magnet, ponsel, perangkat LED, superkonduktor, bahan tambahan pembuatan kaca, bahan fluoresen, phosphate binding agent, panel surya, dan agen pada *magnetic resonance imaging* (MRI) (Balaram, 2019).

Ketris and Yudowich (2009) menemukan bahwa *coal fly ash* (CFA) mengandung 445 ppm REY pada rata-rata global. Kelimpahan rata-rata REY pada abu batubara di dunia (404 ppm) dan di USA (517 ppm), bernilai tiga kali lebih besar dibandingkan dengan kelimpahan REY pada UCC. Seredin and Dai (2012) menemukan jika rata-rata kandungan REY dalam abu batubara memiliki konsentrasi yang sebanding dengan konsentrasi REY pada beberapa endapan bijih konvensional, sehingga limbah pembakaran batubara tersebut merupakan sumber potensial REY. Kelebihan lainnya adalah, pada CFA secara umum dapat ditemukan semua kelompok unsur REY sedangkan REY yang berasal dari endapan konvensional hanya memiliki beberapa variasi unsur tersebut di dalamnya.

Kriteria penilaian REY pada abu batubara sebagai bahan baku dipengaruhi oleh konsentrasi dan variasi individu REY (Seredin and Dai, 2012). Kriteria penilaian pertama adalah konsentrasi REY dalam bentuk oksida pada abu batubara (REO). Konsentrasi REO 1000 µg/g dalam abu dianggap sebagai nilai batas untuk *recovery* REY yang menguntungkan. Kriteria kedua adalah komposisi individu REY dalam abu batubara. FA yang terkayakan oleh REY berdasarkan pada komposisi individual REY, tidak hanya mengacu pada kelimpahan total REY namun harus mempertimbangkan proporsi *critical* REY di dalamnya, serta rasio antara kelompok *critical* REY terhadap *excessive* REY yang dinyatakan sebagai koefisien *outlook*.

Eskenazy (1987) menemukan korelasi positif antara kadar abu batubara terhadap konsentrasi REY, yakni semakin tinggi kadar abu batubara maka konsentrasi REY semakin meningkat dan berlaku sebaliknya. REY dominan terikat pada mineral aluminasilikat dan terikat pada material organik penyusun batubara dengan konsentrasi yang sangat rendah <10% dari konsentrasi total REY. Konsentrasi REY pada FA hasil pembakaran batubara bituminus dan lignit berkorelasi positif terhadap keberadaan aluminium dan silikon oksida (Franus *et al.*, 2015). Querol *et al.* (1995) menemukan bahwa REY hanya terkonsentrasi pada material *glass* aluminosilikat. REY lebih terkayakan pada *glass* dibandingkan pada fraksi magnetik maupun MCQ. *Glass* cenderung mengalami pengayaan HREY, sedangkan pengayaan LREY cenderung terkayakan pada fraksi non-magnetik berupa MCQ (Dai *et al.*, 2010). REY pada FA tidak hanya terikat di *glass* namun juga berasosiasi mineral karbonat dan fosfat (Querol *et al.*, 2007).

Penelitian yang dilakukan oleh Blissett *et al.*, (2014) menemukan bahwa 6 sampel abu hasil pembakaran batubara dari berbagai PLTU di Polandia dan UK teridentifikasi mengandung REY. Konsentrasi total REY pada seluruh sampel FA berkisar 246 ppm-481 ppm dengan konsentrasi REO tidak lebih dari 600 ppm (hanya berkisar 297 ppm-579 ppm). Konsentrasi total *critical* REY berkisar 88 ppm-161 ppm, nilai koefisien *outlook* (*C_{outlook}*) berkisar 0,86 – 0,96, dengan persentase *critical* REY sebesar 33,4%-36,1% (Blissett *et al.*, 2014).

Kelompok unsur *critical* REY juga ditemukan pada FABA di Indonesia dengan kelimpahan berkisar dari 38%-41% dan nilai *C_{outlook}* lebih dari 1 (Rosita *et al.*, 2020).

REY yang ditemukan pada FABA dari PLTU di Pulau Jawa memiliki kelimpahan total REY pada FA berkisar 123,14 s.d. 260,38 ppm (Besari, 2018). Konsentrasi total REO berkisar dari 148,61 s.d. 313,98 ppm dengan keterdapatan REY khususnya unsur Y dominan terikat pada *glass* dan

dalam konsentrasi lebih rendah terikat pada spinel (Besari, 2018). REY juga ditemukan terikat pada material organik penyusun batubara (Dai *et al.*, 2008; Lin *et al.*, 2017).

(b). *Cenosphere*

Pada komponen FABA terdapat fraksi material yang berbentuk bulat dan memiliki ruang kosong di bagian dalamnya. Partikel tersebut dinamakan sebagai *cenosphere*. Nama tersebut berasal dari bahasa Yunani yakni *kenos* (*hollow*) dan *sphaira* (*sphere*) (Torrey, 1978). Ukuran *cenosphere* bervariasi di antara rentang 20 hingga 300 μm (Ranjbar and Kuenzel, 2017). Sekitar 0,01–4,8% komponen fly ash adalah *cenosphere* dan di beberapa kasus, tercatat bahwa fraksi *cenosphere* berkisar antara 0,3–1,5% (Sokol *et al.*, 2000; Fomenko *et al.*, 2013). Sebagian besar penyusun material ini adalah SiO_2 dan Al_2O_3 berbeda-beda tergantung dari sumber batubara yang dibakar (Ranjbar and Kuenzel, 2017; Danish and Mosaberpanah, 2020). Karena *cenosphere* sendiri bergantung pada sumber batubara yang digunakan, maka sifat dan karakteristiknya juga bermacam-macam.

Cenosphere memiliki banyak kelebihan. Karena merupakan partikel berongga, terdapat fraksi yang berdensitas lebih rendah dari air. Umumnya densitas partikel ini berkisar antara 200 hingga 2.600 kg/m^3 (Acar and Atalay, 2016). Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh ketebalan dinding atau cangkang *cenosphere*. Karena beratnya yang ringan dan memiliki kekerasan yang kuat, maka *cenosphere* dapat dimanfaatkan ke banyak pengaplikasian seperti material ringan, keramik ringan, *filler*, polimer, semen ringan, insulasi serta resistensi termal.

(c). Geopolimer

Geopolimer merupakan suatu polimer alam yang terbentuk akibat reaksi geopolimerisasi antara larutan silika dan aluminosilikat (Abdel-Gawwad and Abo El-Enein, 2016). Geopolimer juga dikenal dengan nama *alkalibounded-ceramics*, hidrokeramik, *alkali-activated cements* (Komnitsas and Zaharaki, 2007).

Geopolimer memiliki rumus empiris $\text{Mn}\{(\text{SiO}_2)_z\text{-AlO}_2\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$ dengan M kation alkali yang digunakan misalnya (Na^+ , K^+), n derajat polikondensasi dan nilai z bervariasi antara 1 sampai 3. Nilai z ini menunjukkan jenis oligomer aluminosilikat yang membentuk struktur amorf hingga semikristalin geopolimer seperti *polysialate* (-Si-O-Al-O- , PS), *polysialate siloxo* (-Si-O-Al-O-Si-O- , PSS), ataupun *polysialate disiloxo* ($\text{-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-}$, PSDS) dan nilai z ditentukan oleh rasio Si/Al (Zhuang *et al.*, 2016). Geopolimer yang terbentuk melalui proses geopolimerisasi memiliki sifat yang lebih baik dibandingkan dengan semen *portland* pada umumnya (Abdel-Gawwad and Abo El-Enein, 2016). Geopolimer memiliki nilai uji tekan yang tinggi, nilai susut yang rendah, ketahanan terhadap asam, nilai konduktivitas panas yang rendah, konsumsi energi yang rendah dalam pembuatan dan pemanfaatan di bidang konstruksi (Zhang *et al.*, 2010). Geopolimer juga baik dalam hal imobilisasi logam berat dan stabil pada suhu tinggi (Yao *et al.*, 2009).

FA banyak digunakan dalam industri pembuatan geopolimer karena kandungan aluminosilikat dan ukurannya yang lembut (Xie and Ozbakkaloglu, 2015). Struktur aluminosilikat yang ada pada FA tergantung pada jenis mineral yang terkandung dalam batubara. Mineral pada batubara dipengaruhi faktor geologi pada lingkungan sekitar deposit batubara. Mineral yang umum ditemukan pada batubara adalah mineral lempung seperti illit ($[\text{OH}]_4\text{K}_2[\text{Si}_6\text{Al}_2]\text{Al}_4\text{O}_{20}$) dan kaolinit ($[\text{OH}]_8\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}$), sulfida seperti pirit (FeS_2) dan markasit (FeS_2), karbonat seperti dolomit ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), ankerit ($2\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{FeCO}_3$), kalsit (CaCO_3) siderit (FeCO_3) dan kuarsa (SiO_2). Biasanya batubara mengandung 60-90% mineral lempung dan kuarsa sebanyak 1-20% dari total komponen anorganik yang ada pada batubara.

(d). *Unburned Carbon*

Fly ash (FA) juga mengandung *unburned carbon* (UC) dengan kelimpahan yang bervariasi hingga 17% (Gray *et al.*, 2002).

Industri semen *portland* hanya menggunakan FA dengan nilai *loss-on-ignition* (LOI) kurang dari 6%. UC direpresentasikan oleh LOI dan merupakan material yang tidak diharapkan dalam pembuatan beton karena dapat meningkatkan konduktivitas listrik beton; mengubah warna mortar dan beton (menjadi hitam); serta dibutuhkan penambahan baik air maupun zat aditif (Muralidharan *et al.*, 2005). Menurut ASTM C618 dan EN 450-1, peningkatan LOI mengurangi kualitas FA karena kandungan karbon yang lebih tinggi, yang membatasi penerapannya pada beton karena aliran udara yang signifikan, memengaruhi daya tahan beton (Blisset and Rowson, 2012).

Penelitian yang dilakukan oleh Adelizar *et al* (2020) juga menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kelimpahan UC pada FABA PLTU Tanjung Jati Jepara mengakibatkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan pada geopolimer yang dihasilkan. Analisis petrografi yang dilakukan oleh Besari (2018) pada sampel yang berasal dari PLTU Tanjung Jati menunjukkan kelimpahan UC pada sampel FA sebesar 14% dan pada sampel BA sebesar 18,7%. Kelimpahan UC pada BA lebih tinggi jika dibandingkan pada FA. Nilai LOI pada FA sebesar 1,87% sedangkan pada BA mencapai 12.9% (Adelizar *et al.*, 2020).

UC pada CFA dapat digunakan sebagai bahan karbon aktif atau karbon hitam, bahan bakar tambahan, serta pembuatan grafit (Cabielles *et al.*, 2009; Camea'n and Garcia, 2011). Salah satu metode pemisahan UC yang telah banyak digunakan adalah metode elektrostatik (Gray *et al.*, 2002; Soong *et al.*, 2002). Metode lain yang menjanjikan memisahkan UC dari CFA adalah flotasi buih. Proses ini telah dikomersialkan di AS dengan kadar karbon yang dapat diekstraksi mencapai 70% (Baltrus *et al.*, 2001).

KESIMPULAN

Karakteristik komponen penyusun FABA yang dihasilkan dari pembakaran batubara di PLTU secara umum tersusun oleh komponen organik dan anorganik, senyawa oksida utama, unsur jejak, maupun material dan unsur berharga. FABA berdasarkan karakteristik komponen penyusunnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan geopolimer, maupun sebagai sumber material berharga seperti *cenosphere* dan *unburned carbon*, selain itu juga dapat dilakukan ekstraksi unsur-unsur berharga yang bernilai ekonomi tinggi yaitu antara lain REY atau unsur tanah jarang.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbott, M.F. and Austin, L.G., 1985. Studies on slag deposit formation in pulverized-coal combustors: 6. sticking behaviour of slag drops from three Pennsylvania steam coals. *Fuel*, 64(6), pp.832-838.
- Abdel-Gawwad, H.A. and Abo-El-Enein, S.A., 2016. A novel method to produce dry geopolimer cement powder. *HBRC journal*, 12(1), pp.13-24.
- Acar, I. and Atalay, M.U., 2016. Recovery potentials of cenospheres from bituminous coal fly ashes. *Fuel*, 180, pp.97-105.
- Adelizar, A.S., Olvianas, M., Adythia, D.M., Syafiyurrahman, M.F., Pratama, I.G.A.A.N., Astuti, W. and Petrus, H.T.B.M., 2020. Fly ..ash and bottom ash utilization as geopolimer: Correlation on compressive strength and degree of polymerization observed using FTIR. *MS&E*, 742(1), p.012042.
- Ahmaruzzaman, M., 2010. A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science*, 36(3), pp.327-363.

- Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R. and Kirchain, R.E., 2012. Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies. *Environmental science & technology*, 46(6), pp.3406-3414.
- Balaram, V., 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), pp.1285-1303.
- Besari, D.A.A., 2018. *Komponen Penyusun dan Model Keterdapatan Rare Earth Elements and Yttrium (REY) pada Fly Ash dan Bottom Ash* (Bachelor thesis, Universitas Gadjah Mada).
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Mohanakrishnan, A.A., Abri, A., Sattler, M. and Techapaphawit, S., 2019. Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: a global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, p.e00263.
- Blissett, R.S. and Rowson, N.A., 2012. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel*, 97, pp.1-23.
- Blissett, R.S., Smalley, N. and Rowson, N.A., 2014. An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content. *Fuel*, 119, pp.236-239.
- Cabielles, M., Rouzaud, J.N. and Garcia, A.B., 2009. High-resolution transmission electron microscopy studies of graphite materials prepared by high-temperature treatment of unburned carbon concentrates from combustion fly ashes. *Energy & fuels*, 23(2), pp.942-950.
- Cameán, I. and Garcia, A.B., 2011. Graphite materials prepared by HTT of unburned carbon from coal combustion fly ashes: Performance as anodes in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 196(10), pp.4816-4820.
- Chiang, P.C. and Pan, S.Y., 2017. Fly Ash, Bottom Ash, and Dust. In *Carbon Dioxide Mineralization and Utilization* (pp. 253-264). Springer, Singapore.
- Chindaprasirt, P., Chareerat, T., Hatanaka, S. and Cao, T., 2011. High-strength geopolymer using fine high-calcium fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(3), pp.264-270.
- Clarke, L.B., 1993. The fate of trace elements during coal combustion and gasification: an overview. *Fuel*, 72(6), pp.731-736.
- Cokca, E. and Yilmaz, Z., 2004. Use of rubber and bentonite added fly ash as a liner material. *Waste management*, 24(2), pp.153-164.
- Dai, S., Ren, D., Zhou, Y., Chou, C.L., Wang, X., Zhao, L. and Zhu, X., 2008. Mineralogy and geochemistry of a superhigh-organic-sulfur coal, Yanshan Coalfield, Yunnan, China: evidence for a volcanic ash component and influence by submarine exhalation. *Chemical Geology*, 255(1-2), pp.182-194.
- Dai, S., Zhao, L., Hower, J.C., Johnston, M.N., Song, W., Wang, P. and Zhang, S., 2014. Petrology, mineralogy, and chemistry of size-fractionated fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China, with emphasis on the distribution of rare earth elements. *Energy & fuels*, 28(2), pp.1502-1514.
- Dai, S., Zhao, L., Peng, S., Chou, C.L., Wang, X., Zhang, Y., Li, D. and Sun, Y., 2010. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China. *International Journal of Coal Geology*, 81(4), pp.320-332.
- Danish, A. and Mosaberpanah, M.A., 2020. Formation mechanism and applications of cenospheres: a review. *Journal of Materials Science*, pp.1-19.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2021. Fly ash dan bottom ash (FABA) di Indonesia (press release). Jakarta : Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2019. Laporan Kinerja Tahun 2019. Jakarta : Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral.

- <https://esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-ditjen-minerba2019.pdf>
- Du, X. and Graedel, T.E., 2013. Uncovering the end uses of the rare earth elements. *Science of the Total Environment*, 461, pp.781-784.
- Eskenazy, G.M., 1987. Rare earth elements in a sampled coal from the Pirin deposit, Bulgaria. *International Journal of Coal Geology*, 7(3), pp.301-314.
- Fomenko, E.V., Anshits, N.N., Solovyov, L.A., Mikhaylova, O.A. and Anshits, A.G., 2013. Composition and morphology of fly ash cenospheres produced from the combustion of Kuznetsk coal. *Energy & fuels*, 27(9), pp.5440-5448.
- Franus, W., Wiatros-Motyka, M.M. and Wdowin, M., 2015. Coal fly ash as a resource for rare earth elements. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(12), pp.9464-9474.
- Goodarzi, F., 2006. Characteristics and composition of fly ash from Canadian coal-fired power plants. *Fuel*, 85(10-11), pp.1418-1427.
- Gray, M.L., Champagne, K.J., Soong, Y., Killmeyer, R.P., Maroto-Valer, M.M., Andrésen, J.M., Ciocco, M.V. and Zandhuis, P.H., 2002. Physical cleaning of high carbon fly ash. *Fuel processing technology*, 76(1), pp.11-21.
- Hoenderdaal, S., Espinoza, L.T., Marscheider-Weidemann, F. and Graus, W., 2013. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies?. *Energy*, 49, pp.344-355.
- Hower, J.C., 2012. Petrographic examination of coal-combustion fly ash. *International Journal of Coal Geology*, 92, pp.90-97.
- Hower, J.C., Henke, K.R., Dai, S., Ward, C.R., French, D., Liu, S. and Graham, U.M., 2017a. Generation and nature of coal fly ash and bottom ash. In *Coal Combustion Products (CCP's)* (pp. 21-65). Woodhead Publishing.
- Hower, J.C., Groppo, J.G., Graham, U.M., Ward, C.R., Kostova, I.J., Maroto-Valer, M.M. and Dai, S., 2017b. Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review. *International Journal of Coal Geology*, 179, pp.11-27.
- Ketris, M.P. and Yudovich, Y.E., 2009. Estimations of Clarks for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), pp.135-148.
- Kolias, S., Kasselouri-Rigopoulou, V. and Karahalios, A., 2005. Stabilisation of clayey soils with high calcium fly ash and cement. *Cement and Concrete Composites*, 27(2), pp.301-313.
- Komnitsas, K. and Zaharaki, D., 2007. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals engineering*, 20(14), pp.1261-1277.
- Kutchko, B.G. and Kim, A.G., 2006. Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*, 85(17-18), pp.2537-2544.
- Lin, R., Bank, T.L., Roth, E.A., Granite, E.J. and Soong, Y., 2017. Organic and inorganic associations of rare earth elements in central Appalachian coal. *International Journal of Coal Geology*, 179, pp.295-301.
- Loya, M.I.M. and Rawani, A.M., 2014. A review: promising applications for utilization of fly ash. *Int. J. Adv. Technol. Eng. Sci*, 2, pp.143-149.
- Massari, S. and Ruberti, M., 2013. Rare earth elements as critical raw materials: Focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 38(1), pp.36-43.
- Meawad, A.S., Bojinova, D.Y. and Pelovski, Y.G., 2010. An overview of metals recovery from thermal power plant solid wastes. *Waste Management*, 30(12), pp.2548-2559.
- Meij, R., 1994. Trace element behavior in coal-fired power plants. *Fuel processing technology*, 39(1-3), pp.199-217.

- Mraw, S.C., De Neufville, J.P., Freund, H., Baset, Z., Gorbaty, M.L. and Wright, F.J., 1983. The science of mineral matter in coal. In *Coal science* (pp. 1-63). Academic Press.
- Mukherjee, A.B., Zevenhoven, R., Bhattacharya, P., Sajwan, K.S. and Kikuchi, R., 2008. Mercury flow via coal and coal utilization by-products: a global perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(4), pp.571-591.
- Ngu, L.N., Wu, H. and Zhang, D.K., 2007. Characterization of ash cenospheres in fly ash from Australian power stations. *Energy & Fuels*, 21(6), pp.3437-3445.
- Pandian, N.S., 2013. Fly ash characterization with reference to geotechnical applications. *Journal of the Indian Institute of Science*, 84(6), p.189.
- Reddy, C.S., Mohanty, S. and Shai, R., 2018. Physical, chemical and geotechnical characterization of fly ash, bottom ash and municipal solid waste from Telangana State in India. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(23).
- Querol, X., Fernández-Turiel, J. and López-Soler, A., 1995. Trace elements in coal and their behaviour during combustion in a large power station. *Fuel*, 74(3), pp.331-343.
- Ram, L.C. and Masto, R.E., 2014. Fly ash for soil amelioration: a review on the influence of ash blending with inorganic and organic amendments. *Earth-Science Reviews*, 128, pp.52-74.
- Ranjbar, N. and Kuenzel, C., 2017. Cenospheres: A review. *Fuel*, 207, pp.1-12.
- Rosita, W., Besari, D.A.A., Bendiyasa, I.M., Perdana, I., Anggara, F., and Petrus, H.T.B.M., 2020. Potency of rare earth elements and yttrium in Indonesian coal ash. *Key Engineering Materials*, 849, pp.102-107.
- Sahoo, P.K., Kim, K., Powell, M.A. and Equeenuddin, S.M., 2016. Recovery of metals and other beneficial products from coal fly ash: A sustainable approach for fly ash management. *International Journal of Coal Science & Technology*, 3(3), pp.267-283.
- Seredin, V.V. and Dai, S., 2012. Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 94, pp.67-93.
- Seredin, V.V., Dai, S., Sun, Y. and Chekryzhov, I.Y., 2013. Coal deposits as promising sources of rare metals for alternative power and energy-efficient technologies. *Applied Geochemistry*, 31, pp.1-11.
- Sokol, E.V., Maksimova, N.V., Volkova, N.I., Nigmatulina, E.N. and Frenkel, A.E., 2000. Hollow silicate microspheres from fly ashes of the Chelyabinsk brown coals (South Urals, Russia). *Fuel Processing Technology*, 67(1), pp.35-52.
- Sommerville, R., Blissett, R., Rowson, N. and Blackburn, S., 2013. Producing a synthetic zeolite from improved fly ash residue. *International Journal of Mineral Processing*, 124, pp.20-25.
- Srinivasachar, S., Helble, J.J. and Boni, A.A., 1990. Mineral behavior during coal combustion 1. Pyrite transformations. *Progress in Energy and Combustion Science*, 16(4), pp.281-292.
- Torrey, S., 1978. Coal ash utilization: Fly ash, bottom ash and slag. *Noyes Data Corporation (Pollution technology review)*.
- Vassilev, S.V. and Vassileva, C.G., 2007. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel*, 86(10-11), pp.1490-1512.
- Wang, S. and Wu, H., 2006. Environmental-benign utilisation of fly ash as low-cost adsorbents. *Journal of hazardous materials*, 136(3), pp.482-501.

- Xie, T. and Ozbakkaloglu, T., 2015. Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*, 41(4), pp.5945-5958.
- Yang, X.J., Lin, A., Li, X.L., Wu, Y., Zhou, W. and Chen, Z., 2013. China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. *Environmental Development*, 8, pp.131-136.
- Yao, Z.T., Ji, X.S., Sarker, P.K., Tang, J.H., Ge, L.Q., Xia, M.S. and Xi, Y.Q., 2015. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews*, 141, pp.105-121.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H. and Chen, Y., 2009. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493(1-2), pp.49-54.
- Zhang, Y.J., Wang, Y.C. and Li, S., 2010. Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin. *Materials Science and Engineering: A*, 527(24-25), pp.6574-6580.
- Zhanheng, C., 2011. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of rare earths*, 29(1), pp.1-6.
- Zhuang, X.Y., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C.H., Tong, D.S., Yang, H.M., Yu, W.H. and Wang, H., 2016. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, pp.253-267.

Diterima	: 19 Maret 2021
Direvisi	: 29 Maret 2021
Disetujui	: 31 Mei 2021

UCAPAN TERIMA KASIH KEPADA MITRA BESTARI

Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para editor dan mitra bestari atas kerjasama yang baik dalam proses review lima makalah untuk edisi kesatu. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya untuk edisi ini, antara lain Prof. Dr.Ir. Binarko Santoso, M.Sc; Prof. Ir. Mega Fatimah Rosana, M.Sc, Ph.D; Prof. Euis Tintin Yuningsih, S.T., M.T., Ph.D; Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc.; Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T.; Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA; Dr. Asep Kurnia Permana, S.T., M.Sc; dan Ir. Sabtanto Joko Suprpto, M.T.

Kami juga mengucapkan terimakasih kepada semua unsur Dewan Redaksi atas usaha yang sangat baik dalam menyelesaikan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.16 Nomor.1 Tahun 2021. Semoga kehadiran Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bentuk cetakan maupun digital secara *on line* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 16 Nomor 1 Tahun 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Dea Anisa Ayu Besari
Universitas Gadjah Mada
Email: dea.anisa.a@mail.ugm.ac.id

Febry Yulindra Abdi Saputra
Universitas Gadjah Mada
Email: febry.yulindra.s@mail.ugm.ac.id

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

Himawan T.B.M. Petrus
Universitas Gadjah Mada
Email: bayupetrus@ugm.ac.id

Hotden Manurung
Universitas Gadjah Mada
Email: hotden.manurung@mail.ugm.ac.id

Iqbal Takodama
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: iqbaltakodama@gmail.com

Kurnia
Pusat Survei Geologi
Email: miharjakurnia@gmail.com

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

Purnama Sendjaja
Pusat Survei Geologi
Email: pppurs@gmail.com

Robet Lumban Tobing
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: trebortobing@gmail.com

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

Tito Harianto
Universitas Padjajaran
Email: titoharianto81@gmail.com

Verry E. Setiawan
Pusat Survei Geologi
Email: verriedisetiawan@gmail.com

Wiwid Joni
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: joniwiwid@gmail.com

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 16 Nomor 1 Tahun 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

- Analisis pirolisis 27, 28, 32, 34
Analisis TOC 27, 32, 33
Batuan gunungapi 37, 39, 41, 48
Cenosphere 53, 59, 61, 63, 65-69
Cleat 13-17, 19-23, 25, 26
Ekstraksi batuan 27, 28, 31, 33, 34
FABA 53-55, 57, 59-61, 63-67, 69
Gas metana batubara 13, 14, 17, 24, 25, 26
Geopolimer 53, 63, 65, 66
Kandungan gas 13-19, 21, 23-25
Kaolinitisasi 37, 39, 41, 43-49, 51
Komposisi 4, 16, 18, 19, 37-40, 42, 44, 46, 47, 53-57, 59, 60, 64
Lapisan batuan penudung 1, 8
Magnetotellurik 1-3, 5, 7, 9, 11
Material organik 27, 28, 30, 32-34, 57, 64, 65
Panas bumi Lokop 1-3, 8
Pemodelan inversi 1-5, 7-11
Permeabilitas 8, 13-17, 19, 21-26, 38, 54
Pemanfaatan 53-55, 57, 59, 61, 63, 65, 67, 69
Pelapukan 37-51
Provinsi Aceh 1, 3
REY 53, 61, 63-67, 69
Serpit minyak 27-29, 31, 33-35
UTJ 37-39, 42, 43, 46-48, 63

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Mei 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Wiwid Joni dan Iqbal Takodama
(Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

STUDI KOMPARASI PEMODELAN INVERSI 1-D, 2-D, DAN 3-D DATA MAGNETOTELLURIK DI DAERAH PANAS BUMI LOKOP, PROVINSI ACEH

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2021 Vol. 16 No. 1 Hal. 1 - 11

Metode magnetotellurik (MT) dapat menggambarkan struktur/zona tahanan jenis rendah di daerah panas bumi yang dapat ditafsirkan sebagai lapisan batuan penudung. Zona-zona ini biasanya digunakan untuk membantu penentuan target wellsite dan memperkirakan potensi/kapasitas sumber daya panas bumi. Dalam pemrosesan data MT, dapat dilakukan dengan pemodelan inversi 1-D, 2-D, dan 3-D untuk menghasilkan model yang realistis dan lebih presisi. Pemodelan Inversi 1-D sangat mudah dilakukan, disamping itu dapat digunakan sebagai jaminan kualitas setiap stasiun data MT yang lebih efektif. Inversi 1-D biasanya dapat menggambarkan karakter geometri dari tahanan jenis secara keseluruhan terhadap lapisan penudung, namun tidak dapat mendeteksi batas bawah atau variasi kedalamannya. Untuk menjawab ketidakpastian tersebut, dapat dilakukan pemodelan inversi 2-D. Namun pemodelan inversi 2-D juga tidak akan dapat berhasil baik, jika mendapatkan kondisi geologi yang kompleks di daerah penyelidikan. Keterbatasan dari pemodelan inversi 1-D dan 2-D tersebut, dapat diatasi dengan melakukan pemodelan inversi 3-D. Perbandingan metode pemodelan ini dilakukan dengan menggunakan data MT di daerah panas bumi Lokop, Provinsi Aceh. Hasil pemodelan 1-D dan 3-D lebih dapat menggambarkan kemungkinan adanya zona lapisan penudung di daerah panas bumi Lokop.

Kata kunci: magnetotellurik, lapisan batuan penudung, panas bumi Lokop, pemodelan inversi, Provinsi Aceh

Muhammad Abdurachman Ibrahim¹ dan Tito Harianto²
(¹Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi dan ²Universitas Padjajaran)

KARAKTERISTIK CLEAT TERHADAP PERMEABILITAS DAN KANDUNGAN GAS PADA BATUBARA ANGGOTA M3 FORMASI MUARAENIM DI DAERAH MANGUNJAYA, PROVINSI SUMATRA SELATAN

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2021 Vol. 16 No. 1 Hal. 13 - 26

Cekungan Sumatra Selatan merupakan cekungan batubara dengan sumber daya batubara terbesar kedua di Indonesia. Hal ini membuka peluang untuk dapat memanfaatkannya, salah satunya yaitu melakukan eksplorasi gas metana batubara. Kandungan gas dan nilai permeabilitas sangat memengaruhi potensi gas metana batubara pada suatu wilayah. Permeabilitas batubara sangat dikontrol oleh sistem cleat yang berkembang pada lapisan batubara tersebut. Studi mengenai karakteristik cleat pada batubara sangat diperlukan untuk melihat kemungkinan jalur keluarnya gas metana dalam batubara. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara karakteristik batubara, sistem cleat yang berkembang, dan pendekatan nilai permeabilitasnya. Anggota M3 Formasi Muaraenim

diambil sampel batubaranya untuk dilakukan analisis microcleat. Anggota M3 ini merupakan lapisan batubara yang tidak dalam, memiliki ketebalan yang cukup baik, dan merupakan target selain anggota M2 yang telah terbukti mempunyai potensi gas metana batubara. Analisis microcleat dilakukan untuk mengamati face cleat, butt cleat, aperture, dan spasi. Korelasi hasil perhitungan permeabilitas terhadap kandungan gas dan kedalaman lapisan batubara memberikan gambaran bahwa dengan semakin besar nilai permeabilitas, maka semakin besar kandungan gasnya.

Kata kunci: gas metana batubara, cleat, permeabilitas, kandungan gas

Robet Lumban Tobing
(Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi)

KARAKTERISTIK SERPIH MINYAK PADA FORMASI SINAMAR BERDASARKAN DATA PENGEBORAN BRP-02 DI DAERAH RANTAU PANDAN, PROVINSI JAMBI

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2021 Vol. 16 No. 1 Hal. 27 - 36

Serpih minyak merupakan batuan sedimen halus yang mengandung material organik dan dapat menghasilkan minyak ketika diekstraksi. Formasi Sinamar di daerah penelitian diduga merupakan formasi pembawa serpih minyak. Formasi ini terletak di bagian barat dan tenggara daerah penelitian dan diperkirakan berumur Oligosen. Berdasarkan data sumur BRP-02, litologi Formasi Sinamar di daerah penelitian tersusun oleh serpih, batulanau, batupasir dan batulempung karbonan. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui karakter serpih minyak pada Formasi Sinamar yang tersebar di daerah Rantau Pandan, Kabupaten Bungo, Provinsi Jambi. Sebanyak 25 sampel batuan serpih diambil dari sumur pengeboran untuk dilakukan analisis-analisis: maseral, reflektansi vitrinit, pirolisis, total organic carbon (TOC) dan ekstraksi batuan. Hasil analisis maseral yang dilakukan diketahui bahwa sampel batuan didominasi oleh maseral liptinit. Hasil analisis TOC menunjukkan bahwa kandungan material organik sampel batuan berkisar 3,40-17,60% merupakan batuan sedimen yang berpotensi baik hingga sangat baik sebagai batuan sumber hidrokarbon. Tingkat kematangan material organik berada pada tahap belum matang hingga lewat matang. Berdasarkan data hasil ekstraksi batuan yang dilakukan terhadap sampel batuan diperoleh kandungan minyak berkisar 10 -150 liter/ton batuan atau dengan rata-rata 56 liter/ton batuan.

Kata kunci: serpih minyak, material organik, analisis pirolisis, analisis TOC, ekstraksi batuan

Ronaldo Irzon, Kurnia, Purnama Sendjaja, dan Verry E. Setiawan
(Pusat Survei Geologi)

KAOLINITISASI DAN MOBILITAS UNSUR TANAH JARANG PADA PROFIL PELAPUKAN BATUAN GUNUNGAPI DI PUNCAK MANDEH, SUMATRA BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Mei 2021 Vol. 16 No. 1 Hal. 37 - 51

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Mei 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Proses pelapukan berlangsung di permukaan bumi terutama pada wilayah beriklim tropis dan menyebabkan mobilisasi elemen dari batuan induk. Pelapukan menarik untuk dipelajari karena seringkali dikaitkan dengan pengayaan bahan-bahan ekonomis seperti besi, alumina, dan UTJ. Profil pelapukan batuan gunungapi Tersier tersebar di Sumatra yang beriklim tropis. Studi ini bertujuan untuk menjabarkan proses kaolinitisasi dan proses mobilisasi UTJ pada profil pelapukan batuan gunungapi di timur Puncak Mandeh, Sumatra Barat. Perangkat XRF dan ICP-MS dimanfaatkan untuk mengukur kelimpahan oksida utama, unsur jejak, dan UTJ. Kenaikan IOL terbukti terjadi searah dengan tingkat pelapukan. Kaolinitisasi pada pelapukan di Puncak Mandeh ditunjukkan oleh diagram segitiga $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Feldspar dan mika yang rentan terhadap pelapukan langsung berubah menjadi kaolinit pada tahap awal pelapukan untuk menjelaskan variasi oksida utama pada profil pelapukan. Proses pelapukan telah meningkatkan jumlah alumina dan besi secara signifikan relatif terhadap batuan induk. Tidak terdapat pengayaan UTJ pada horizon pelapukan dibandingkan dengan komposisinya pada batuan induk. Sebagian Ce teroksidasi menjadi Ce^{4+} dan tertinggal di horizon saprolit. Kondisi ini membuat mobilitas Ce yang searah tingkat pelapukan berbeda dengan unsur UTJ lainnya.

Kata kunci: batuan gunungapi, kaolinitisasi, pelapukan, UTJ

Ferian Anggara^{1,2}, Himawan T.B.M. Petrus^{2,3}, Dea Anisa Ayu Besari¹, Hotden Manurung³, dan Febry Yulindra Abdi Saputra²

(¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, ²Pusat Kajian Sumberdaya Bumi Non-Konvensional, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, dan ³Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada)

TINJAUAN PUSTAKA KARAKTERISASI DAN POTENSI PEMANFAATAN FLY ASH DAN BOTTOM ASH (FABA)**Buletin Sumber Daya Geologi****BSDG Mei 2021 Vol. 16 No. 1 Hal. 53 - 70**

Fly ash dan bottom ash (FABA) merupakan limbah hasil sisa pembakaran batubara dari pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). FABA yang dihasilkan akan terus meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik yang harus dipenuhi. Komposisi FABA secara umum berupa silika, alumina, oksida besi, dan senyawa oksida lainnya. Abu yang dihasilkan dari pembakaran batubara berpotensi secara ekonomis karena mengandung beberapa unsur berharga antara lain Ge, Ga, unsur tanah jarang (REY), Nb, Zr, V, Re, Au, Ag, dan logam dasar seperti Al. Karakteristik fisik dan kimia FABA merupakan aspek penting yang dapat memengaruhi, baik potensi penggunaan maupun metode pembuangan atau penyimpanan limbah yang akan dilakukan. Potensi pemanfaatan FABA telah banyak digunakan pada bidang geoteknik, salah satunya diaplikasikan sebagai material geopolimer. Selain itu, FABA juga mengandung cenosphere yang merupakan salah satu material bernilai ekonomis tinggi dan telah banyak diaplikasikan pada berbagai bidang industri. Berbagai teknik pemisahan material untuk meningkatkan potensi nilai guna FABA telah berhasil dikembangkan, antara lain metode ekstraksi cenosphere, logam berharga serta unsur jejak seperti REY, juga unburned carbon.

Kata kunci: FABA, komposisi, pemanfaatan, REY, cenosphere, geopolimer



Ubahan Hidrotermal Argilik - Klorit di Bukit Bedawang Kecamatan Ketungau Hulu, Kabupaten Sintang, Provinsi Kalimantan Barat (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2021)



Ubahan Hidrotermal Argilik pada Lokasi Penambangan Tradisional di Bukit Bedawang, Kecamatan Ketungau Hulu, Kabupaten Sintang, Provinsi Kalimantan Barat (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2021)

GALERI FOTO



Urat Kuarsa Pirit - Kalkosit di Bukit Bedawang - Kumbo, Kecamatan Ketungau Hulu, Kabupaten Sintang, Provinsi Kalimantan Barat (Hartaja Muhamad Hatta Wicaksono, 2021)



Penambangan Dolomit di Daerah Desa Tlogosadang, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2021)



Rijang di Daerah Desa Latea, Kecamatan Seram Utara Barat, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku (Irwan Muksin, 2021)



Rijang dengan Urat-urat Kuarsa di Daerah Desa Latea, Kecamatan Seram Utara Barat, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku. (Irwan Muksin, 2021)



Singkapan Batugamping yang Menunjukkan Tekstur Khas Berupa Liase di Daerah Desa Sidokelar, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2021)



Singkapan Fosfat di Daerah Desa Bluri, Kecamatan Solokuro, Kabupaten Lamongan, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2021)



Singkapan Kalsit pada batugamping di Daerah Desa Sidokelar, Kecamatan Paciran, Kabupaten Lamongan, Provinsi Jawa Timur (Irwan Muksin, 2021)



Tebing Marmer pada Batuan Pra Tersier di Wilayah Halaban, Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatra Barat (Rizki Anshari, 2021)



Ngarau Marmer Merah Paleozoikum Formasi Kuantan di Kabupaten Lima Puluh Kota, Provinsi Sumatra Barat (Rizki Anshari, 2021)



Pengukuran Topografi untuk Mendukung Survei Seismik Batubara Daerah Babattoman, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatra Selatan (Uju Darsita, 2021)



Lapisan Damar dalam Batubara, Formasi Pamaluan, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur (Raden Maria Ulfa, 2021)



Pita-pita Batubara dalam Lapisan Batupasir, Formasi Pamaluan, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur (Raden Maria Ulfa, 2021)



Lapisan Batubara di Air Terjun, Formasi Pamaluan, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur (Raden Maria Ulfa, 2021)



Lapisan Batubara di Daerah Rawa Bakau, Formasi Pulaubalang, Kabupaten Paser, Provinsi Kalimantan Timur (Raden Maria Ulfa, 2021)



Lava Flow di Kaki Gunung Rinjani, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Widya Asoka Suleman, 2021)



Gunung Barujari atau Lebih Sering Disebut Anak Gunung Rinjani,
Berada di Danau Segara Anak (Kawah Gunung Rinjani)
Bisa Dilihat Terdapat Manifestasi Panas Bumi Disekitarnya,
Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka Suleman, 2021)



Savana Propok Merupakan Kawah Purba Propok yang Kemudian Terisi Material Berumur Kuartar yang Berasal Dari Gunung Rinjani, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka Suleman, 2021)



Puncak Gunung Rinjani, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Widya Asoka Suleman, 2021)

PEDOMAN PENULISAN
Makalah/karya tulis ilmiah
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

ISI DAN KRITERIA UMUM

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

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

FORMAT

UMUM

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

NO	POKOK BAHASAN	POKOK PIKIRAN
I	Judul (<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, faxcimile 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

III	Pendahuluan (<i>Introduction</i>)	Bab ini dapat berisi latar belakang (alasan ilmiah dan maksud penelitian fenomena aktual bermasalah sebagai tema sentral penelitian), masalah aktual yang perlu solusi, pengantar tentang profil wilayah/lokasi kajian/riset, tujuan penelitian, spesifik, metode riset, hipotesis (kalau ada) dengan gaya bahasa lebih populer dengan bab dan sub-bab tidak perlu menggunakan nomor. Bab berisi pernyataan yang mencukupi sehingga pembaca dapat memahami dan mengevaluasi hasil penyelidikan/penelitian yang berkaitan dengan topik makalah/karya tulis.
IV	Metodologi (<i>Methodology</i>)	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.
V	Hasil dan Pembahasan (<i>Results and Discussion</i>)	<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>
VI	Kesimpulan dan Saran (<i>Conclusions and Recommendation</i>)	Berisi kesimpulan dan saran dari hasil uji hipotesis tentang penelitian, dan berisi segitiga konsistensi (masalah, tujuan dan kesimpulan).
VII	Ucapan Terima Kasih (<i>Acknowledgements</i>)	Dapat digunakan untuk menyebutkan sumber dana penyelidikan/penelitian dan untuk pernyataan penghargaan kepada institusi atau orang yang membantu dalam pelaksanaan penyelidikan/penelitian dan penulisan makalah/karya tulis.
VIII	Acuan (<i>References</i>)	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>)

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

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

Buku

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

Bab dalam Buku

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

Prosiding

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

Skripsi/Tesis/Disertasi

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

Informasi dari Internet

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

Wewenang Redaksi

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

Pengiriman Naskah

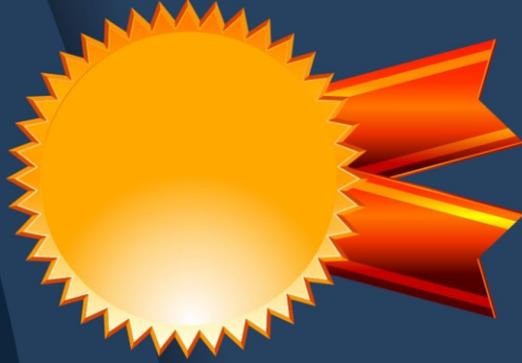
Penulis dimohon untuk mengirimkan 1 eksemplar naskah asli baik *hardcopy* maupun *softcopy* kepada:

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

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

SERTIFIKAT

Kementerian Riset dan Teknologi/
Badan Riset dan Inovasi Nasional



Petikan dari Keputusan Menteri Riset dan Teknologi/
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional
Nomor 200/M/KPT/2020

Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020
Nama Jurnal Ilmiah

Buletin Sumber Daya Geologi

E-ISSN: 25801023

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

Ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

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

Jakarta, 23 Desember 2020

Menteri Riset dan Teknologi/
Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional
Republik Indonesia,



Bambang P. S. Brodjonegoro

Alamat Redaksi

Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian 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

