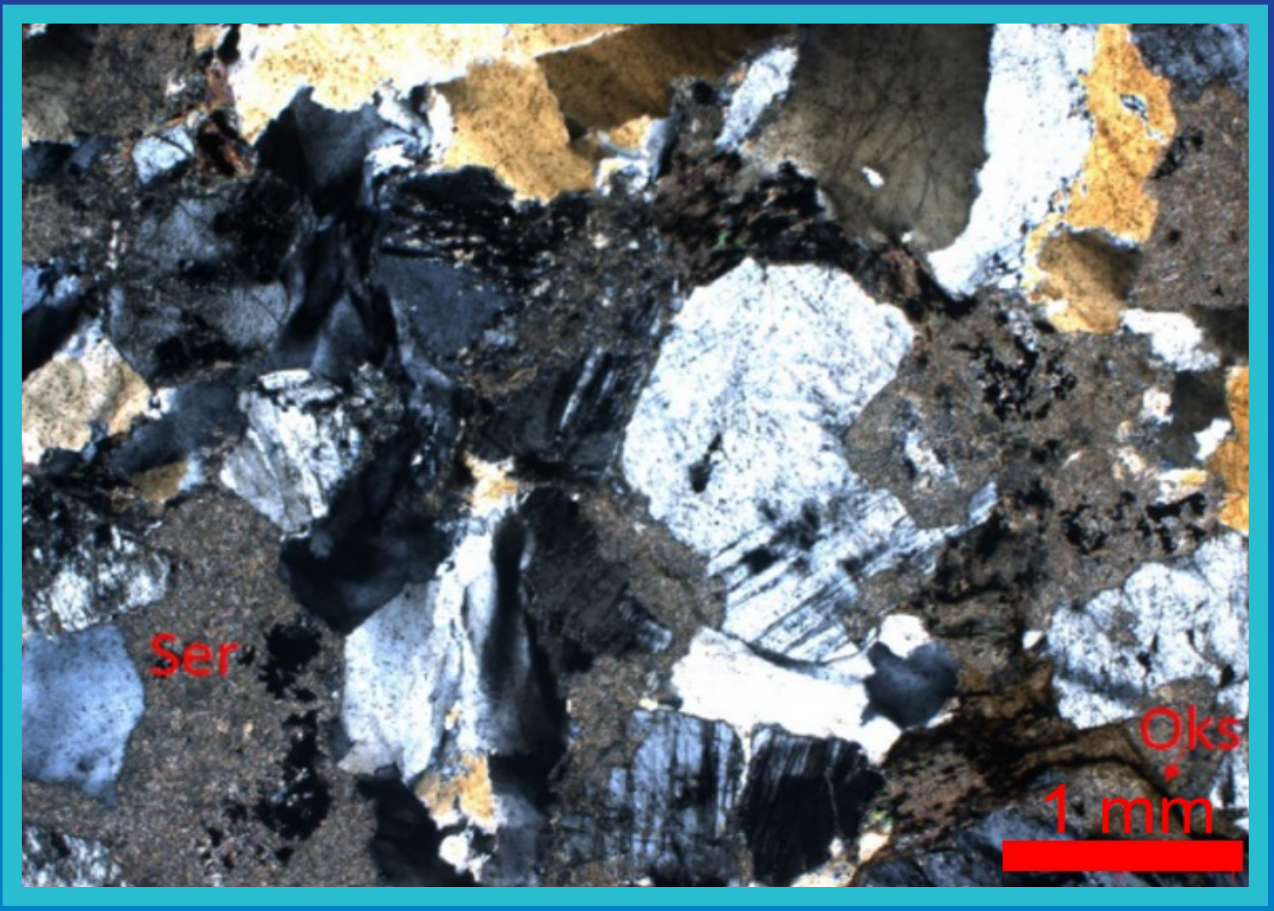
ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 No. 3, November 2022



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

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 17	No. 3	Halaman 139 - 205	Bandung November 2022	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Oksida besi (Oks) hadir sebagai urat yang memotong feldspar dan serisit (Ser). (Ana Nurul Hidayati, dkk., 2022)

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 3, November 2022

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

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

DEWAN REDAKSI

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

Managing Editor
Eko Suryanto, S.Kom.
Resmi Novianti, S.Kom.
Rijal Ahmad Taufik, S.T.
Ernawati, S.I.Pust.
Rahayu Gesang Kami
Riad Bakti Padilah, S.AP.

Editorial Board
Sumardi, S.T., M.M.
Qomariah, S.Kom., M.T.
Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si.
Ir. Prima Muharam Hilman, M.Sc.
Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi
Ir. Asep Suryana
Ir. Sri Widodo
Ir. Teuku Ishlah
Ir. Bambang Pardiarto
Dr. Siti Sumilah Rita Susilawati, S.T., M.Sc.
Ir. Rina Wahyuningsih
Fatimah, S.T., M.Sc.
Asep Sugianto, S.T., M.T.
Indra Sukmayana, S.T.

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

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

PENGANTAR REDAKSI

Di akhir tahun 2022, Buletin Sumber Daya Geologi hadir kembali berupa BSDG volume 17 Nomor 3. Secara konsisten ditampilkan lima makalah ilmiah yang pada edisi ini berisi tentang hasil kajian mineral, batubara dan panas bumi. Para penulis yang berkontribusi berasal dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Maluku, Universitas Gajah Mada, Institut Teknologi Bandung, Universitas Indonesia.

Dua makalah tentang sumber daya mineral yaitu makalah berupa kajian alterasi hidrotermal endapan sinabar di Iha – luhu Pulau Seram, Maluku. makalah kedua berupa distribusi unsur utama dan unsur tanah jarang pada hasil pelapukan batuan granitoid di daerah Parmonangan, Tapanuli Utara.

Makalah yang mengulas tentang batubara yaitu pemodelan dan estimasi potensi batubara di Daerah Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi. Data yang dipergunakan untuk membuat pemodelan berasal dari pemetaan geologi permukaan dan pengeboran inti sehingga dapat membuat bentuk model 3D lapisan batubara dan estimasi potensinya.

Sedangkan makalah tentang panas bumi berupa kajian karakteristik alterasi bawah permukaan di suatu lapangan panas bumi untuk dapat mengoptimalkan potensi panas bumi tersebut dan makalah yang lainnya berupa kajian perkiraan ulang cadangan mungkin panas bumi temperatur menengah di Indonesia yang dimaksudkan untuk memperoleh gambaran tentang potensi panas bumi Indonesia saat ini.

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

Salam sehat dan tetap semangat,

Dewan Redaksi

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

buletin
SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 3, November 2022

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

137 - 148 **ALTERASI HIDROTERMAL ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA, IHA – LUHU, PULAU SERAM, MALUKU**
HYDROTHERMAL ALTERATION OF CINNABAR DEPOSIT IN TEMBAGA HILL, IHA – LUHU - SERAM ISLAND, MALUKU
Herfien Samalehu, Arifudin Idrus, Nugroho Imam Setiawan

149 - 162 **DISTRIBUSI UNSUR UTAMA DAN UNSUR TANAH JARANG PADA PELAPUKAN BATUAN GRANITOID DI DAERAH PARMONANGAN, KABUPATEN TAPANULI UTARA**
DISTRIBUTION OF MAJOR ELEMENTS AND RARE EARTH ELEMENTS IN THE WEATHERED GRANITOID ROCKS IN THE PARMONANGAN AREA, NORTH TAPANULI REGENCY
Ana Nurul Hidayati, Nurcahyo Indro Basuki, Sulaeman, Bayu Sayekti

163 - 176 **PEMODELAN DAN ESTIMASI POTENSI BATUBARA DI DAERAH JANGGA, KABUPATEN BATANG HARI, PROVINSI JAMBI**
MODELING AND COAL POTENTIAL ESTIMATION IN JANGGA AREA, BATANG HARI REGENCY, JAMBI PROVINCE
Rizki Satria Rachman, Rino Destama Sugandhi, Rezky Aditiyo, Sigit Arso Wibisono

177 - 188 **KARAKTERISTIK ALTERASI BAWAH PERMUKAAN DI LAPANGAN PANAS BUMI "X", KABUPATEN SUKABUMI, PROVINSI JAWA BARAT**
CHARACTERISTICS ALTERATION OF SUB-SURVEY IN "X" GEOTHERMAL FIELD, SUKABUMI, WEST JAVA PROVINCE
Flaurentina Nadya, Aton Patonah, Undang Mardiana, Mochammad Nurhadi

189 - 205 **PERKIRAAN ULANG CADANGAN MUNGKIN PANAS BUMI TEMPERATUR MENENGAH DI INDONESIA**
MEDIUM TEMPERATURE GEOTHERMAL POSSIBLE RESERVE REASSESSMENT IN INDONESIA
Husin Nugraha, Rina Wahyuningsih, Tony Rahadinata

ABSTRAK MAKALAH
Oleh : Redaksi

GALERI FOTO
Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH
Oleh : Redaksi

ALTERASI HIDROTERMAL ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA, IHA – LUHU, PULAU SERAM, MALUKU

HYDROTHERMAL ALTERATION OF CINNABAR DEPOSIT IN TEMBAGA HILL, IHA – LUHU - SERAM ISLAND, MALUKU

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

ABSTRAK

Daerah Iha – Luhu berlokasi di bagian barat Pulau Seram yaitu sekitar 59,2 km dari Kota Piru. Secara geografis terletak pada 128º0'35" s.d 128º2'42" BT dan 3º20'40" s.d 3º22'05" LS dan termasuk dalam wilayah Kecamatan Huamual Kabupaten Seram Bagian Barat, Provinsi Maluku. Wilayah Iha – luhu tersusun atas litologi batuan metapelitik dan batuan malihan berderajat rendah yaitu satuan meta batupasir kuarsa – muskovit dan filit kuarsa – muskovit serta ditutupi secara tidak selaras oleh endapan aluvial diatasnya.

Daerah penelitian mempunyai tiga zona alterasi hidrotermal yaitu zona alterasi illit±kaolinit, zona alterasi illit±klorit dan zona alterasi Illit±smektit±kaolinit. Zona alterasi illit±kaolinit dicirikan dengan himpunan mineral lempung yaitu illit dan kaolinit. Alterasi ini berasosiasi dengan meta-batulanau kuarsa-muskovit dan dominan pada meta-batupasir kuarsa-muskovit. Intensitas alterasi sedang – kuat (*moderate to strong altered*) dengan parameter presentase kehadiran mineral alterasi > 75 %. Berdasarkan kumpulan mineral alterasi kaolinit dan illit, maka zona alterasi illit±kaolinit terbentuk pada temperatur <220º-300ºC. Zona Alterasi illit±klorit berasosiasi dengan pengayaan endapan bijih sinabar tipe urat (*fracture -related mineralization*) dan *disseminated* dimana pola alterasi merupakan pola alterasi *pervasive*. Zona ini dicirikan oleh kehadiran mineral lempung mika (illit) dengan kehadiran klorit dan kuarsa. Alterasi illit±klorit lebih dominan berasosiasi dengan filit kuarsa-muskovit dan meta-batulanau kuarsa-muskovit serta menyebar di bagian tengah Bukit Tembaga. Suhu pembentukan zona alterasi ini diperkirakan 250º - 300º C.

Zona alterasi illit±smektit±kaolinit menyebar secara luas di puncak Bukit Tembaga hingga pedataran rendah dengan luas area mencapai > 9,6 Km^2. Alterasi ini menyelubungi alterasi illit±klorit dan illit±kaolinit dengan pola alterasi *pervasive* dan intensitas alterasi tinggi/kuat (*strong altered*). Lempung pada zona ini merupakan alterasi mineral muskovit/serisit dan plagioklas. Kehadiran smektit pada zona alterasi ini mencerminkan kedalaman vertikal yang relatif jauh dari zona bijih (*ore*) atau pada bagian atas/top formasi dengan temperatur yang cenderung lebih rendah dibandingkan illit dan kaolinit. Suhu pembentukan zona alterasi ini diperkirakan pada temperatur 220º-300º C.

Kata kunci: Alterasi, hidrotermal, illit±kaolinit, illit±klorit, illit±smektit±kaolinit

ABSTRACT

Iha – Luhu area is located in the western part of Seram Island, which is about 59.2 km from city of Piru. Geographically, it is located at 128º0'35" to 128º2'42"East Longitude and 3º20'40" s.d 3º22'05"South Latitude and is included in Huamual sub-district, West Seram Regency, Maluku. Stratigraphy of Iha – Luhu is composed of metapelitic rock and low grade metamorphic lithologies, namely meta quartz – muscovite sandstone units and quartz – muscovite phyllite unit and is unconformaby covered by alluvial deposits.

Research area consists of three hydrothermal alteration zones which are mentioned as illite±kaolinite alteration zone, illite±chlorite alteration zone and Illit±smectite±kaolinite alteration zone. Illite±kaolinite alteration zone is characterized by assemblage of clay minerals, presumably illite and kaolinite. This alteration is associated with quartz-muscovite meta-siltstone and dominant occurred to quartz-muscovite meta-sandstone. Intensity of alteration is moderate to strong altered which mainly describing percentage of alteration mineral presence more than 75%. Based on assemblage of kaolinite and illite alteration minerals thus illite±kaolinite alteration zone was formed at temperatures <220°-300° C. Illite±chlorite alteration zone is associated with fracture-related mineralization and disseminated enrichment of cinnabar ore deposits where alteration pattern is a pervasive alteration show. This zone is characterized by presence of mica (illite) clay mineral and chlorite and quartz as well. Illite±chlorite alteration is more dominantly associated with quartz-muscovite phyllite and quartz-muscovite meta-siltstone and spread over in the middle of Bukit Tembaga. Formation Temperature of this alteration zone is estimated at 250° – 300° C.

Illite±smectite±kaolinite alteration zone spread widely on top of Bukit Tembaga to lowlands and reaching area of > 9.6 Km^2. This alteration covers illite ± chlorite and illite ± kaolinite alterations with pervasive alteration pattern and strong altered alteration. Clay in this zone occurred due to alteration of muscovite/sericite and plagioclase minerals. Presence of smectite in this alteration zone reflects vertical depth that is relatively far from ore zone or at top of formation with temperature tend to be lower than illite and kaolinite minerals. Formation temperature of this alteration zone is estimated at 220°-300° C.

***Keywords**: Alteration, hydrotermal, illite±kaolinite, illite±chlorite, illite±smectite±kaolinite*

PENDAHULUAN

Alterasi hidrotermal merupakan pergantian mineralogi dan komposisi kimia ketika batuan berinteraksi dengan fluida hidrothermal (White, 1996). Himpunan mineral alterasi hidrotermal dan zonasinya berguna untuk mengetahui genesa dan tipe endapan bijih. Identifikasi kumpulan mineral alterasi hidrotermal dapat menentukan temperatur formasi dan pH oleh fluida hidrotermal. Proses alterasi hidrotermal melibatkan perubahan komposisi fluida hidrotermal dengan batuan samping (*wall rock*) serta perubahan karakteristik kimia batuan induk (*host rock)* yang terdiri dari batuan tidak atau sedikit teralterasi (*least altered*) dan batuan teralterasi (*altered rock*).

Lokasi Iha – Iuhu terletak di bagian barat pulau Seram yang sebagian besar merupakan morfologi perbukitan Bukit Tembaga dan sisanya merupakan dataran rendah (Tjokosapoetro dan Budhitrisna, 1982; Tjokosapoetro dkk., 1993). Geologi wilayah penelitian tersusun oleh batuan metamorf kompleks Taunusa yang merupakan batuan metapelitik dan batuan metamorf derajat rendah (Gambar 1 dan Gambar 2).

Studi alterasi hidrotermal di daerah penelitian bertujuan untuk menentukan kumpulan alterasi hidrotermal endapan sinabar di wilayah Iha - Luhu yang merupakan alterasi argilik.

Penentuan zona alterasi pada wilayah Iha - Luhu mengacu pada klasifikasi Lawless dan White, (1997) Kingston Morrison (1995), Corbett dan Leach (1996) dan Thompson dan Thompson (1996).

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari pengambilan data lapangan, pemetaan alterasi hidrotermal, pengamatan petrologi dan mineralogi serta analisis XRD. Tujuan analisis XRD adalah untuk mengidentifikasi jenis mineral lempung, khususnya untuk mengidentifikasi alterasi argilik di Bukit Tembaga.

Metode pengambilan data terdiri dari pemetaan geologi permukaan (*surface*

mapping) serta pengamatan alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian. Metode Analisis yang digunakan antara lain analisis data terkait geologi dan alterasi serta analisis laboratorium yang terdiri dari petrografi dan mineragrafi serta analisis X-Ray Diffraction (XRD).

GEOLOGI

Morfologi

Morfologi daerah Iha – Luhu terdiri dari Satuan perbukitan berlereng curam – landai dan satuan dataran rendah (Samalehu, 1993). Satuan perbukitan berlereng curam – landai menempati sekitar 81,03% dari luas seluruh daerah penelitian dengan luas sekitar 9,67 km^2. Penyebarannya di bagian utara Bukit Tembaga yang merupakan wilayah perbukitan serta memanjang barat – timur. Satuan bentang alam ini dikontrol proses geologi muda berupa pelapukan, erosi dan gerakan tanah. Tingkat pelapukannya relatif tinggi dan tanah dijumpai pada lereng- Bukit Tembaga. Pemanfaatan satuan ini sebagai kawasan hutan heterogen, lahan pertanian dan perkebunan.

Satuan dataran rendah menyebar dengan luas sekitar 2,26 km^2 atau 18,97 % dari luas daerah penelitian yang memanjang timur - barat daerah penelitian dan umumnya merupakan morfologi pedataran pantai. Persentase kelerengan berkisar 0% - 2% yang meliputi daerah Bok-bok, Iha, Batukapal, Dusun Hulung serta sungai - sungai utama yaitu Wae Aeputi, Wai Hulung, Wae Airmati, Wae Samhitu dan Wae Tihua. Morfologi ini dominan dimanfaatkan sebagai permukiman penduduk. Satuan morfologi ini didominasi oleh bahan rombakan batuan dan sisa tumbuhan yang menyusun satuan endapan alluvial.

Stratigrafi

Stratigrafi daerah Iha – Luhu tersusun dari batuan metamorf berderajat rendah dan batuan metapeltik dari Kompleks Taunusa yaitu satuan meta batupasir kuarsa – muskovit dan satuan filit kuarsa muskovit yang berumur Miosen Tengah – Pliosen dan secara tidak selaras di atasnya diendapkan endapan alluvial. Stratigrafi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

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

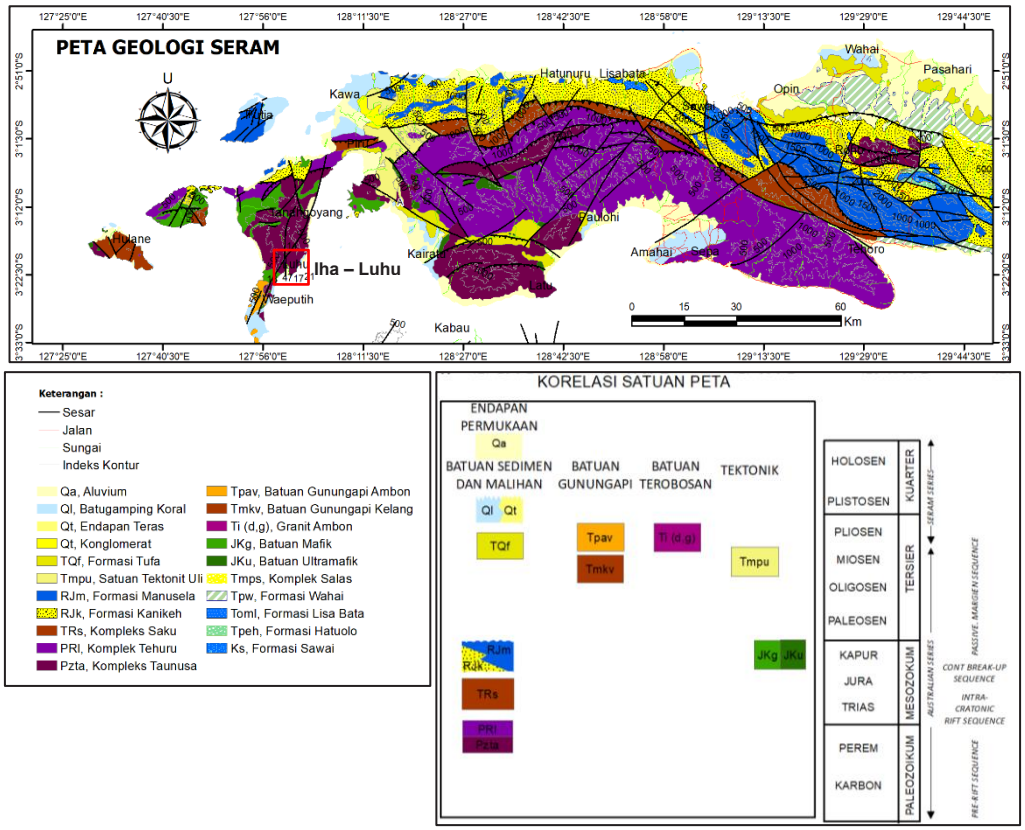
Satuan Meta-batupasir kuarsa – muskovit. Terdiri atas perselingan Meta-batupasir kuarsa – muskovit dan Meta-batulanau kuarsa – muskovit dan tersingkap baik di punggung Bukit Tembaga dan bagian selatan daerah penelitian. Jurus perlapisan (*strike*) berarah timur laut – barat daya dan kemiringan 17 – 41 derajat, umumnya tersusun oleh komposisi mineral muskovit, kuarsa, dan lempung. Di wilayah penelitian, meta-batupasir kuarsa – muskovit dan meta-batulanau kuarsa – muskovit telah teralterasi dengan pola *pervasive – Selectively pervasive,* intensitas alterasi tinggi (*strong altered*).

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

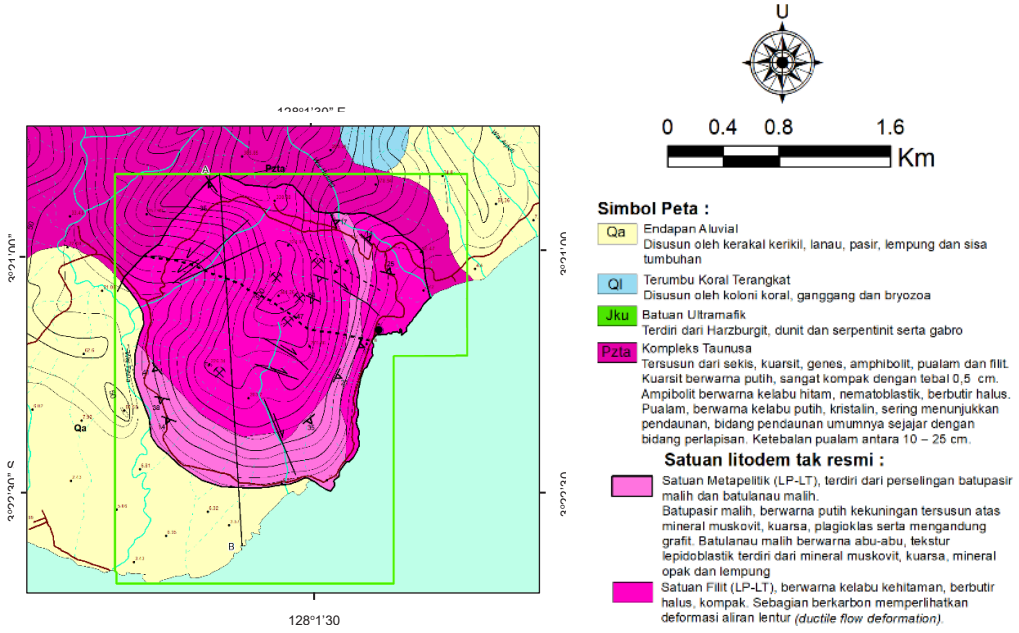
Struktur geologi

Pulau Seram dan Busur Banda dikenal sebagai zona interaksi antara Lempeng Australia dan Lempeng Eurasia yang merupakan batas konvergen Busur Banda berbentuk “U” (Patria dan Hall, 2018). Iha – Luhu merupakan daerah di bagian barat Pulau Seram dengan struktur yang berkembang berupa sesar geser dengan liniasi berarah timur laut – barat daya dan

tenggara – baratlaut dan mengontrol pola mineralisasi sinabar di lokasi penelitian. Lipatan antiklin yang terbentuk pada punggungan Bukit Tembaga dibagian utara timur laut ditunjukkan dengan kemiringan (*dip*) foliasi batuan antara 25 – 64 derajat yang cenderung berarah timur laut – barat daya dengan sudut kemiringan landai – curam.



Gambar 1. Sebagian Peta geologi Seram (Tjokosapoetro dkk., 1993)



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

HASIL DAN PEMBAHASAN

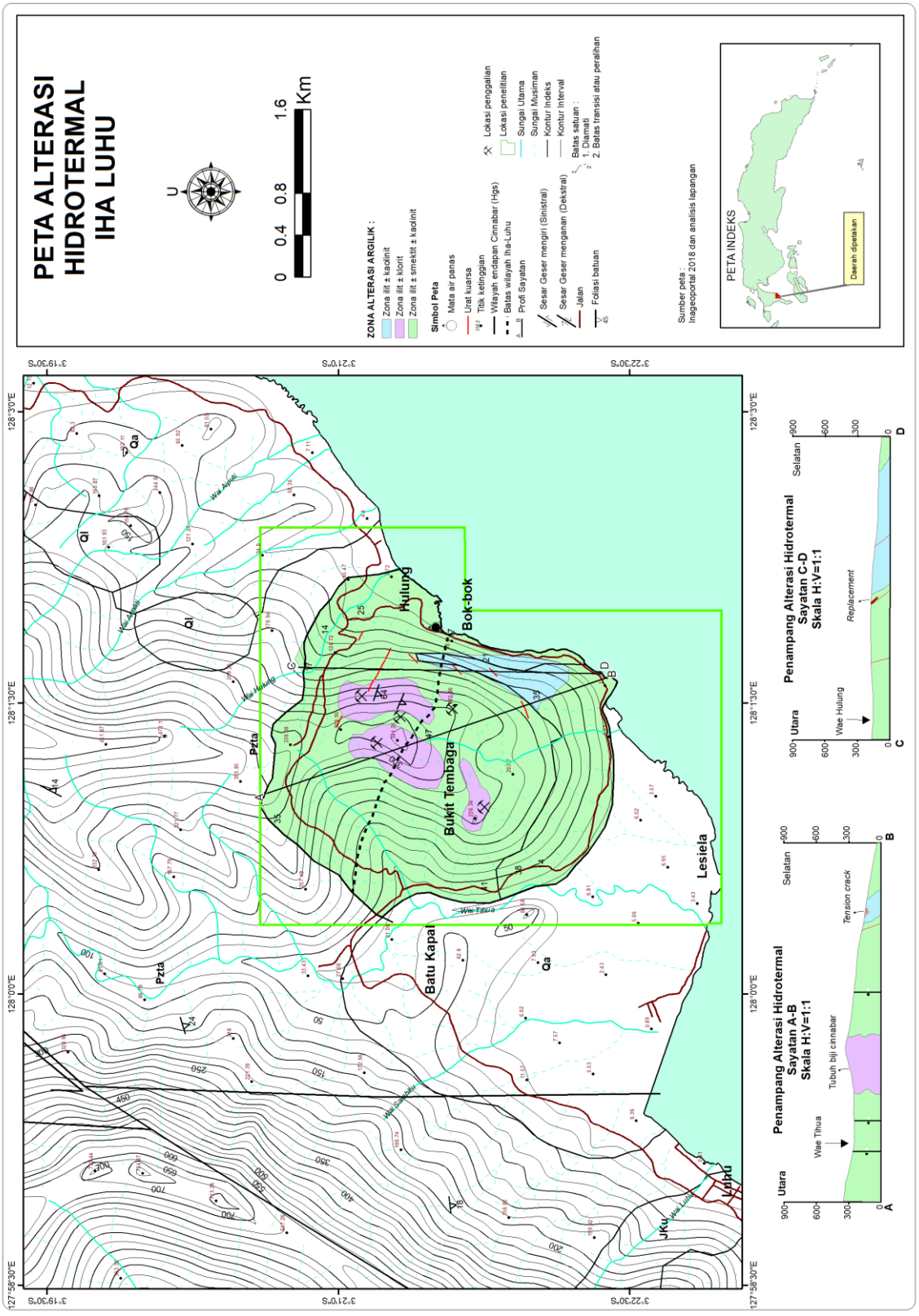
Pembagian zona alterasi hidrotermal di Bukit Tembaga didasarkan atas pengamatan lapangan dan disesuaikan dengan tipe alterasi pada Tabel 1 dan Tabel 2. Selain itu, tingkat alterasi dan mineral alterasi yang terbentuk ditunjang dengan menggunakan pengamatan petrografi. Karakteristik mineral pada sampel batuan terutama jenis - jenis mineral lempung dianalisis dengan menggunakan XRD.

Tabel 1. Temperatur pembentukan beberapa mineral alterasi (Hedenquist, 1997; Lawless dan White, 1997; Corbett dan Leach, 1996)

Kumpulan mineral alterasi	Hedenquist, 1997	Lawless dan White, 1997	Corbett dan Leach, 1996
Kaolin	< 200°C	< 220°C	< 150 - 200°C
Dikit	150 - 250	200 - 250°C	150 – 250
Smektit	<220	< 150 jarang sampai 200°C	< 100 - 150°C
Illit – smektit	150 - 220°C	150 - 230°C	100 - 200°C
Illit	>200°C	230 - 300°C	200 - 250°C
Serisit	-	> 270°C	> 200 - 250°C
Klorit – smektit	100 - 180°C	< 230°C biasanya < 200°C	-
Klorit	> 120 - 300°C	< 300°C	-
Piropillit	>100 - 300°C	> 260°C	200 - 250°C
Paragonit	-	> 260°C	-
Epidot	> 200 - 300°C	> 240°C	180 - 300°C
Prehnit	-	210 - 300°C	250 - 300°
Kalsit	< 300°C	< 300°C	-
Ankerit	-	> 210°C	-
Phengit	-	-	> 250 - 300°

Tabel 2. Kisaran temperatur mineralisasi sulfida dan oksida (Kingston Morisson, 1995; Reyes, 1990)

Mineralisasi sulfida dan oksida	Kisaran temperatur (°C)			
	0°	100°	200°	300°
Pirit				
Kalkopirit				
Magnetit				
Bornit				
Kovelit				
Sfalerit				
Galena				
Kalkosit				
Limonit				
Kalaverit				
Emas				



Gambar 3. Peta alterasi hidrotermal wilayah Iha – Luhu

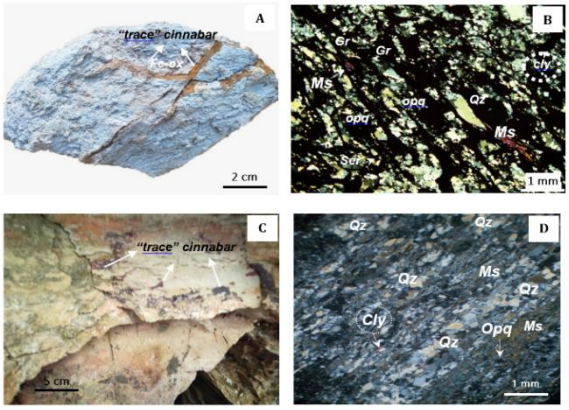
Berdasarkan hasil pengamatan di lapangan, jenis alterasi yang berkembang di wilayah Bukit Tembaga Iha – Luhu adalah alterasi argilik. Batuan yang teralterasi merupakan batuan metapelitik dan filit kuarsa-muskovit yang tersebar secara merata dan memiliki karakteristik fisik lunak hingga sedang dengan intensitas alterasi sedang-kuat (*moderate to strong altered*).

Meskipun alterasi cenderung intensif di Bukit Tembaga, namun beberapa sampel batuan masih memperlihatkan struktur sedimen asli. Dengan mengacu pada kehadiran himpunan mineral sekunder serta jenis lempung yang dijumpai di lapangan berdasarkan analisis XRD, maka zona alterasi argilik di daerah penelitian dibagi ke dalam 3 (tiga) kumpulan zona alterasi yaitu alterasi illit±kaolinit, alterasi illit±klorit dan alterasi Illit±smektit±kaolinit. Penyebaran dan luasan alterasi argilik di wilayah Bukit Tembaga Iha - Luhu tersebut ditampilkan dalam peta alterasi hidrotermal, Iha – Luhu (Gambar 3).

Zona illit±kaolinit

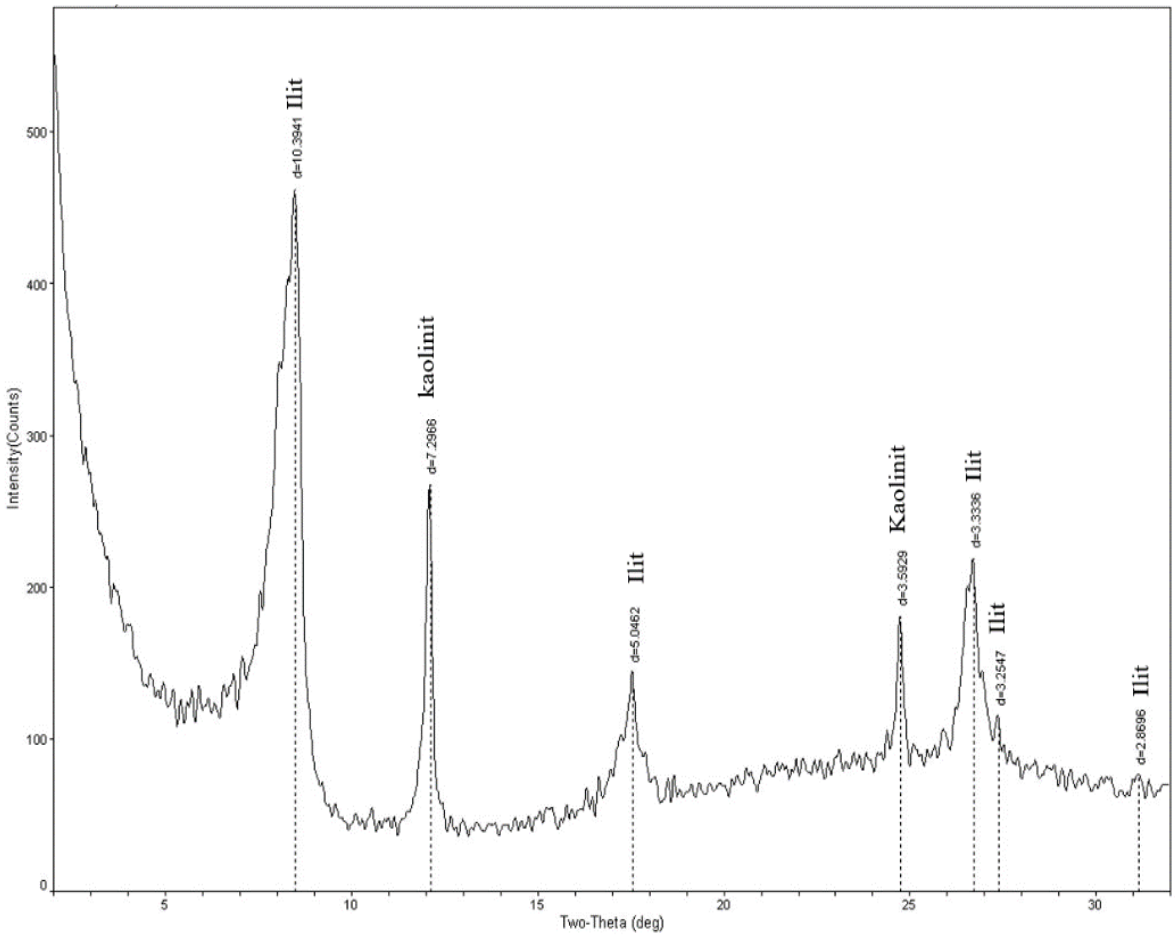
Alterasi illit±kaolinit terletak di Bukit Tembaga, dicirikan dengan himpunan mineral lempung yaitu illit dan kaolinit, berasosiasi dengan batuan metapelitik yaitu meta-batulanau kuarsa-muskovit dan dominan pada meta-batupasir kuarsa-muskovit. Intensitas alterasi sedang – kuat (*moderate to strong altered*) dengan parameter presentase kehadiran mineral alterasi >75%. Jenis alterasi yang terbentuk menggantikan seluruh atau sebagian besar mineral primer, umumnya muskovit/serisit dan plagioklas meskipun dengan intensitasnya yang berbeda. Alterasi illit±kaolinit ini terbentuk pada kedalaman yang relatif jauh dari zona bijih serta adanya asosiasi grafit dan mineral opak. Alterasi ini terjadi di luar batas zona urat kuarsa dan endapan sinabar dengan asosiasi urat kuarsa masif. Kehadiran mineral Grafit terbentuk oleh metamorfisme regional di wilaya Bukit Tembaga.

Pada pengamatan lapangan zona ini menunjukan warna putih keabu–abuan, alterasi sebagian – menyeluruh (Gambar 4.A-C), sebagian besar komposisi penyusun batuan telah terubah ataupun hanya mineral tertentu yang tergantikan seperti muskovit dan serisit yang terubah menjadi illit dan kaolinit. Di bawah pengamatan mikroskop (Gambar 4.B), zona ini ditandai dengan ubahan sebagian. Lempung menggantian muskovit dan serisit serta tersusun sebagai massa dasar bersama kuarsa (Qz), opak (opq) dan grafit (gr). Alterasi illit±kaolinit memiliki penyebaran di bagian selatan Bukit Tembaga dan diselubungi oleh alterasi illit±smekit±kaolinit yang tersebar luas pada bagian utara dengan luasan mencapai 0,65 km^2.



Gambar 4. A. Sampel setangan yang diambil dari sampel alterasi illit±kaolinit (alterasi sebagian – menyeluruh) pada LH-02 dengan "*trace*" urat sinabar. B. Fotomikrograf polarisasi silang sampel meta-batupasir kuarsa-muskovit pada stasiun IHA-01 yang memperlihatkan mineral kuarsa (Qz), lempung (Cly), muskovit (Ms), serisit (ser) serta menunjukan asosiasi mineral opak (opq) dan grafit (Gr). C. "*Trace*" sinabar pada meta-batupasir kuarsa-muskovit terubah, ubahan sebagian pada stasiun LH-03. D. Fotomikrograf polarisasi silang pada stasiun LH-03 yang menunjukan mineral kuarsa (Qz), lempung (Cly), muskovit (Ms) dan mineral opak (opq).

Jenis lempung illit±kaolinit (Gambar 5) mendominasi sebagai alterasi pada komposisi utama filit kuarsa-muskovit dan batuan metapelitik yaitu muskovit/serisit serta plagioklas (potasium feldspar atau feldspar plagioklas). Berdasarkan kumpulan mineral alterasi kaolinit dan illit, maka zona alterasi illit±kaolinit terbentuk pada temperatur <220-300°C (Lawless dan White, 1997).



Gambar 5. Hasil analisis XRD (*Clay-Ar Dried*) pada sampel LH - 03

Zona illit±klorit

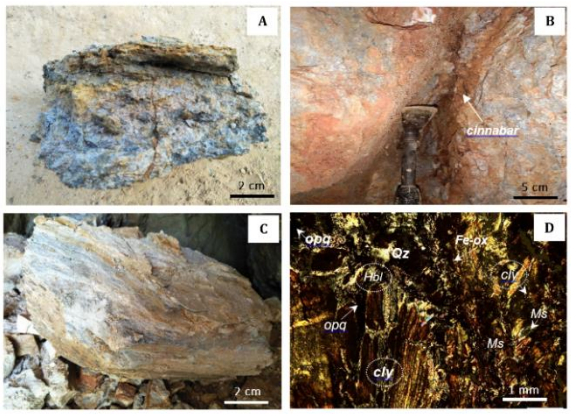
Alterasi ini dicirikan oleh kehadiran mineral lempung mika (illit), klorit dan kuarsa. Alterasi illit±klorit dominan berasosiasi dengan filit kuarsa-muskovit dan batulanau serta menyebar di bagian tengah Bukit Tembaga. Pada pengamatan di lapangan, alterasi ini berasosiasi dengan pengayaan endapan bijih sinabar tipe urat (*fracture-related mineralization*) dan *disseminated* dengan pola alterasinya menyeluruh, terbentuk menggantikan sebagian besar mineral pembentuk batuan.

Illit menggantikan mika dan serisit sedangkan klorit merupakan alterasi dari hornblende dan plagioklas. Zona alterasi dicirikan dengan warna putih kehijau-hijauan, menunjukan adanya dominasi ubahan dari *clay* dan klorit. Pada pengamatan mikroskop (Gambar 6.D) memperlihatkan adanya kehadiran mineral hornblende (Hb), kuarsa (Qz), opak (opq), oksida besi (Fe-ox), dan lempung (*clay*).

Kehadiran mineral hornblende pada meta-batulanau kuarsa-muskovit di Bukit Tembaga merupakan proses metamorfisme yang berkaitan atau berasosiasi dengan metamorfisme basal (Pownall dkk., 2013). Hornblende kemudian teralterasi menjadi klorit dan umumnya terbentuk pada kondisi dengan temperatur rendah s.d. tinggi dengan asosiasi mineral ini hadir dan melimpah pada zona bijih (*ore*). Batuan induk (filit) yang mengalami ubahan alterasi intensif menjadi rapuh pada zona yang berasosiasi dengan zona bijih dan dipengaruhi oleh kontrol struktur yang berarah utara baratlaut - selatan tenggara dan utara timurlaut - selatan baratdaya.

Penyebaran alterasi illit±klorit berada pada bagian puncak Bukit Tembaga**,** berasosiasi atau dekat dengan bijih sinabar dengan zona

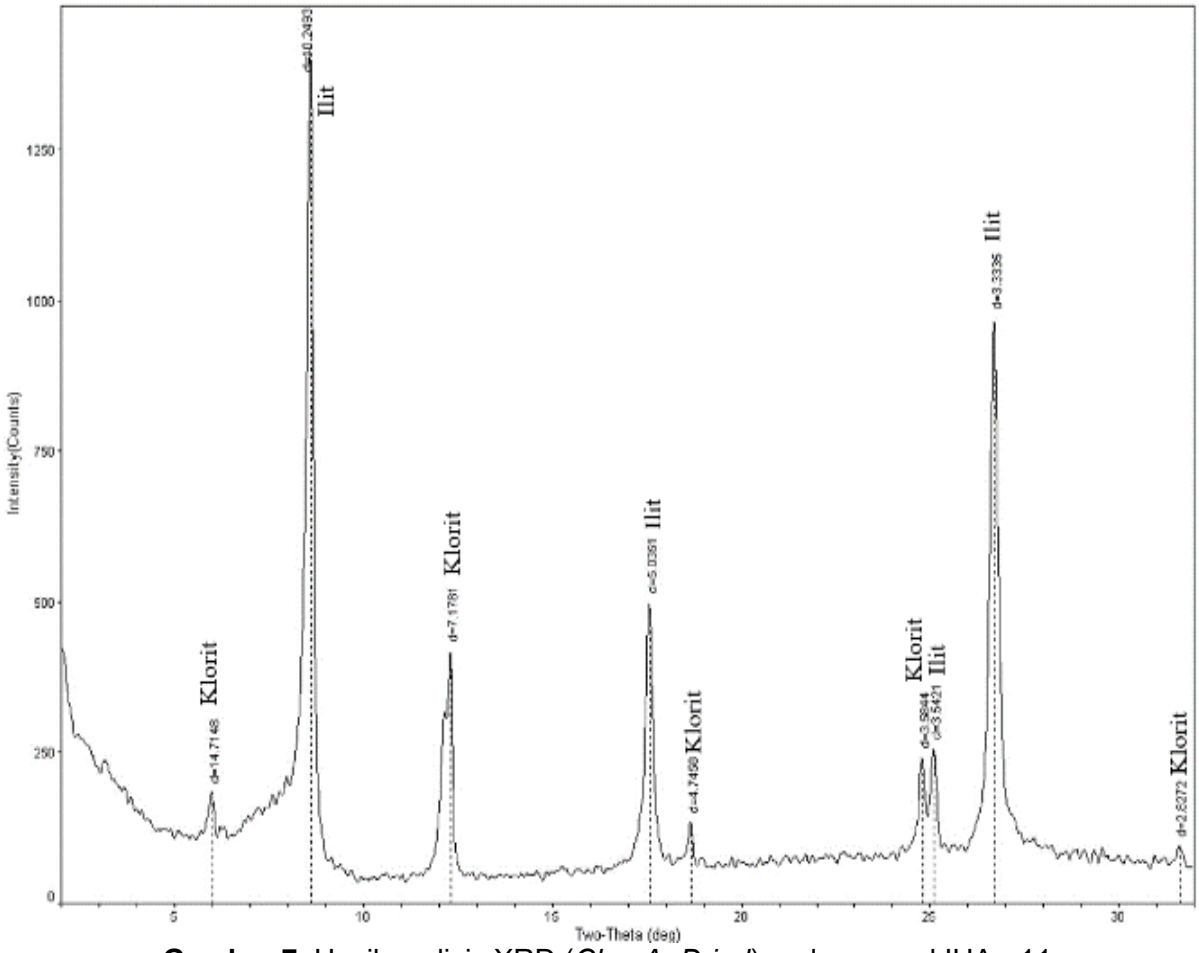
pelamparan alterasi pada 4 zona bijih utama di Bukit Tembaga yaitu 230 m, 500 m, 800 m dan < 1 km. Zona alterasi ini mengelilingi alterasi illit±smektit±kaolinit dengan arah penyebaran relatif utara–selatan dan sebagian barat – timur.



Gambar 6. Alterasi illit±klorit di Iha-Luhu: A. Sampel setangan sampel IHA-11. B. Zona bijih (*ore*) urat sinabar yang berasosiasi dengan alterasi ilit±klorit di Bukit Tembaga. C.*Close-up* filit kuarsa-muskovit teralterasi, *selectively - pervasively altered* pada stasiun IHA-12. D. Fotomikrograf polarisasi silang meta-batulanau kuarsa stasiun RMT-01 yang memperlihatkan mineral hornblende (Hbl), muskovit (Ms), kuarsa (Qz), mineral opak (opq), oksida besi (Fe-Ox) dan lempung (*cly*).

Berdasarkan kehadiran himpunan mineral klorit, ilit dan kuarsa maka kisaran temperatur pembentukan dari alterasi ini adalah sekitar 250 - 300°C. (Hedenquist, 2000; Lawless dan White, 1997; Corbett dan Leach,1996; Corbett dan Leach, 1997).

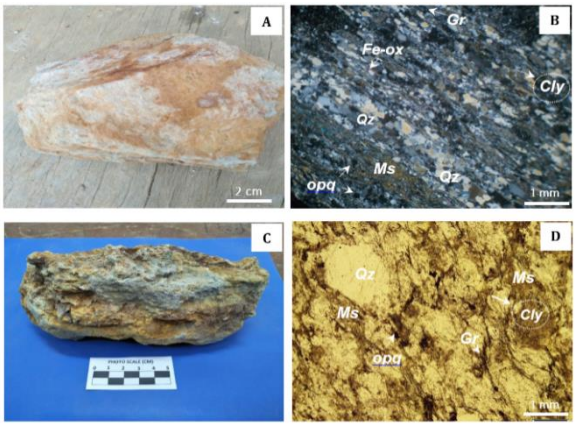
Data XRD alterasi illit±klorit pada sampel IHA - 11 ditunjukan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil analisis XRD (*Clay-Ar Dried*) pada sampel IHA - 11

Zona illit±smektit±kaolinit

Zona alterasi illit±smektit±kaolinit menyebar secara luas di puncak Bukit tembaga hingga pedataran rendah mencapai luas area >9,6 Km^2. Karakteristik alterasi illit±smektit± kaolinit dicirikan dengan warna tanah putih abu-abu, lepas namun secara umumnya masih dijumpai foliasi batuan metamorf. Alterasi ini menyelubungi alterasi illit±klorit dan illit±kaolinit serta merupakan alterasi terluas di wilayah penelitian.



Gambar 8. A. Sampel setangan yang diambil dari sampel alterasi illit±smektit±kaolinit pada stasiun IHA-06 B. Fotomikrograf polarisasi silang (XPL) sampel meta-batupasir kuarsa-muskovit pada stasiun IHA-06 yang memperlihatkan mineral lempung (*cly*) yang menggantikan muskovit/serisit (Ms) atau *selectively pervasive alteration* serta berasosiasi dengan oksida besi (Fe-Ox), mineral kuarsa (Qz), opak (opq) dan grafit (Gr). C. Meta-batupasir kuarsa-muskovit yang diambil pada stasiun IHA-03. D. Fotomikrograf polarisasi sejajar sampel meta-batupasir kuarsa-muskovit stasiun IHA-03, *selectively pervasive alteration* yang memperlihatkan mineral lempung (cly) yang menggantian muskovit/serisit (Ms), serta berasosiasi dengan mineral kuarsa (Qz), opak (opq) dan grafit (Gr).

Alterasi yang dijumpai di lapangan berpola *pervasive*, artinya seluruh atau sebagian besar tergantikan sebagai mineral sekunder dengan tingkat intensitas alterasi tinggi/kuat (*strong altered*). Lempung yang terbentuk pada zona ini umumnya merupakan alterasi mineral muskovit/serisit dan plagioklas, tetapi pola intensitasnya berbeda (*pervasive*). Kehadiran smektit pada alterasi ini mencerminkan bahwa pada kedalaman vertikal dari tubuh bijih, smektit biasanya menunjukan relatif jauh dari zona bijih (*ore*) atau pada bagian atas/*top* formasi dengan temperatur yang cenderung lebih rendah dibandingkan illit dan kaolinit.

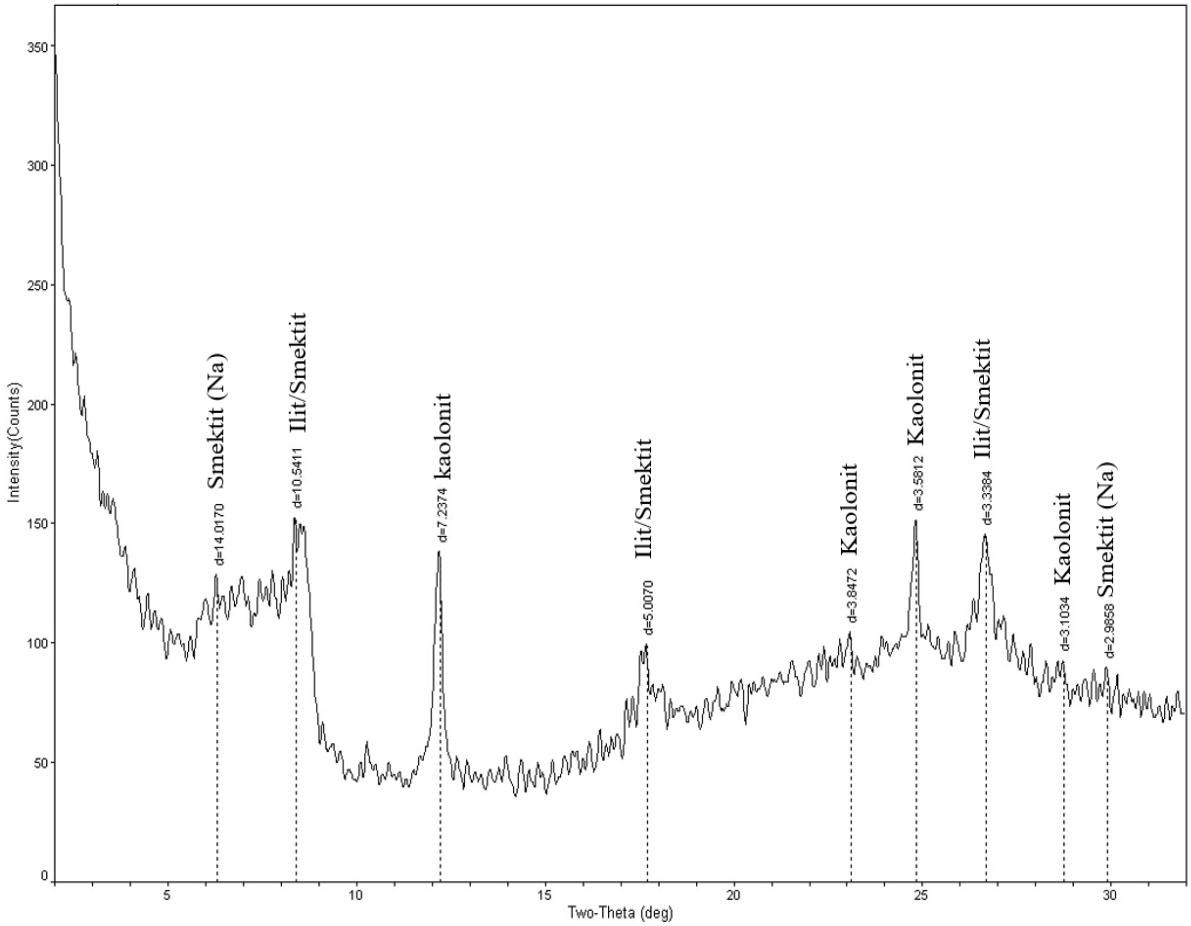
Di bawah pengamatan mikroskop (Gambar 8.B-D), pola alterasi *selectively pervasive alteration* ditandai dengan kehadiran lempung menggantikan muskovit/ serisit dan menyusun massa dasar dengan asosiasi mineral kuarsa (Qz), opak (opq) dan grafit (Gr). Alterasi illit±smektit±kaolinit memiliki penyebaran yang relatif dekat – jauh dari zona mineralisasi bijih, berasosiasi dengan sesar – sesar geser (*strike slip*) dan zona antikilinal yang terbentuk di bagian timur Bukit Tembaga.

Alterasi illit±smektit±kaolinit terjadi di luar batas zona urat endapan sinabar dengan asosiasi urat kuarsa masif. Di Desa Bok-Bok, alterasi ini berasosiasi dengan logam sulfida pirit±pirhotit, meskipun korelasi hubungan antara sulfida dengan sinabar dilapangan tidak diketahui.

Di zona alterasi ini, kehadiran mineral grafit terbentuk sebagai proses metamorfisme regional pada batuan filit kuarsa-muskovit dan metapelitik di wilayah Bukit Tembaga.

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, lempung di zona alterasi ini didominasi oleh illit, kaolinit dan smektit. Dalam lingkungan stabilitas alterasi hidrotermal, smektit terbentuk pada suhu berkisar <220°C (Hedenquist, 2000) sedangkan kaolin dan illit masing-masing terbentuk pada temperatur 220°C dan 300°C (Hedenquist, 2000; Lawless dan White, 1997). Oleh karena itu, zona alterasi ini diperkirakan terbentuk pada temperatur 220-300°C (Hedenquist, 2000; Lawless dan White, 1997; Corbett dan Leach,1996).

Data XRD alterasi illit±smektit±kaolinit pada sampel IHA - 06 ditunjukan pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil analisis XRD (*Clay-Ar Dried*) pada sampel IHA – 06

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan mengetahui zona alterasi di daerah Bukit Tembaga maka dapat diketahui genesa dan tipe endapan bijih sinabar yang terbentuk di daerah penelitian.
2. Zona alterasi illit±kaolinit, ditandai dengan mineral illit dan kaolinit yang berasosiasi dengan meta-batulanau kuarsa-muskovit dan dominan pada meta-batupasir kuarsa-muskovit. Intensitas alterasi sedang – kuat dengan parameter presentase kehadiran mineral alterasi > 75 % dan terbentuk pada temperatur <220°-300°C (Lawless dan White, 1997).
3. Zona Alterasi illit±klorit ditandai dengan kehadiran klorit dan kuarsa. Alterasi illit±klorit lebih dominan berasosiasi dengan filit kuarsa-muskovit. Alterasi ini berasosiasi dengan pengayaan endapan bijih sinabar tipe urat dan diseminasi. penyebaran alterasi ini di bagian tengah Bukit Tembaga dan terbentuk pada suhu 250° - 300° C. (Hedenquist, 2000; Lawless dan White, 1997; Corbett dan Leach,1996; Corbett dan Leach, 1997).
4. Zona alterasi illit±smektit±kaolinit menyelubungi alterasi illit±klorit dan illit±kaolinit**.** Lempung pada zona ini merupakan alterasi mineral muskovit/serisit dan plagioklas. Kehadiran smektit pada zona alterasi ini mencerminkan kedalaman vertikal yang relatif jauh dari zona bijih (*ore*) atau pada bagian atas/top formasi dengan temperatur yang cenderung lebih rendah dibandingkan illit dan kaolinit.
5. Hubungan antara zona alterasi dan mineralisasi di Bukit tembaga menunjukkan bahwa alterasi illit±klorit lebih dekat zona bijih endapan sinabar dengan pelamparan secara lateral maupun vertikal.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Pemerintah Daerah Provinsi Maluku dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membantu penelitian ini. Tak lupa kami ucapkan terimakasih kepada Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada (UGM) Yogyakarta dalam penggunaan fasilitas untuk pengamatan Laboratorium. Selain itu, terimakasih atas dukungan Tim teknis Bidang Geologi pada Dinas ESDM Maluku yang telah membantu selama kegiatan di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Corbett, G.J. dan Leach, T.M., 1996. Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration and Mineralization SEG Special Publication No.6.Auckland, New Zealand.

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

Kingston Morrison, K., 1995. Important Hydrothermal Minerals and Their Significance. Geothermal and Mineral Services Division, Kingston Morrison Limited.

Lawless, J.V., White, P.J., 1997. Important Hydrothermal Minerals and Their Significance. Geothermal and Mineral Services Division, Kingston-Morrison Ltd., 7th edition.

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

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

Reyes, A.G., 1990. Petrology of philipine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *Journal of volcanology and geothermal research*, 43, 279-330.

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

Thompson, A.J.B, dan Thompson, J.F.H. 1996. Atlas of Alteration A Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Department Of Earth Sciences, 118p.

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

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

White, T.L., 1996. Cryogenic Alteration of Clay and Silt Microstructure, Implication for Geotechnical Properties. Ottawa: Carleton University.

Diterima	: 12 Juli 2022
Direvisi	: 9 November 2022
Disetujui	: 30 November 2022

DISTRIBUSI UNSUR UTAMA DAN UNSUR TANAH JARANG PADA PELAPUKAN BATUAN GRANITOID DI DAERAH PARMONANGAN, KABUPATEN TAPANULI UTARA

DISTRIBUTION OF MAJOR ELEMENTS AND RARE EARTH ELEMENTS IN THE WEATHERED GRANITOID ROCKS IN THE PARMONANGAN AREA, NORTH TAPANULI REGENCY

Ana Nurul Hidayati[1], Nurcahyo Indro Basuki[1], Sulaeman[2], Bayu Sayekti[2]
[1]Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung
[2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
ana705389@gmail.com

ABSTRAK

Hasil penyelidikan oleh PSDMBP pada tahun 2011 menunjukkan kandungan REE pada pelapukan granitoid di Parmonangan terdapat beberapa unsur dengan anomali yang cukup signifikan seperti Ce (600 s.d. 1400 ppm), La (400 s.d. 1000 ppm), dan Pr (600 s.d. 1400 ppm). Oleh karena itu, penyelidikan lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui persebaran REE ke arah bagian barat dari daerah penyelidikan sebelumnya. Penyelidikan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik granitoid, pola pelapukan, dan profil kandungan REE di daerah penyelidikan.

Pelapukan granitoid di daerah Parmonangan berasal dari granit biotit dan granit biotit hornblende. Karakteristik geokimia hasil pelapukan menunjukkan bahwa Na_2O, CaO, K_2O, SiO_2, P_2O_5, dan MnO mengalami pelarutan dan bersifat *mobile* saat berlangsungnya pelapukan sehingga menunjukkan penurunan kadar pada *soil* dibandingkan batuan dasar. Sedangkan Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, dan LOI menunjukkan kenaikan pada hasil pelapukannya akibat mengalami pengayaan residual.

Kandungan pada pelapukan granitoid daerah Parmonangan menunjukkan pengayaan relatif ΣLREE terhadap ΣHREE. Kandungan ΣLREE dipengaruhi oleh persebaran unsur La dan Ce yang terkandung dalam mineral monasit. Kandungan ΣHREE dikontrol oleh persebaran unsur Y. Berdasarkan korelasi Spearman mineral titanit dan apatit juga berpengaruh pada kelimpahan ΣLREE. Sedangkan mineral pembawa ΣHREE adalah zirkon. Interval sampel berada pada zona pencucian REE sehingga konsentrasi ΣREE yang didapat pada *soil* lebih rendah dibanding batuan dasar.

Kata Kunci: pelapukan granitoid, Parmonangan, unsur tanah jarang, Kompleks Sibolga

ABSTRACT

The results of an investigation by PSDMBP in 2011 showed that the REE content in weathered granitoid at Parmonangan contained several elements with significant anomalies such as Ce (600 to 1400 ppm), La (400 to 1000 ppm), and Pr (600 to 1400 ppm). Therefore, further investigation needs to be carried out to determine the distribution of REE to the west of the previous investigation area. This study aims to determine the characteristics of the granitoid, weathering pattern, and profile of the REE content in the investigation area.

The weathering of granitoid in the Parmonangan area comes from biotite granite and hornblende biotite granite. The geochemical characteristics of weathering indicate that Na_2O, CaO, K_2O, SiO_2, P_2O_5, and MnO dissolve and are mobile during weathering, indicating a

decrease in soil content compared to bedrock. Meanwhile, Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, and LOI showed an increase in weathering results due to residual enrichment.

The content of the weathered granitoid in the Parmonangan area shows the relative enrichment of LREE to HREE. The content of LREE is influenced by the distribution of La and Ce elements contained in monazite. The content of HREE is controlled by the distribution of element Y. Based on the Spearman correlation, titanite and apatite also affect the abundance of LREE. While the mineral-bearing HREE is zircon. The sample interval is in the REE leaching zone so that the concentration of REE obtained in the soil is lower than in the bedrock.

***Keywords**: granitoid weathering, Parmonangan, rare earth elements, Sibolga Complex*

PENDAHULUAN

Unsur tanah jarang (UTJ) terdiri dari 17 unsur yang terdiri dari 15 unsur yang tergolong ke dalam kelompok lanthanida (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb dan Lu), serta 2 unsur lainnya yaitu scandium (Sc) dan yttrium (Y). UTJ umumnya terbagi menjadi unsur dengan berat atom lebih kecil yaitu La – Eu yang disebut UTJ ringan (LREE) dan unsur dengan berat atom lebih besar atau disebut UTJ berat (HREE) yang terdiri dari Gd – Lu dan Y (*Industrial Rare Metals*, 2008 dalam Sanematsu dkk., 2009). Unsur – unsur ini berikatan dengan mineral yang cukup jarang dijumpai dengan kadar yang melimpah di batuan pada umumnya. Penyelidikan UTJ pada *soil* telah banyak dilakukan (Bhao dan Zhao, 2008; Sanematsu dkk., 2009; Tim Eksplorasi Umum, 2011; Setiawan, 2017).

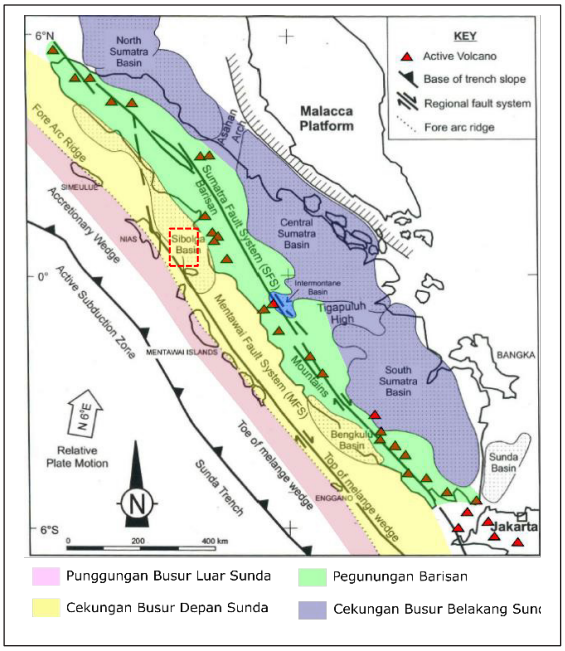
Batuan granitoid menjadi salah satu sumber batuan yang kaya akan UTJ. Kompleks Granitoid Sibolga merupakan salah satu granitoid di Pulau Sumatra berumur Perm yang diperkirakan muncul sebagai beberapa kali periode intrusi. Granitoid Sibolga memiliki karakteristik yang mirip dengan *Eastern Province Granite* dari Semenanjung Malaysia, Granit Sibolga tersingkap di pantai barat Sumatera yang jaraknya 300 km dari *Eastern Province Granite* Semenanjung Malaysia (Cobbing, 2005). Kompleks Granitoid Sibolga tersebar luas dari daerah Sibolga hingga Tapanuli Utara.

Penyelidikan sebelumnya telah mengulas keberadaan UTJ pada pelapukan batuan granitoid di daerah Parmonangan. Dari beberapa sampel yang dianalisis, terdapat beberapa unsur yang memiliki konsentrasi tergolong signifikan yaitu Ce (600 s.d. 1400 ppm), La (400 s.d. 1000 ppm), dan Pr (600 s.d. 1400 ppm) (Tim Eksplorasi Umum, 2011).. Daerah anomali UTJ tersebut berada pada bagian barat. Kandungan UTJ yang tinggi ini menarik untuk diteliti lebih lanjut juga terhadap kemenerusan daerah anomali UTJ. Menindaklanjuti kegiatan eksplorasi tersebut, pada tahun 2021 dilakukan penyelidikan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik granitoid, pola paelapukan dan profil kandungan REE di daerah bagian barat daerah penyelidikan sebelumnya.

GEOLOGI

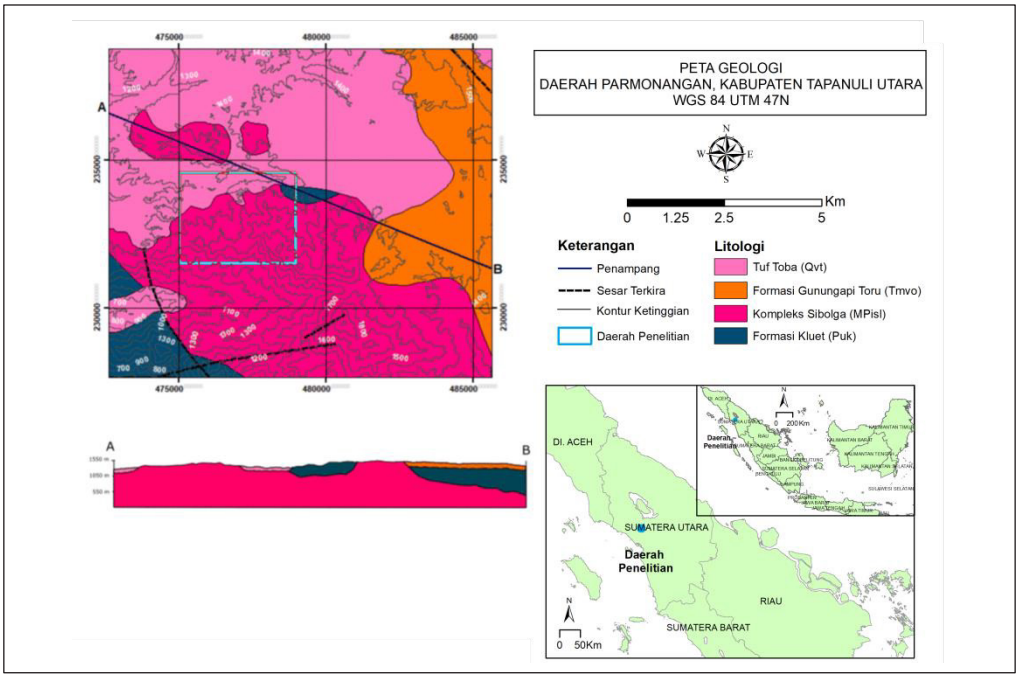
Pulau Sumatra diklasifikasikan menjadi lima bagian berdasarkan tatanan tektonik dan strukturalnya (Darman dan Sidi, 2000), yaitu punggungan busur luar Sunda (*Sunda outer-arc ridge*), cekungan busur depan Sunda (*Sunda fore-arc basin*), cekungan busur belakang Sumatra (*Sumatra back-arc basin*), Pegunungan Barisan (*Barisan Mountain Range*), dan cekungan antar pegunungan Sumatra (*Sumatra intra-arc atau intermontane basin*). Daerah penyelidikan terletak pada bagian Pegunungan Barisan (**Gambar 1**). Daerah penyelidikan terletak di sebelah tenggara berdasarkan Peta Geologi Lembar Sidikalang dan sebagian Sinabang, Provinsi Sumatra Utara (Aldiss dkk., 1983). Di sekitar wilayah studi terdapat empat formasi yang menyusun litologi area tersebut, yaitu Formasi Kluet (Puk), Kompleks Sibolga (MPisl), Formasi

Gunungapi Toru, dan Tuf Toba (**Gambar 2**).



Gambar 1. Pembagian Pulau Sumatra berdasarkan tektonik dan strukturalnya (Darman dan Sidi, 2000)

Formasi Kluet dan Kompleks Sibolga merupakan batuan berumur Paleozoik sebagai batuan dasar di daerah penyelidikan. Formasi Kluet merupakan bagian dari Kelompok Tapanuli terdiri dari *wacke* kuarsa, batulanau, batuserpih, arenit konglomeratik yang diperkirakan berumur Karbon – Perm Awal (Barber dkk., 2005). Formasi Kluet diterobos oleh intrusi Kompleks Sibolga yang umumnya mengalami metamorfisme derajat rendah di bawah fasies amfibolit menjadi kuarsit, sekis dan gneiss pelitik, milonit dan kataklastik, serta *hornfels* (Aldiss dkk., 1983). Kompleks Sibolga terdiri dari granodiorit, granit, dan diorit yang diperkirakan muncul pada Perm Awal akibat subduksi *Paleo-Tethys* terhadap Blok Sumatra Barat. Formasi Gunungapi Toru terendapkan secara tidak selaras di atas Kompleks Sibolga yang berhubungan dengan adanya intrusi dangkal pada Miosen. Formasi ini tersebar di perbatasan antara Tapanuli Utara dan Tapanuli Selatan yang merupakan batuan vulkanik berupa andesit, aglomerat, dan breksi (Sulistyawan dan Harahap, 2013). Sedangkan Tuf Toba adalah produk vulkanisme Gunung Api Toba berumur Kuarter Awal (Aspend dkk., 1982 dalam Sulistyawan dan Harahap, 2013). Satuan Tuf Toba terdiri dari ignimbrit riodasit yang sebagian terelaskan.



Gambar 2. Peta geologi dan penampang daerah Parmonangan (dimodifikasi dari Aldiss dkk., 1983)

MATERIAL DAN METODOLOGI

Penyelidikan ini menggunakan material berupa sampel batuan dan *soil* pelapukan yang diambil oleh Tim Eksplorasi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi tahun 2021 (PSMBP). Sampel *soil* pelapukan diambil dengan melakukan pengeboran dangkal menggunakan bor tangan dari kedalaman 1 meter hingga 3 meter dan metode *channeling/test pit* pada lokasi bukaan *soil* (**Gambar 3**). Batuan berjumlah tujuh sampel dilakukan analisis petrografi sayatan tipis. Selanjutnya, sebanyak 15 sampel batuan dan 164 sampel *soil* pelapukan dilakukan analisis geokimia menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) di Laboratorium PSDMBP yang meliputi kandungan unsur oksida (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5, dan MnO), sedangkan kandungan unsur jejak dan REE dianalisis dengan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry*) pada dua sampel batuan dan 20 sampel *soil* pelapukan di Laboratorium Intertek.



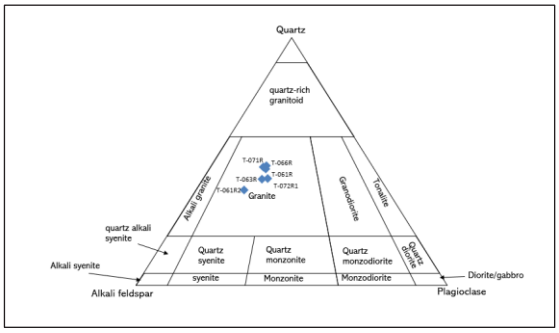
Gambar 3. Profil pelapukan granit di daerah Parmonangan (T-062) (Sulaeman dkk., 2021)

Data XRF diolah menghasilkan indeks pelapukan, pola pelapukan, dan mobilitas unsur. Sedangkan analisis dari data ICP-MS akan mendapatkan karakteristik UTJ berdasarkan profil.

HASIL

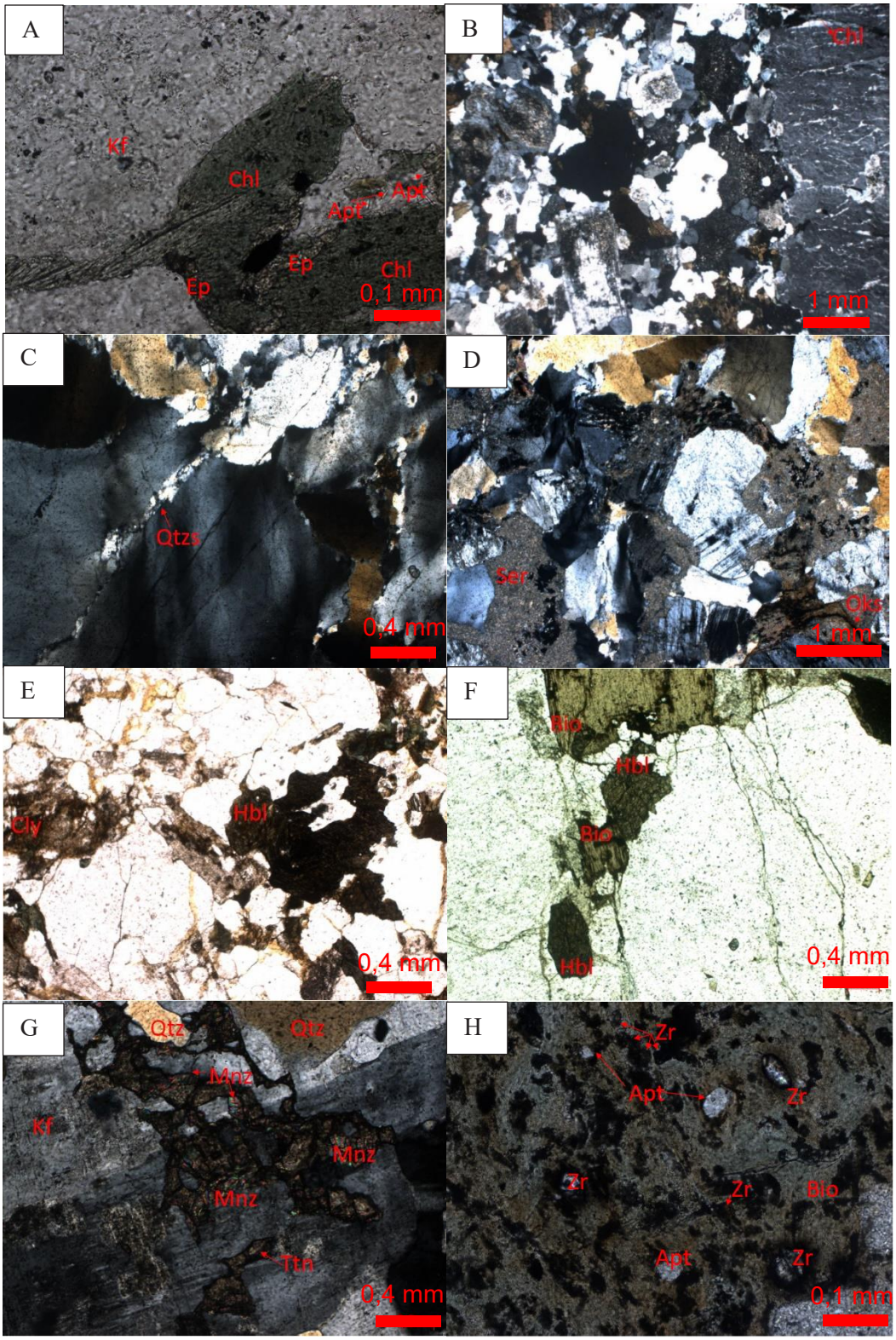
Petrologi

Tujuh sampel batuan di daerah Parmonangan berupa enam sayatan dari batuan granitoid dan satu sayatan dari batuan tuf.



Gambar 4. Plot sampel pada diagram QAP (Streckeisen, 1976 dalam Gill, 2010)

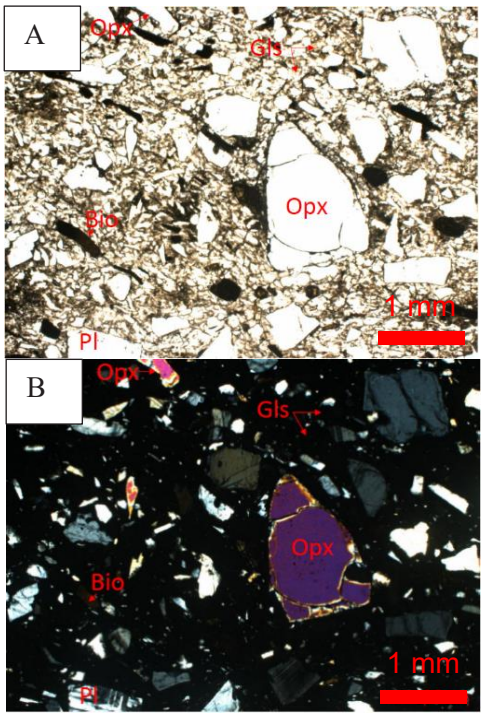
Hasil deskripsi mikroskopis dari 6 sampel granitoid berdasarkan diagram QAP menunjukkan enam sampel batuan diklasifikasikan sebagai granit (**Gambar 4**). Berdasarkan Williams dkk. (1982), Granitoid Parmonangan terbagi menjadi dua macam terkait keberadaan mineral biotit dan hornblende dengan persentase ≥ 5% yaitu granit biotit (sampel T-071R, T-061R, dan T-063R) dan granit biotit hornblende (T-061R2, T-066R, dan T-072R1). Granit biotit memperlihatkan tekstur holokristalin, hubungan antarkristal hipidiomorfik – alotriomorfik granular, terdiri dari mineral primer yaitu kuarsa (31 s.d. 36%), alkali feldspar (23 s.d. 32%), plagioklas (12 s.d. 16%), dan biotit (5 s.d. 18%) berukuran 0,2 mm s.d. 4,8 mm. Mineral aksesori pada granit biotit berupa titanit, apatit, zirkon, monasit, dan opak (**Gambar 5g,h**) Sebagian besar mineral aksesori ditemukan dalam bentuk inklusi pada mineral biotit dan alkali feldspar.



Gambar 5. (a) Klorit (Chl) dan epidot (Ep) yang hadir bersama mineral aksesori berupa apatit (Apt), (b) Urat klorit memotong alkali feldspar pada sampel T-066R, (c) Kuarsa sekuder (Qtzs) mengisi rekahan di sampel T-061R, (d) Oksida besi (Oks) hadir sebagai urat yang memotong feldspar dan serisit (Ser), (e) Hornblende (Hbl) dan mineral lempung (Cly) pada sampel T-072R1, (f) Hornblende dan biotit (Bio) pada sampel T-061R2, (g) Monasit (Mnz) sebagai inklusi pada alkali feldspar (Kf), (h) Zirkon (Zr) dan apatit hadir sebagai inklusi pada biotit

Adapun mineral ubahan yang terlihat yaitu adalah serisit, klorit, oksida besi, dan kuarsa sekunder. Sebagain besar granit biotit hornblende memperlihatkan tekstur holokristalin, hubungan antarkristal hipidiomorfik – alotriomorfik granular, terdiri dari mineral primer yaitu kuarsa (25%), alkali feldspar (21 s.d. 30%), biotit (10 s.d. 18%), plagioklas (10 s.d. 12%), dan hornblende (5 s.d. 8%) berukuran 0,2 s.d. 4,5 mm. Pada sampel T-066R, granit biotit hornblende memperlihatkan tekstur holokristalin porfiritik, dengan fenokris 25% terdiri dari alkali feldspar, plagioklas, biotit, kuarsa, dan hornblende, subhedral-anhedral, berukuran 0,5 s.d. 2 mm setempat dapat mencapai 3,5 mm, tertanam dalam massa dasar 75% terdiri dari biotit, kuarsa, dan mineral opak.

Secara mikroskopis, sampel batuan tuf diklasifikasikan menjadi tuf gelas (Pettijohn, 1975). Tuf gelas terpilah buruk, memiliki kemas terbuka, terdiri dari fragmen 32% berukuran 0,1 s.d. 1,5 mm, menyudut berupa mineral plagioklas, biotit, ortopiroksen, kuarsa, dan fragmen batuan (**Gambar 6**). Terdapat matriks 57% berupa gelas vulkanik, kuarsa, dan plagioklas.



Gambar 6. Hasil sayatan tuf gelas (a) nikol sejajar dan (b) nikol bersilang

Hasil Pelapukan

Keberadaan lapukan granitoid terletak di bawah lapisan humus berwarna coklat kehitaman yang dicirikan dengan lapisan berwarna kuning terang-abu-abu hingga kuning kecoklatan-merah keabuan dengan ketebalan lapukan yang diambil berkisar 0,55 hingga 10 m (**Gambar 3**). Pada lapukan granitoid terlihat beberapa mineral yaitu kuarsa ± muskovit ± biotit ± feldspar ± hornblende (Sulaeman dkk., 2021). Dari 164 data lapukan, terdapat 144 lapukan granitoid, 19 lapukan tuf, dan satu data timbunan. Lapukan granitoid berwarna abu-abu, kuning coklatan, hingga merah dengan keberadaan mineral biotit ± feldspar ± muskovit, sedangkan lapukan tuf berwarna kuning (Sulaeman, komunikasi personal 2021). Sampel yang teridentifikasi sebagai timbunan pada T-064A memiliki hasil geokimia unsur mayor yang jauh berbeda dibanding sampel lain pada profil tersebut.

Komposisi Geokimia

Batuan granitoid Parmonangan memiliki kandungan unsur mayor SiO_2 (58,67 wt% s.d. 70,03 wt.%), Al_2O_3 (15,49 wt% s.d. 23,95 wt.%), Fe_2O_3 (2,31 wt% s.d. 3,66 wt.%), MgO (0,37 wt% s.d. 1,14 wt.%), CaO (0,06 wt% s.d. 2,21 wt.%), Na_2O (0,06 wt% s.d. 2,69 wt.%), K_2O (3,46 wt% s.d. 6,18 wt.%), TiO_2 (0,28 wt% s.d. 0,91 wt.%), P_2O_5 (0,40 wt% s.d. 0,68 wt.%), MnO (0,04 wt% s.d. 0,24 wt.%), dan LOI (1,00 wt% s.d. 5,66 wt.%).

Nilai LOI teridentifikasi pada enam sampel batuan bernilai >2,5% dan sembilan sampel lainnya yang memiliki LOI< 2,5%. Nilai LOI menunjukkan tingkat kesegaran batuan dengan nilai LOI < 2,5% (Indarto dkk., 2007). Pada sampel T-074R dan T-077R, nilai LOI >2,5% menunjukkan batuan ini merupakan tuf yang dikonfirmasi dengan data petrografi sayatan tipis dan deskripsi batuan secara megaskopis berdasarkan Sulaeman dkk (2021). Sampel T-069R dan T-072R2 memiliki LOI >2,5%, tetapi sampel ini tidak dilakukan petrografi sayatan tipis sehingga belum bisa dikonfirmasi. Sampel T-061R2 memiliki LOI >2,5% yang ditunjukkan oleh

keberadaan mineral mineral lempung sebagai mineral ubahan.

Zona lapukan granitoid mengandung unsur mayor (**Gambar 8**) SiO_2 (34,54 wt.% s.d. 69,43 wt.%), Al_2O_3 (20,88 wt.% s.d. 36,79 wt.%), Fe_2O_3 (1,25 wt.% s.d. 6,60 wt.%), MgO (0,01 wt.% s.d. 0,83 wt.%), CaO (0,02 wt.% s.d. 1,41 wt.%), Na_2O (0,00 wt.% s.d. 1,41 wt.%), K_2O (0,29 wt.% s.d. 3,91 wt.%), TiO_2 (0,23 wt.% s.d. 1,86 wt.%), P_2O_5 (0,04 wt.% s.d. 0,45 wt.%), MnO (0,01 wt.% s.d. 0,58 wt.%), dan LOI (5,77 wt.% s.d. 32,57 wt.%).

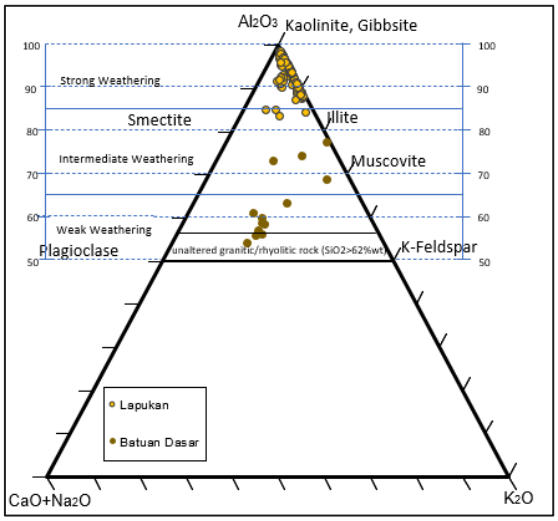
PEMBAHASAN

Pelapukan Granitoid

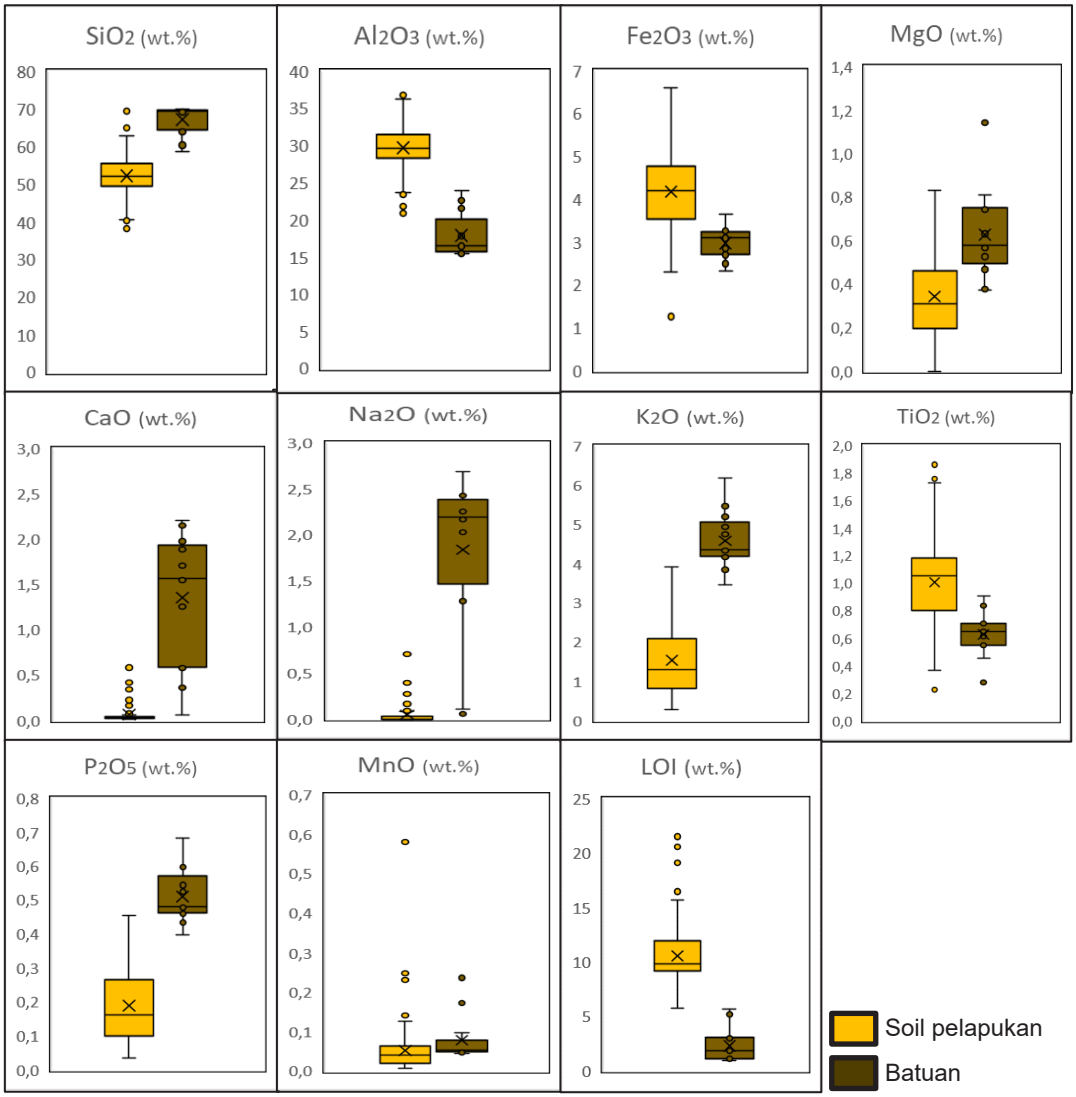
Unsur Ca, Na, Mg, dan K merupakan unsur alkali dan alkali tanah yang mudah larut dan *mobile* saat terjadinya pelapukan (Middelburg dkk., 1988) sehingga unsur CaO, Na_2O, MgO, dan K_2O cenderung menunjukkan penurunan pada lapukan dibanding batuan dasar yang terdekat dari lokasi bor untuk *soil* (**Gambar 8**). Unsur Ca sebagai penyusun mineral apatit bersifat *mobile* sehingga mineral apatit tidak stabil saat pelapukan berlangsung, maka apatit cenderung terdekomposisi dan unsur P_2O_5 menurun pada lapukannya (Middelburg dkk., 1988). Unsur Si juga *mobile* pada rentang pH tertentu sehingga dijumpai deplesi pada lapukan. Kelarutan dan mobilitas dari unsur Mn bergantung pada keberadaannya dengan unsur yang lain. Unsur ini dijumpai terlarut sebagian pada kondisi asam, tidak larut saat bersama unsur yang memiliki kelarutan lebih tinggi sehingga pada lapukan menunjukkan penurunan tetapi ada juga yang mengalami pengayaan (Ahmad, 2006). Dalam batuan, unsur Mn menjadi penyusun mineral epidot dan klorit.

Saat berlangsungnya pelapukan, terjadi penghancuran batuan menjadi *soil* oleh faktor fisik, kimia, atau biologi sehingga mineral primer pada batuan mengalami ubahan menjadi mineral sekunder (contoh: mineral lempung, mineral oksida, dll) yang memiliki gugus OH pada ikatannya dan jumlah volatil yang meningkat. Oleh karena itu, berat yang hilang saat dibakar (LOI) pada lapukan meningkat. Unsur Al, Fe, dan Ti cenderung *immobile* dan menjadi unsur yang tertinggal (unsur residual) saat pelapukan sehingga Al_2O_3, Fe_2O_3, dan TiO_2 cenderung meningkat pada lapukannya. Selain itu, unsur Fe juga dipengaruhi oleh potensial redoks sehingga di bawah kondisi reduksi, terdapat Fe_2O_3 yang mengalami penurunan. Keseluruhan profil pelapukan granitoid digunakan untuk membandingkan kandungan unsur mayor terhadap batuan dasar yang terdekat dari pengambilan *soil* di setiap lokasi bor sebagai contoh pada bor T-008 dan T-075 (bukaan) (**Gambar 9**).

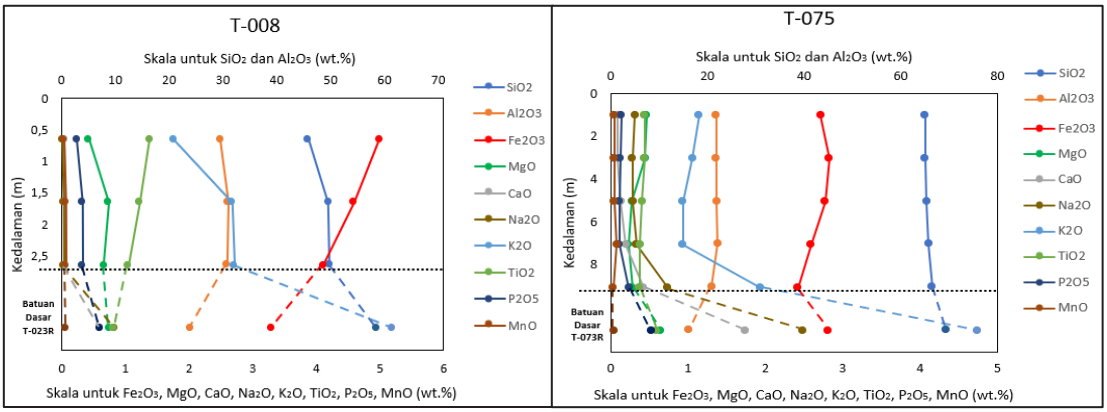
Indeks pelapukan granitoid dapat ditentukan berdasarkan perhitungan CIA oleh Nesbitt dan Young (1982) yang menunjukkan lapukan granitoid di Parmonangan telah mengalami intensitas pelapukan sedang hingga kuat yaitu 83,61 – 98,81. Sedangkan nilai CIA pada batuan granitoid adalah 54,46 – 77,78; artinya batuan tidak terlapukkan dan beberapa mengalami pelapukan lemah hingga sedang. Berdasarkan diagram terner oleh Nesbitt dan Markovics (1997), *trend* pelapukan menunjukkan terjadinya pelapukan yang intensif ditandai dengan terubahnya feldspar menjadi kaolinit dan/atau gibsit (**Gambar 7**).



Gambar 7. Perkembangan profil pelapukan di Parmonangan berdasarkan diagram terner A-CN-K (Nesbitt dan Markovics, 1997)



Gambar 8. Boxplot unsur mayor (SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5, MnO) dan LOI pada lapukan dan batuan granitoid



Gambar 9. Profil pelapukan granitoid pada bor T-008 dan T-075

Karakteristik UTJ (REE)

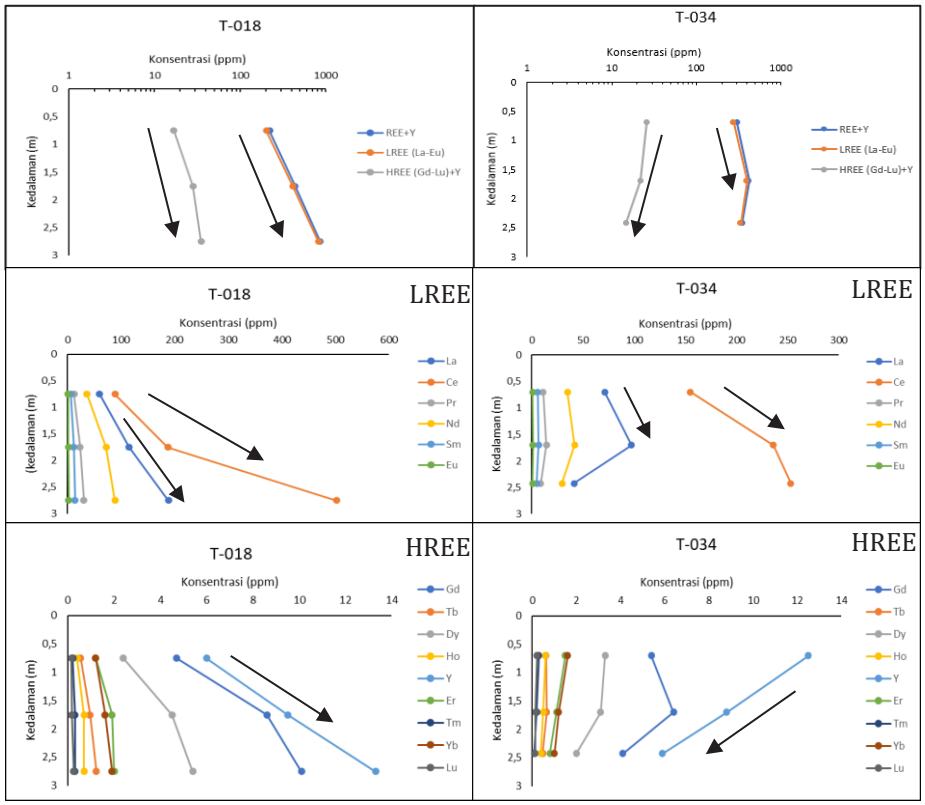
UTJ yang dianalisis pada lapukan granitoid berjumlah 19 sampel memiliki konsentrasi La (9 s.d. 188 ppm), Ce (35,6 s.d. 502 ppm), Pr (2,44 s.d. 30,5 ppm), Nd (8,5 s.d. 88,6 ppm), Sm (1,8 s.d. 14 ppm), Eu (0,2 s.d. 1,5 ppm), Gd (2,1 s.d. 10,1 ppm), Tb (0,19 s.d. 1,22 ppm), Dy (1,2 s.d. 5,4 ppm), Ho (0,1 s.d. 0,7 ppm), Y (2,5 s.d. 19,7 ppm), Er (0,4 s.d. 2,4 ppm), Tm (0,1 s.d. 0,4 ppm), Yb (0,4 s.d. 3,8 ppm), Lu (0,05 s.d. 0,33 ppm), $LREE_{(La-Eu)}$ (69,37 s.d. 824,6 ppm), $HREE_{(Gd-Lu)+Y}$ (7,04 s.d. 35,17 ppm), dan ΣREE+Y (99,58 – 859,77 ppm).

Proses pelapukan menyebabkan terjadinya mobilisasi dan fraksinasi sehingga REE dapat mengalami pengayaan atau deplesi. Hal ini dapat dipengaruhi oleh kondisi Eh-pH, kondisi kimia lingkungan pelapukan misalnya kandungan air, material organik, keberadaam zat kompleks dan pengoksidasi misalnya NO_3^{2-}, SO_4^{2-}, O_2, CO_2 (Scott dan Pain, 2009). Selain itu, karakteristik kimia seperti jari-jari ion dan muatan ion juga mengontrol terjadinya dispersi pada REE. Karakteristik tersebut dapat menyebabkan REE yang *leaching* saat pelapukan teradsorbsi oleh mineral lempung (Bao dan Zhao, 2008).

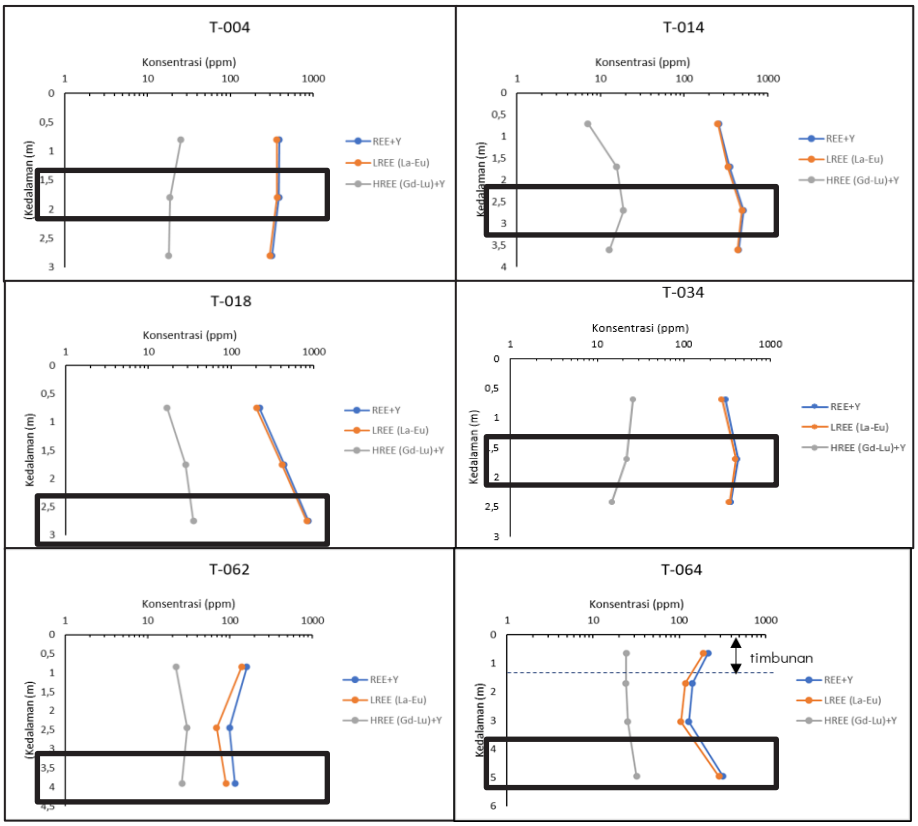
Keberadaan REE pada profil pelapukan hadir bersama mineral pembawa REE yang resisten selama proses pelapukan berlangsung. Contoh mineral pembawa REE seperti monasit, zirkon, alanit, dan apatit.

Konsentrasi ΣREE (penjumlahan total konsentrasi REE dari unsur La hingga Lu dan Y) pada hasil pelapukan lebih rendah yaitu 99,58 ppm hingga 859,77 ppm dibanding batuan granitoid yaitu 403,00 ppm hingga 555,98 ppm. Namun, pada sampel T-018 lapukannya memiliki konsentrasi ΣREE yang lebih besar dibanding batuan granitoid. REE yang *mobile* saat proses pencucian berlangsung atau mineral pembawa REE seperti apatit yang kurang resisten terhadap pelapukan menjadi indikasi menurunnya REE pada sebagian besar sampel.

Berdasarkan grafik *downhole* dari LREE dan HREE, pola HREE pada keseluruhan sampel cenderung memiliki pola yang sama dengan pola persebaran unsur yttrium (Y). Sedangkan pola LREE pada keseluruhan sampel cenderung memiliki pola yang sama dengan pola persebaran unsur lanthanum (La) dan cerium (Ce) (**Gambar 10**). Hal ini didukung oleh hasil korelasi Spearman diantaranya yaitu korelasi positif sedang LREE dengan Th dan U menunjukkan keberadaan mineral pembawa REE yaitu monasit yang melepaskan unsur Th dan U saat terjadinya pelapukan, korelasi positif sedang HREE dengan Zr berkaitan dengan adanya mineral zirkon sebagai mineral pembawa HREE, dan korelasi positif LREE dengan TiO_2 dan P_2O_5 berkaitan dengan keberadaan mineral titanit dan apatit (Tabel 1). Secara umum, pada kedalaman 2 meter hingga 3 meter dan 4 meter hingga 5 meter terdapat pengayaan relatif REE terhadap *soil* di atasnya (**Gambar 11**).



Gambar 10. Grafik *downhole* LREE, HREE, dan unsur – unsurnya dari sampel T-018 (kiri) dan T-034 (kanan) yang menunjukkan persebaran unsur secara vertikal pada tiap interval



Gambar 11. Grafik *downhole* LREE dan HREE pada keseluruhan sampel yang menunjukkan mobilitas dari LREE dan HREE

Tabel 1. Korelasi Spearman dari ΣREE+Y, ΣLREE, ΣHREE, Th, U, Zr, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, TiO_2, P_2O_5, MnO, dan LOI

	ΣREE+Y	ΣLREE	ΣHREE	Th	U	Zr	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	MnO	LOI
ΣREE+Y	1,000																
ΣLREE	0,996*	1,000															
ΣHREE	-0,100	-0,132	1,000														
Th	0,625*	0,634*	-0,051	1,000													
U	0,672*	0,686*	-0,079	0,859*	1,000												
Zr	-0,014	-0,019	0,491*	0,168	0,265	1,000											
SiO2	-0,537*	-0,542*	0,084	-0,806*	-0,846*	-0,186	1,000										
Al2O3	0,616*	0,614*	-0,096	0,759*	0,825*	0,168	-0,928*	1,000									
Fe2O3	0,577*	0,593*	-0,304	0,613*	0,704*	-0,147	-0,716*	0,658*	1,000								
MgO	0,523*	0,553*	-0,178	0,197	0,239	-0,242	-0,130	0,069	0,150	1,000							
CaO	-0,377	-0,377	0,319	-0,286	-0,253	0,596*	0,289	-0,313	-0,529*	-0,233	1,000						
Na2O	-0,644*	-0,664*	0,490*	-0,625*	-0,707*	-0,045	0,686*	-0,756*	-0,578*	-0,233	0,226	1,000					
K2O	0,546*	0,574*	-0,093	0,383	0,435	0,175	-0,279	0,186	0,174	0,845*	0,004	-0,353	1,000				
TiO2	0,617*	0,634*	-0,152	0,778*	0,823*	-0,105	-0,827*	0,833*	0,871*	0,146	-0,498*	-0,641*	0,127	1,000			
P2O5	0,558*	0,586*	-0,110	0,349	0,405	0,154	-0,262	0,177	0,174	0,855*	-0,030	-0,337	0,996*	0,115	1,000		
MnO	0,448	0,453	-0,093	0,181	0,203	0,027	-0,036	-0,006	0,133	0,659*	-0,261	-0,081	0,759*	-0,048	0,778*	1,000	
LOI	0,319	0,307	0,053	0,669*	0,695*	0,288	-0,882*	0,789*	0,588*	-0,216	-0,099	-0,476*	-0,063	0,690*	-0,089	-0,255	1,000

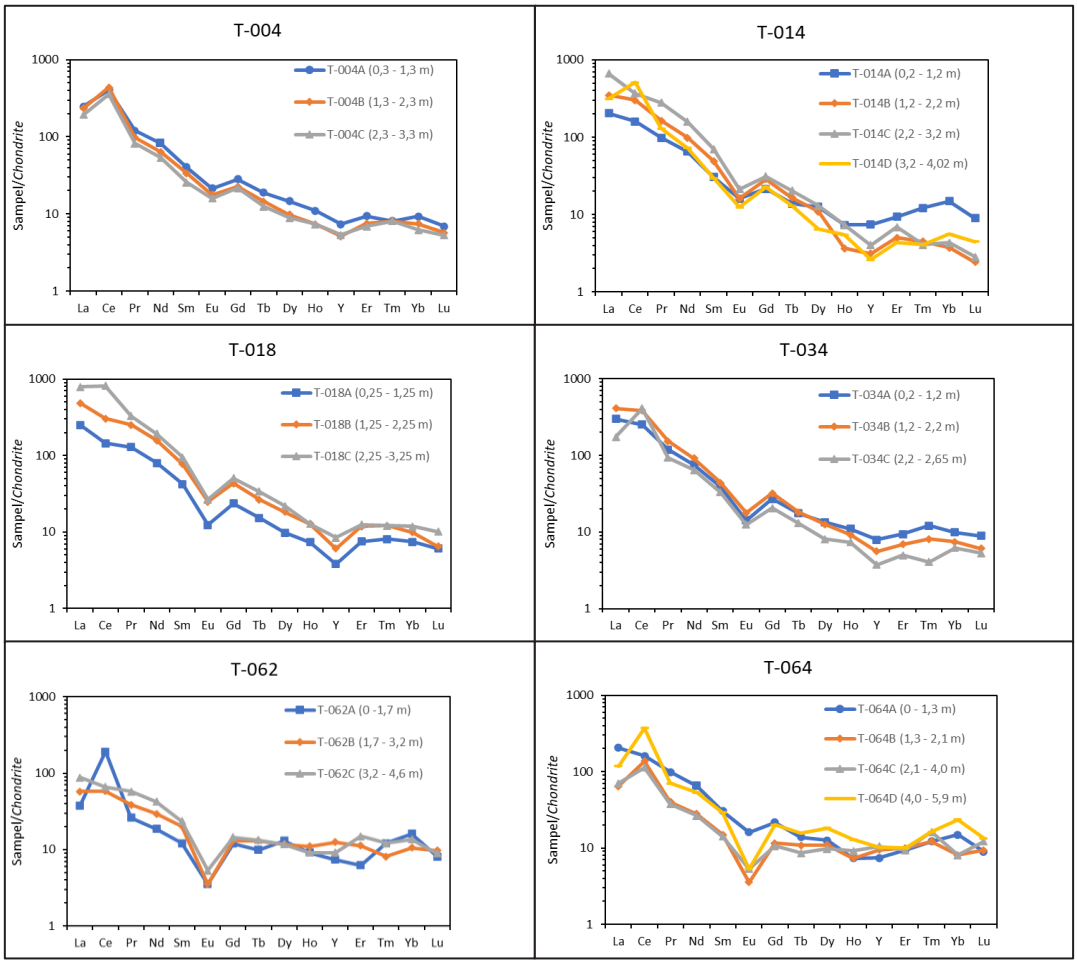
*, Korelasi signifikan

0,9 ≤ r < 1,0 atau -0,9 ≤ r < -1,0	Korelasi sangat kuat
0,7 ≤ r < 0,9 atau -0,7 ≤ r < -0,9	Korelasi kuat
0,4 ≤ r < 0,7 atau -0,4 ≤ r < -0,7	Korelasi sedang
0,1 ≤ r < 0,4 atau -0,1 ≤ r < -0,4	Korelasi lemah
r < 0,1 atau r < -0,1	Tidak ada korelasi

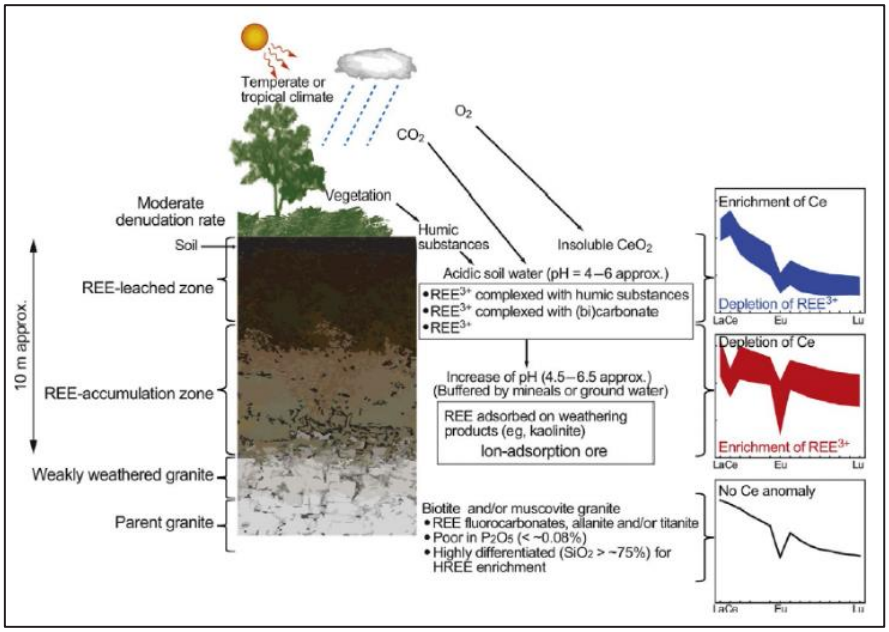
Pola REE yang tergambar pada diagram laba-laba (**Gambar 12**) membandingkan antara lapukan dan batuan granitoid dinormalisasi terhadap *chondrite* (McDonough dan Sun, 1995). ΣLREE (penjumlahan total konsentrasi LREE dari unsur La hingga Eu) terlihat mengalami pengayaan dibanding ΣHREE (penjumlahan total konsentrasi HREE dari unsur Gd hingga Lu dan Y) dengan rasio LREE/HREE adalah 2,30 hingga 35,99. REE berada dalam bentuk trivalen (valensi tiga) kecuali Ce dan Eu. Ce^{3+} dapat teroksidasi menjadi Ce^{4+} membentuk tetravalen dan Eu^{3+} tereduksi menjadi Eu^{2+} membentuk bivalen. Pola REE pada batuan tidak memperlihatkan anomali Ce. Sedangkan pola REE pada lapukan memperlihatkan anomali positif Ce. Ce merupakan unsur yang sensitif terhadap fugasitas oksigen dan pH. Anomali positif Ce pada lapukan berkaitan dengan konsentrasi Ce yang tinggi dengan rasio Ce/Ce* yaitu 3,31 – 24,97; perhitungan Ce/Ce* adalah $Ce/(La \times Pr)^{1/2}$. Selain itu, proses oksidasi Ce dari Ce^{3+} menjadi Ce^{4+} (Sanematsu dkk., 2009) atau keberadaan mineral monasit yang resisten terhadap pelapukan kemungkinan juga menjadi indikasi adanya anomali positif Ce.

Unsur Eu menunjukkan anomali negatif pada batuan dan lapukan dengan Eu/Eu* adalah 0,072 – 0,223. Nilai Eu/Eu* dihitung dari $Eu/(Sm \times Gd)^{1/2}$. Proses fraksinasi plagioklas saat proses magmatisme berlangsung sebelum terbentuknya batuan menjadi indikasi adanya anomali negatif Eu pada batuan. Sedangkan anomali negatif Eu pada lapukan kemungkinan berasal dari batuannya (Maulana dkk., 2014). Unsur Y cenderung mengalami deplesi yang diinterpretasikan bahwa saat proses pencucian, unsur yttrium cenderung larut dan *mobile* sehingga terlepas dari batuan. (Möller, 2000). Pada diagram laba -laba di masing – masing profil, sebagian besar memperlihatkan anomali positif Ce (**Gambar 12**).

Berdasarkan model endapan *ion-adsorption* REE yang berkembang pada granit (**Gambar 13**), konsentrasi ΣREE yang lebih rendah pada hasil pelapukan dibanding batuan dasar dan anomali positif Ce pada hasil pelapukan menunjukkan bahwa hasil pelapukan berada pada zona pencucian REE (*leached zone*).



Gambar 12. Diagram laba – laba masing – masing profil pelapukan yang dinormalisasi terhadap *chondrite* menunjukkan adanya akumulasi dan pencucian REE selama proses pelapukan (McDonough dan Sun, 1995)



Gambar 13. Model endapan *ion-adsorption* REE yang berkembang pada granit (Sanematsu dan Watanabe, 2016)

KESIMPULAN

Karakteristik geokimia hasil pelapukan granitoid pada unsur mayor Al_2O_3, Fe_2O_3, dan TiO_2 cenderung bersifat *immobile* sehingga mengalami pengayaan residual yang ditunjukkan dengan peningkatan konsentrasi unsur pada *soil*. Sedangkan SiO_2, MgO, CaO, Na_2O, K_2O, P_2O_5, dan MnO cenderung bersifat larut dan *mobile* yang ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi unsur pada *soil*. Profil LREE dan HREE dikontrol oleh mineral pembawa UTJ. Kandungan ΣLREE dipengaruhi oleh persebaran unsur La dan Ce yang berkaitan dengan keberadaan mineral monasit. Kandungan ΣHREE dipengaruhi oleh unsur Y. Berdasarkan korelasi Spearman, mineral titanit dan apatit juga memengaruhi kelimpahan ΣLREE. Sedangkan mineral pembawa HREE yaitu zirkon. Adanya kelimpahan REE pada hasil pelapukan lebih rendah dibanding batuan dasarnya dan munculnya anomali negatif Ce pada hasil pelapukan menunjukkan *soil* berkembang pada zona pencucian REE.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi yang telah memberikan izin untuk menggunakan data. Bimbingan dan bantuan dari kepala bidang mineral dan jajarannya serta laboran dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi sangat berarti bagi terlaksananya penyelidikan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmad, W., 2006. *Laterites: Fundamentals of Chemistry, Mineralogy, Weathering, Processes, and Laterite Formation*, PT. INCO.

Aldiss, D.T., Whandoyo, R., Ghazali, S.A., dan Kusyono., 1983. *Peta Geologi Lembar Sidikalang dan (sebagian) Sinabang, Sumatra*, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Aspden, J.A., Kartawa, W., Aldiss, D.T., Djunuddin, A., Whandoyo R., Diatma, D., Clarke, M.C.G. and Harahap, H. 1982. *Geologic Map of the Padang Sidempuan and Sibolga Quadrangles, Sumatra: Explanatory Notes Geological Research and Development Centre*. Bandung. IndonesiaBao, Z., dan Zhao, Z., 2008. Geochemistry of mineralization with exchangeable REY in the weathering crusts of granitic rocks in South China, *Ore Geology Reviews*, **33**, 519 – 535.

Barber, A.J., Crow, M.J., dan Milsom, J.S., 2005. *Sumatera: Geology, Resources and Tectonic Evolution*, Geological Society Memoir.

Cobbing, E.J., 2005. *Chapter 5 Granites*, Geology Society of London, Memoirs, **31(1)**, 54 – 6.

Darman, H. dan Sidi, H.F. (Eds.)., 2000. *An Outline of the Geology of Indonesia*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia.

Gill, R., 2010. *Igneous Rock and Processes: a Practical Guide*, Oxford: Blackwell Publishing.

Indarto, S., Setiawan, I., Zulkarnain, I., Sudarsono., Fiqih, Fikri M., Fauzi, Ahmad. 2007. Alterasi dan Mineralisasi Hidrotermal Pada Batuan Volkanik Formasi Hulu Simpang Daerah Bengkulu dan Lampung di Kawasan Sayap Barat Pegunungan Bukit Barisan, Sumatera. Prosiding Seminar Geoteknologi LIPI, Bandung.

Maulana, A., Yonezu, K., dan Watanabe, K., 2014. Geochemistry of rare earth elements (REE) in the weathered crusts from the granitic rocks in Sulawesi Island, Indonesia, *Journal of Earth Science*, 25, 460 – 472.

McDonough, W.F., dan Sun, S., 1995. The composition of the earth, *Chemical Geology*, **120**, 223 – 253.

Middelburg, J.J., Weijden, V.D., dan Woittiez, J.R.W., 1988. Chemical process affecting the mobility of major, minor, and trace elements during weathering of granitic rocks, *Chemical Geology*, **68**, 253 – 273.

Möller, P., 2000. Rare earth elements and yttrium as geochemical indicators of the source of mineral and thermal waters, 227 – 246, dalam Stober, I., dan Bucher, K., ed., *Hydrogeology of Crystalline Rocks*, Water Science and Technology Library, vol 34, Springer, Dordrecht.

Nesbitt, H.W. and Young, G.M. 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. Nature, 299, 715-717

Nesbitt, H.W., dan Markovics, G., 1997. Weathering of granodioritic crust, long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61(8)**, 1653 – 1670.

Pettijohn, F.J. 1975. Sedimentary Rocks. New York: Harper & Row Publisher.

Sanematsu, K., Murakami, H., dan Watanabe, Y., 2009. Enrichment of rare earth elements (REE) in granitic rocks and their weathered crusts in central and Southern Laos, *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, **60**, 527 – 558.

Sanematsu, K., dan Watanabe, Y., 2016. Characteristics and genesis of ion adsorption-type Rare Earth Element Deposits, 55 – 79 *dalam* Verplanck, P.L., dan Hitzman, M.W., ed., *Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits*, Society of Economic Geologists.

Setiawan, Iwan., 2017. Geology and REE Geochemistry of Granitoids and Their Weathered Crusts at The Western Part of north Sumatra, Indonesia. Akita University.

Scott, K., dan Pain, C. (Eds.)., 2009. *Regolith science*. Csiro Publishing.

Streckeisen, A., 1976. To each plutonic rock is proper name. *Earth Science Reviews*, **12**, 1 – 22.

Sulistyawan, I.H., dan Harahap, B.H., 2013. Magmatisme, sumberdaya mineral, dan energi di Tapanuli Selatan-Sumatera Utara, *JSD.Geol*, **23(3)**.

Sulaeman, Kisman, Sayekti, B., Muliyana, T., Wicaksono, H.M.H., dan Firmansyah, F., 2021. Laporan Eksplorasi Logam Tanah Jarang di Daerah Granit Sibolga, Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatra Utara, Bandung: Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi.

Tim Eksplorasi Umum, 2011. Laporan Eksplorasi Umum Logam Tanah Jarang (REE) Timah di Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara, Bandung: Pusat Sumber Daya Geologi.

Williams, H., F.J. Turner dan C.M. Gilbert. 1982. Petrography : An Introduction the Study of Rocks in Thin Section 2nd Edition. W. H. Freeman & Company, New York, 626h.

Diterima : 27 September 2022
Direvisi : 1 November 2022
Disetujui : 30 November 2022

PEMODELAN DAN ESTIMASI POTENSI BATUBARA DI DAERAH JANGGA, KABUPATEN BATANG HARI, PROVINSI JAMBI

MODELING AND COAL POTENTIAL ESTIMATION IN JANGGA AREA, BATANG HARI REGENCY, JAMBI PROVINCE

Rino Destama Sugandhi[1], Rezky Aditiyo[1], Sigit Arso Wibisono[2], dan Rizki Satria Rachman[2]
[1]Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia
[2]Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi, Jl. Soekarno Hatta No.444
rino.destama@ui.ac.id

ABSTRAK

Batubara merupakan salah satu komoditas terbesar yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik di Indonesia. Mengingat batubara merupakan sumber energi yang tidak terbarukan, maka perlu dilakukan eksplorasi untuk mencari sumber potensi batubara baru. Eksplorasi yang dilakukan berada di daerah Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi. Kegiatan ini merupakan kegiatan eksplorasi tahap pendahuluan yang dilakukan bersama Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi. Kegiatan eksplorasi yang dilakukan terdiri dari dua kegiatan, yaitu pemetaan geologi permukaan dan pengeboran inti. Setelah itu, dilakukan pengolahan data untuk merekonstruksi bentuk model 3D lapisan batubara dan menghitung estimasi potensi batubara. Pada kegiatan pemetaan geologi permukaan didapati kondisi geologi daerah penelitian yang terdiri dari dua satuan batuan, yaitu satuan batuan batupasir dan satuan batulempung, serta didapati tiga singkapan batubara permukaan. Kegiatan pengeboran dilakukan pada empat titik koordinat yaitu MK-01, MK-02, MK-03, dan MK-04. Pemodelan lapisan dan estimasi potensi batubara dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MineScape* 5.7. Hasil data pengeboran menunjukkan bahwa terdapat 8 lapisan batubara yang dapat dimodelkan dengan data pendukung berupa data singkapan batubara. Estimasi potensi batubara pada penelitian ini mengacu pada SNI 5015:2019 yang terbagi menjadi kelompok target eksplorasi dan kelompok inventori batubara. Hasil perhitungan estimasi diketahui bahwa total target eksplorasi minimum adalah 1.158.822,74 ton dan maksimum 4.208.379,08 ton, sementara total estimasi potensi batubara pada kelompok inventori tereka sebesar 12.916.775,7 dan inventori tertunjuk sebesar 9.296.304,45 ton.

Kata kunci: Batubara, Pemodelan, Estimasi, Potensi, Jangga

ABSTRACT

Coal is one of the largest commodities used to produce electrical energy in Indonesia. As considered that coal is non-renewable energy, it is important to find new potential sources of coal. Exploration was carried out in the Jangga area, Batang Hari Regency, Jambi Province. It was an early stage exploration activity carried out by Center for Mineral, Coal dan Geothermal Resources, which consists of two activities, namely surface geological mapping and core drilling. After that, data processing was carried out to determine the 3D coal seam model and estimate the potential of coal. Two main rock units can be observed from geological mapping, namely sandstone and claystone units. Three coal outcrops were also found. Drilling activities were carried out at four locations, namely MK-01, MK-02, MK-03, and MK-04. Coal seam modeling and potential estimation were carried out using MineScape 5.7 software. From the results of the drilling data, there are 8 coal seams that can be modeled with supporting

data in the form of coal outcrop data. The estimation of coal potential in this study refers to the exploration target group and the coal inventory group. From the estimation results, it is known that the minimum total exploration target is 1,158,822.74 tons and the maximum is 4,208,379.08 tons. Meanwhile, the total estimated coal potential in the inferred inventory group is 12,916,775.7 tons and the indicated inventory is 9,296,304.45 tons.

***Keywords**: Coal, Modeling, Estimation, Potential, Jangga*

PENDAHULUAN

Batubara merupakan salah satu komoditas utama penghasil energi listrik di Indonesia. Namun, batubara sendiri merupakan sumber energi tidak terbarukan apabila ditambang secara terus-menerus (Azmi & Amir, 2014). Oleh karena itu, perlu dilakukan kegiatan eksplorasi untuk mencari sumber potensi batubara baru. Berdasarkan data dari Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), jumlah sumber daya dan cadangan batubara tahun 2021 sebesar 110,069 miliar ton dan 36,278 miliar ton (Anonim, 2021).

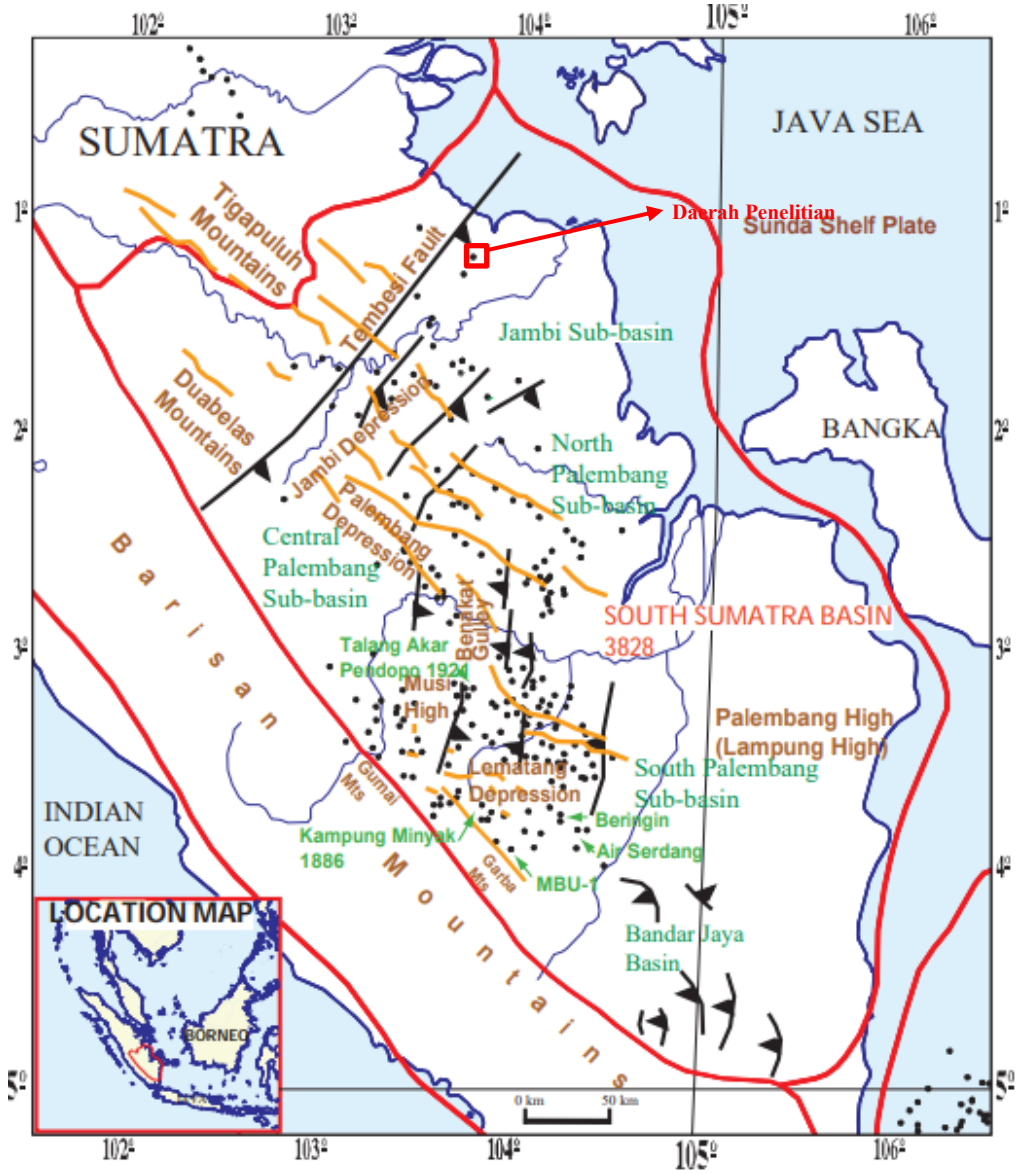
Kegiatan yang dilakukan merupakan eksplorasi pendahuluan yang dilakukan penulis bersama PSDMBP di daerah Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi. Secara geografis, lokasi penelitian berada pada koordinat 1º53'00"-1º56'00" LS dan 103º04'35"-103º07'35" BT. Kegiatan eksplorasi pendahuluan ini terdiri dari kegiatan pemetaan geologi permukaan dan pengeboran inti batubara. Kegiatan eksplorasi tersebut dilakukan untuk mendapatkan data primer yang akan digunakan dalam penelitian ini. Data primer tersebut selanjutnya diolah dengan data sekunder untuk membahas kondisi geologis, pemodelan 3D lapisan batubara, dan perhitungan estimasi potensi batubara yang terdapat di daerah penelitian.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian, dan pemodelan bentuk 3D dari lapisan batubara, serta menghitung potensi batubara yang terdapat di daerah penelitian. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam proses eksplorasi lanjut yang lebih detail.

Geologi Regional

Secara regional, daerah penelitian berada pada Cekungan Sumatra Selatan. Cekungan ini terbentuk akibat adanya tumbukan antara Lempeng Paparan Sunda dengan Lempeng Samudra Hindia sehingga membentuk zona penunjaman yang miring di sepanjang Palung Sunda, di sebelah luar pantai Barat Sumatra (Hamilton, 1979 dalam Panggabean & Santy, 2012). Cekungan ini dibatasi oleh beberapa cekungan lainnya, yaitu pada sebelah utara dibatasi oleh Cekungan Sumatra Tengah dan Pegunungan Tiga Puluh, pada sebelah timur dibatasi oleh Paparan Sunda, pada sebelah tenggara dibatasi oleh Cekungan Jawa Barat Utara dan Pegunungan Dua Belas, serta pada sebelah barat daya dibatasi oleh Cekungan Bengkulu, Bukit Barisan, dan Sesar Semangko (Bishop, 2001) (Gambar 1).

Cekungan Sumatra Selatan tersusun dari beberapa formasi dari yang tertua hingga termuda, yaitu Formasi Lahat, Formasi Talang Akar, Formasi Gumai, Formasi Baturaja, Formasi Air Benakat, Formasi Muara Enim, dan Formasi Kasai. Daerah penelitian secara regional berada di Cekungan Sumatra Selatan dengan Formasi Muara Enim merupakan salah satu formasi penyusun batuannya. Pada Formasi Muara Enim, khususnya di daerah Jambi terdapat banyak singkapan lignit berumur Neogen dengan 2 atau 3 lapisan batubara dengan ketebalan sekitar 5-7 meter dan memiliki sudut kemiringan yang rendah (Barber *et al.*, 2005).



Gambar 1. Cekungan Sumatra Selatan (Bishop, 2001)

Batubara

Batubara adalah batuan organik yang mengandung material tumbuhan yang terbatubarakan (Diessel, 1992). Batubara memiliki peringkat yang mencerminkan tingkat metamorfisme material organik dari lignit hingga antrasit yang terendapkan selama masa pengendapannya (Ward *et al.,* 2005). Peringkat batubara bergantung pada suhu maksimal yang diterima batubara dan lama waktu batubara berada pada suhu tersebut (Baihaqi *et al.*, 2017).

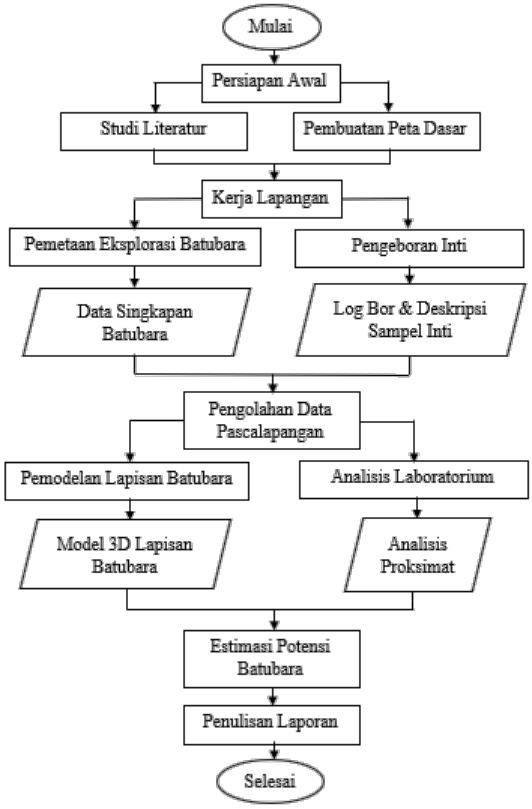
Batubara memiliki tipe endapan tertentu yang ditentukan berdasarkan parameter sedimentasi, tektonik, dan variasi kualitas. Parameter sedimentasi terdiri dari variasi ketebalan, kesinambungan, dan percabangan lapisan batubara. Parameter tektonik terdiri dari keberadaan sesar, lipatan, intrusi, dan kemiringan lapisan batubara. Parameter variasi kualitas dapat dilihat dari keberagaman kualitas ataupun peringkat dari setiap lapisan batubara. Tipe endapan batubara dikelompokkan ke dalam 3 kelompok utama, yaitu kelompok geologi sederhana, kelompok geologi moderat, dan kelompok geologi kompleks (Anonim, 2019) seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penentuan tipe endapan batubara berdasarkan parameter sedimentasi, tektonik, dan variasi kualitas (Anonim, 2019). Daerah penelitian memiliki kondisi geologi sederhana (warna biru)

Parameter	Kondisi Geologi		
	Sederhana	**Moderat**	**Kompleks**
I.A. Sedimentasi			
1. Variasi Ketebalan	Sedikit Variasi	Bervariasi	Sangat Variasi
2. Kesinambungan	Ribuan Meter	Ratusan Meter	Puluhan Meter
3. Percabangan	Hampir Tidak Ada	Beberapa	Banyak
I.B. Tektonik			
1. Sesar	Tidak ada	Jarang	Rapat
2. Lipatan	Ada, Landai	Terlipat Sedang	Terlipat Kuat
3. Intrusi	Tidak Ada	Berpengaruh	Sangat Berpengaruh
4. Kemiringan	Landai	Sedang	Terjal
II. Variasi Kualitas	Sedikit Variasi	Bervariasi	Sangat Variasi

METODOLOGI

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu persiapan, pengambilan data, pengolahan data, pembahasan, dan pembuatan laporan (Gambar 2). Secara umum, penelitian difokuskan untuk membuat model perlapisan batubara dan perhitungan estimasi potensi batubara di daerah penelitian.

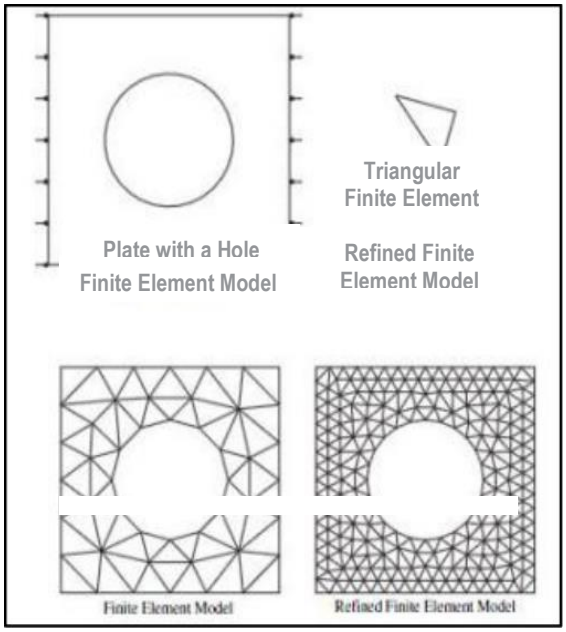


Gambar 2. Diagram alir penelitian

Pemodelan Geologi

Pemodelan geologi merupakan proses pembuatan model 3 dimensi bawah permukaan dengan menggunakan perangkat lunak komputer ataupun manual dengan memasukkan data pendukung seperti topografi, survei, litologi, kualitas, serta struktur (Anonim, 2019). Data yang dimasukkan dalam pemodelan geologi harus dapat diandalkan dan membawa informasi geologis yang akurat. Pemodelan geologi yang dilakukan harus didukung dengan pemahaman yang baik mengenai kondisi geologis daerah yang akan dimodelkan. Pemodelan lapisan batubara pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *MineScape* 5.7 dengan metode interpolator *Finite Element Method* (FEM).

FEM merupakan suatu metode interpolasi berbasis perhitungan numerik yang biasa digunakan untuk membuat sebuah model rekayasa (Sudinda, 2020). Prinsip kerja dari metode ini yaitu dengan membagi objek yang akan diinterpolasi menjadi beberapa bagian dengan jumlah tertentu. Bagian-bagian tersebut disebut dengan elemen yang berbentuk segitiga yang dihubungkan dengan titik nodal (*node*) (Gambar 3).

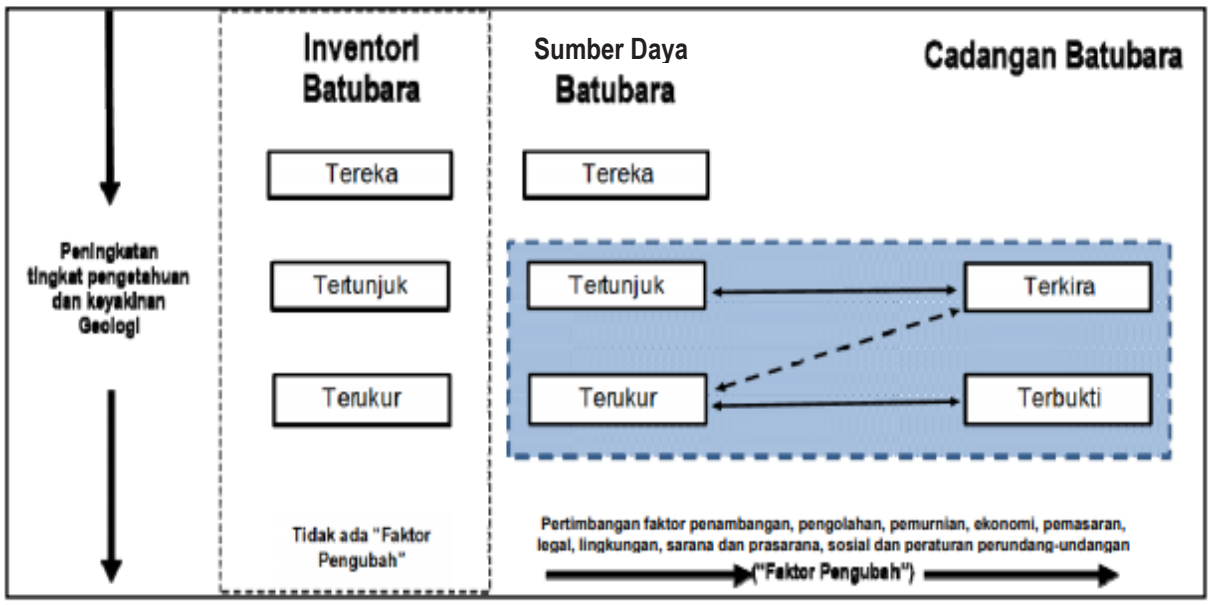


Gambar 3. Bentuk *mesh* triangulasi pada interpolasi *Finite Element Method* (Jacob & Belytschko, 2007 dalam Sudinda, 2020)

Estimasi Potensi Batubara

Berdasarkan SNI 5015:2019 mengenai pedoman pelaporan hasil eksplorasi, sumber daya, dan cadangan batubara, terdapat 3 kelompok utama dalam menentukan potensi batubara, yaitu inventori batubara, sumber daya batubara, dan cadangan batubara (Gambar 4). Inventori batubara merupakan perkiraan jumlah batubara yang tidak mempertimbangkan atau tidak lulus uji prospek ekonomi yang beralasan. Sumber daya batubara merupakan batubara yang bentuk dan kuantitasnya memiliki prospek beralasan secara ekonomis untuk ditambang. Cadangan batubara merupakan batubara yang dapat ditambang secara ekonomis dan harus sudah mempertimbangkan semua faktor pengubah. Faktor pengubah yang dipertimbangkan pada penentuan cadangan batubara terdiri dari faktor penambangan, pengolahan, pemurnian, ekonomi, pemasaran, legal, lingkungan, sarana dan prasarana, sosial, dan peraturan perundang-undangan (Anonim, 2019).

Selain ketiga kelompok utama estimasi potensi batubara di atas, terdapat juga kelompok estimasi potensi yang dinamakan dengan target eksplorasi batubara. Target eksplorasi batubara merupakan estimasi kasar mengenai kualitas dan kuantitas batubara yang didasarkan pada titik pengamatan yang belum memenuhi persyaratan untuk dikelompokkan ke dalam inventori ataupun sumber daya tereka (Anonim, 2019). Titik pengamatan merupakan bagian dari lapisan pembawa batubara yang dapat berupa lapisan batubara, batuan penutup, dan batuan pemisah (*interburden*).



Gambar 4. Hubungan inventori, sumberdaya, dan cadangan batubara (Anonim, 2019)

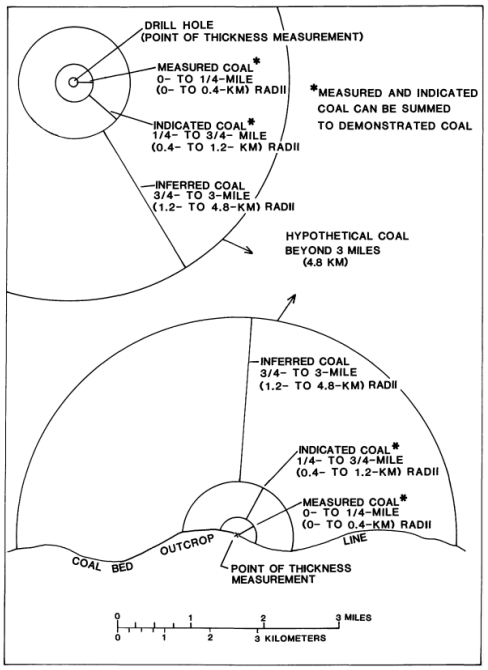
Estimasi target eksplorasi batubara harus dinyatakan dalam bentuk kisaran tonase yang terdiri dari tonase minimum dan tonase maksimum. Penentuan kisaran tonase ini harus dilakukan oleh orang yang berkompeten atau orang yang memiliki pengalaman dan pemahaman yang baik dalam mengestimasi potensi batubara. Dalam pelaporan estimasi potensi batubara, istilah inventori ataupun sumber daya tidak dapat digunakan pada kelompok ini, karena data lapisan batubara yang ditemukan tidak cukup memadai (Anonim, 2019).

Inventori batubara terdiri dari 3 level inventori yaitu tereka, tertunjuk, dan terukur yang ditentukan berdasarkan peningkatan tingkat pengetahuan dan keyakinan geologis. Tingkat keyakinan geologis pada suatu lapisan batubara ditentukan oleh tingkat kerapatan, keandalan titik pengamatan geologis, dan interpretasi geologis yang meliputi ketebalan, kemenerusan, kemiringan, struktur geologi, persebaran lapisan batubara, ketebalan tanah penutup, serta kualitas dan kuantitas batubara (Anonim, 2019). Tingkat keyakinan geologi secara kuantitatif ditentukan berdasarkan jarak titik pengamatan dan kompleksitas geologi (Tabel 2).

Metode yang digunakan untuk mengestimasi potensi batubara pada penelitian ini yaitu dengan menggunakan metode sirkular. Prinsip kerja metode ini adalah dengan membuat poligon melingkar yang mengelilingi lubang bor dengan batas jarak pengukuran yang telah ditentukan (Wood *et al.*, 1983). Batas jarak pengukuran ini ditentukan berdasarkan kondisi geologis yang telah ditentukan oleh SNI 5015:2019. Perhitungan estimasi potensi batubara dilakukan pada setiap level yaitu tereka, tertunjuk, dan terukur (Gambar 5).

Tabel 2. Penentuan jarak titik pengamatan berdasarkan kondisi geologi (Anonim, 2019)

Kondisi Geologi	Parameter	Sumber Daya		
		Tereka	Tertunjuk	Terukur
Sederhana	Jarak Titik Pengamatan (m)	1.000 < x ≤ 1.500	500 < x ≤ 1.000	x ≤ 500
Moderat		500 < x ≤ 1.000	250 < x ≤ 500	x ≤ 250
Kompleks		250 < x ≤ 500	100 < x ≤ 250	x ≤ 100

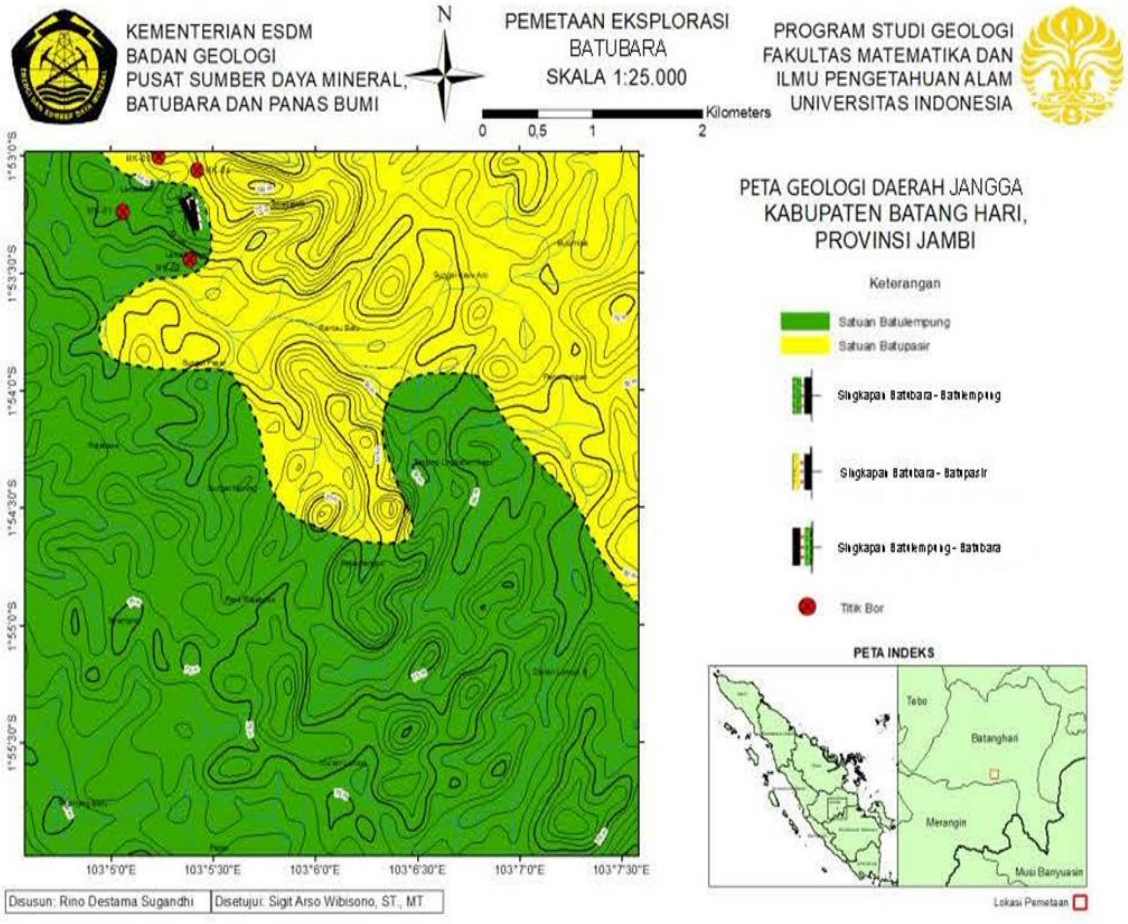


Gambar 5. Metode sirkular yang digunakan dalam perhitungan estimasi potensi batubara (Wood *et al.*, 1983)

HASIL DAN PEMBAHASAN

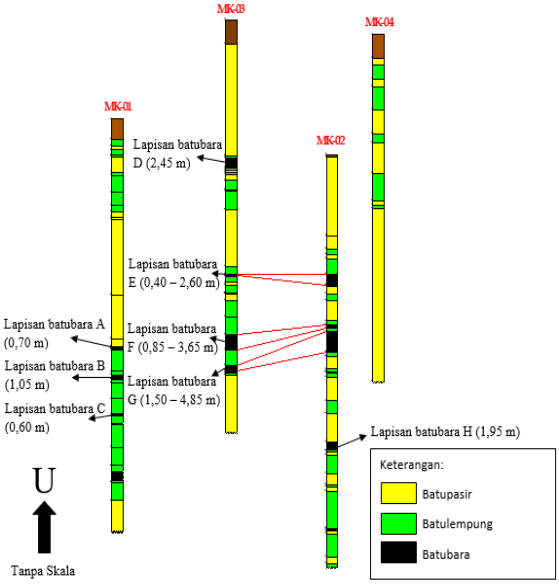
Hasil dari pemetaan geologi permukaan didapatkan bahwa morfologi daerah penelitian dapat dibagi menjadi 2 satuan berdasarkan klasifikasi van Zuidam (1983), yaitu satuan dataran rendah sangat landai dan satuan dataran rendah pedalaman agak curam. Selain itu, geologi daerah penelitian dapat dibagi menjadi 2 satuan batuan utama, yaitu satuan batupasir dan satuan batulempung. Secara geologi regional, kedua satuan batuan tersebut termasuk ke dalam Formasi Muaraenim berumur Miosen Akhir hingga Pliosen. Selain kedua satuan batuan tersebut, ditemukan juga 3 singkapan batubara pada daerah penelitian (Gambar 6).

Pada penelitian ini pengeboran dilakukan untuk mengetahui kesinambungan suatu lapisan batubara berdasarkan rekonstruksi singkapan batubara yang ditemukan di permukaan. Pengeboran dilakukan pada 4 titik bor dengan kedalaman masing-masing ±100 meter. Keempat titik bor di daerah penelitian diberi kode MK-01, MK-02, MK-03, dan MK-04. Menurut SNI 5015:2019, tipe endapan batubara yang ditemukan berdasarkan hasil pengamatan lapangan dan olah data, daerah penelitian termasuk ke dalam kelompok geologi sederhana (Tabel 1).



Gambar 6. Peta geologi daerah penelitian

Pemodelan Geologi

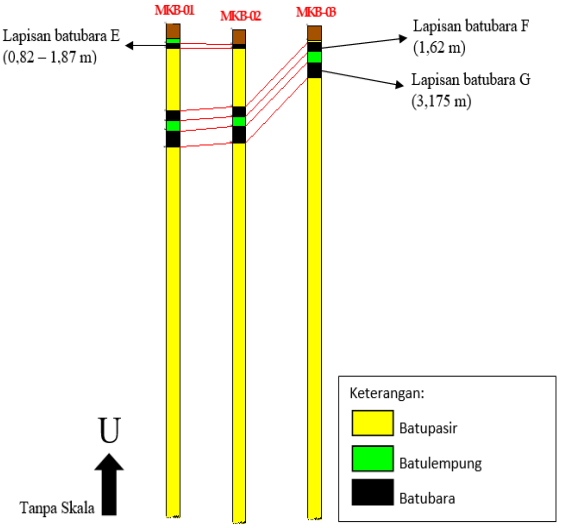


Gambar 7. Korelasi lapisan batubara dari data log bor daerah penelitian

Pemodelan yang dilakukan mengacu pada korelasi lapisan batubara yang telah dibuat dengan mempertimbangkan kesamaan ciri-ciri batubara, ketebalan batubara, litologi *interburden*, dan ketebalan batuan pemisah yang dapat dilihat dari data log bor. Korelasi lapisan ditampilkan dalam bentuk penampang 2 dimensi yang dapat dilihat urutan stratigrafinya (Gambar 7).

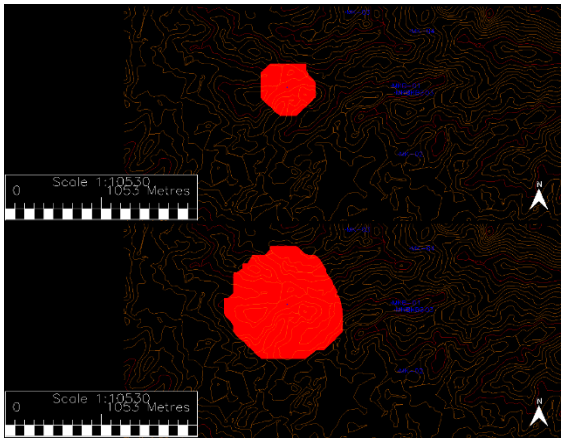
Lapisan batubara A, B, C, D, dan H dimodelkan hanya dengan menggunakan data pada 1 sumur bor. Persebaran batubara pada lapisan batubara tersebut tidak dapat ditentukan kemenerusannya dan cenderung memiliki bentuk yang membundar sesuai dengan jarak ekstrapolasi yang ditentukan. Pemodelan lapisan batubara A, B, C, D, dan H dilakukan dengan menggunakan 2 jarak ekstrapolasi yang berbeda pada setiap lapisannya, sehingga menghasilkan 2 bentuk model pada setiap lapisannya, yaitu berupa model minimum dan model maksimum. Lapisan batubara E, F, dan G dimodelkan dengan menggunakan data lapisan pada dua sumur bor yang berbeda dan data interpretatif berupa sumur bor bayangan yang dibuat dari data singkapan batubara. Persebaran batubara pada lapisan tersebut dapat diketahui kemenerusannya, karena terdapat beberapa titik pengamatan yang bersifat mengikat dan dapat menggambarkan kemenerusan jurus/kemiringan dari setiap lapisannya.

Pembuatan data interpretatif berupa sumur bor bayangan ini didasari oleh keterbatasan data bor yang hanya berjumlah 4. Pada penelitian ini, terdapat 2 data utama yang dapat dijadikan pedoman dalam pemodelan lapisan batubara, yaitu data log bor dan data singkapan batubara. Data singkapan tersebut akan diolah menjadi data sumur bor bayangan yang kemudian akan digunakan untuk membuat model 3D lapisan batubara.

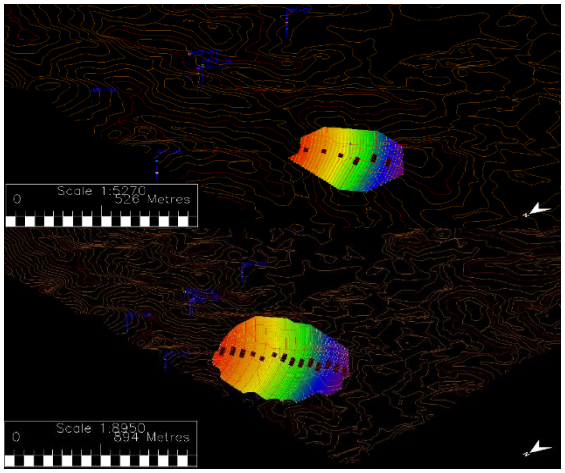


Gambar 8. Korelasi lapisan pada sumur bor bayangan

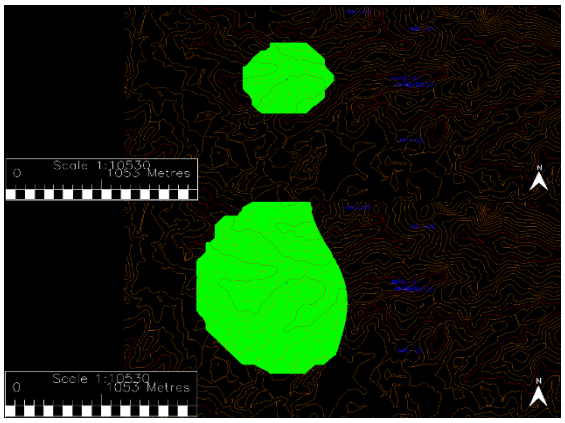
Pemodelan 3D lapisan batubara dimulai dengan membuat skema yang mengandung segala informasi yang akan digunakan untuk menentukan hasil model 3D lapisan batubara. Jenis interpolator yang digunakan untuk memodelkan lapisan batubara ini adalah *Finite Element Method* (FEM). Terdapat 8 model 3D lapisan batubara yang telah dibuat, yaitu lapisan batubara A, B, C, D, E, F, G, dan H (Gambar 9–24).



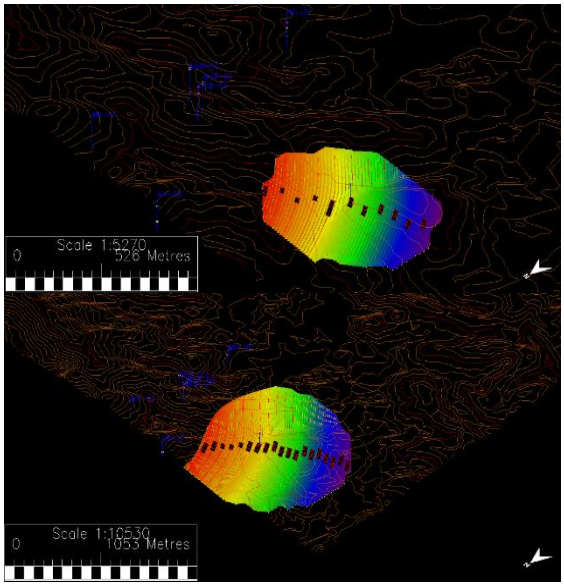
Gambar 9. Model 3D lapisan batubara A minimum (atas) dan maksimum (bawah) tampak atas



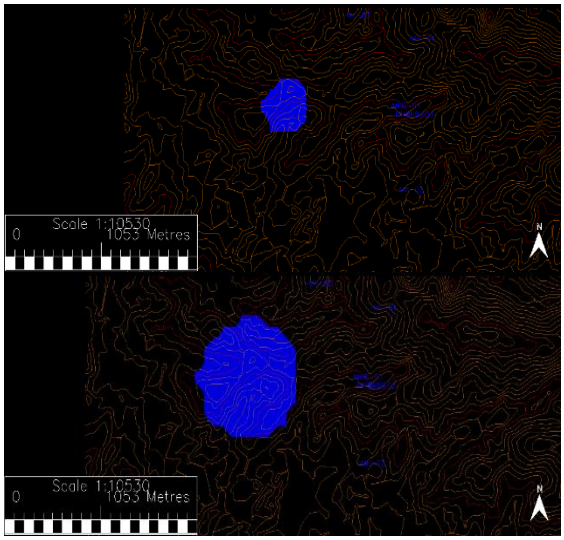
Gambar 10. Model 3D lapisan batubara A minimum (atas) dan maksimum (bawah) arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



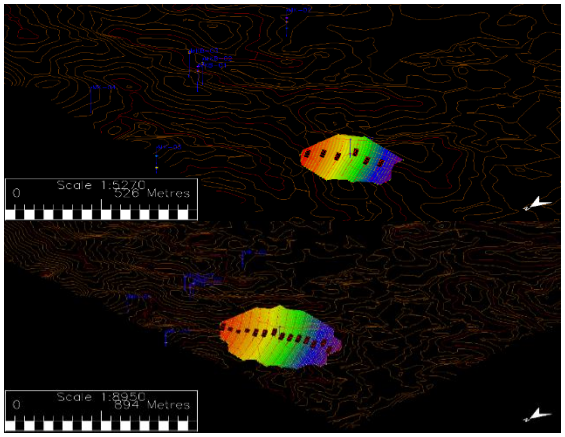
Gambar 11. Model 3D lapisan batubara B minimum (atas) dan maksimum (bawah) tampak atas



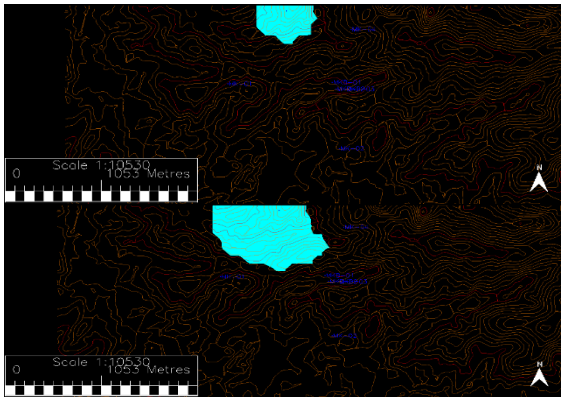
Gambar 12. Model 3D lapisan batubara B minimum (atas) dan maksimum (bawah) arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



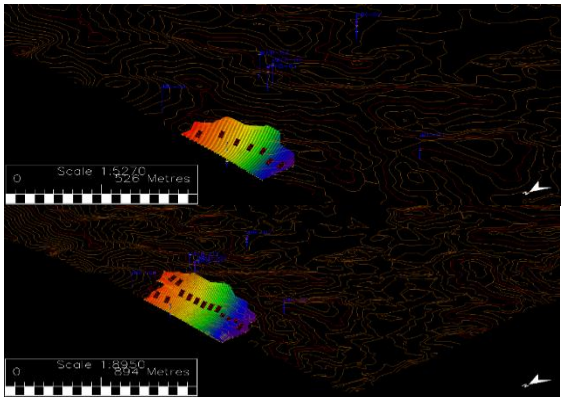
Gambar 13. Model 3D lapisan batubara C minimum (atas) dan maksimum (bawah) tampak atas



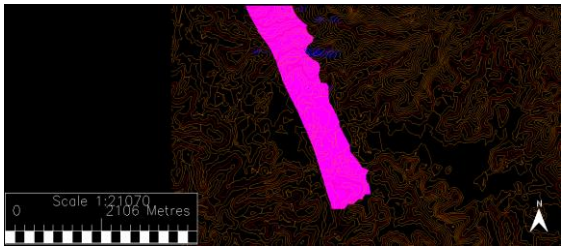
Gambar 14. Model 3D lapisan batubara C minimum (atas) dan maksimum (bawah) arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



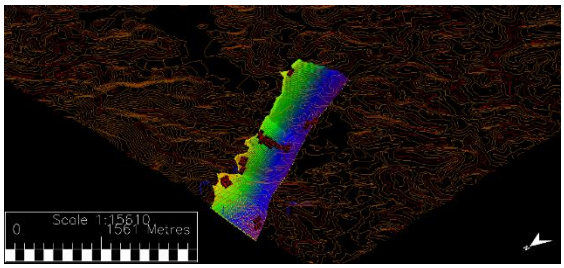
Gambar 15. Model 3D lapisan batubara D minimum (atas) dan maksimum (bawah) tampak atas



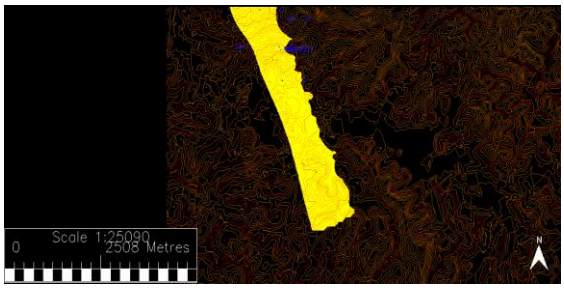
Gambar 16. Model 3D lapisan batubara D minimum (atas) dan maksimum (bawah) arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



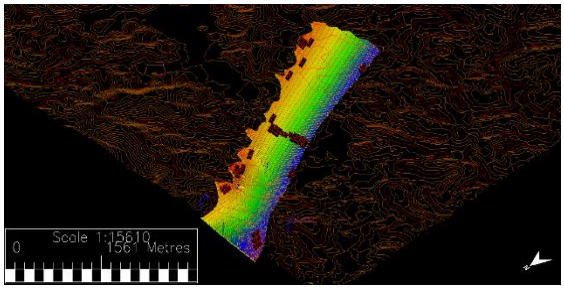
Gambar 17. Model 3D lapisan batubara E tampak atas



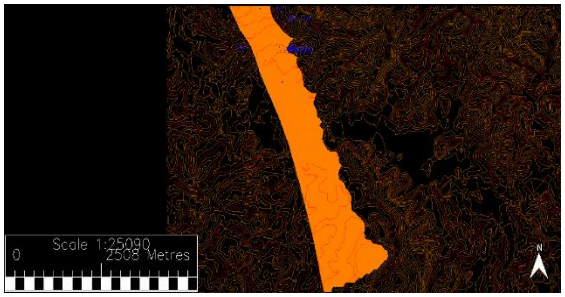
Gambar 18. Model 3D lapisan batubara E arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



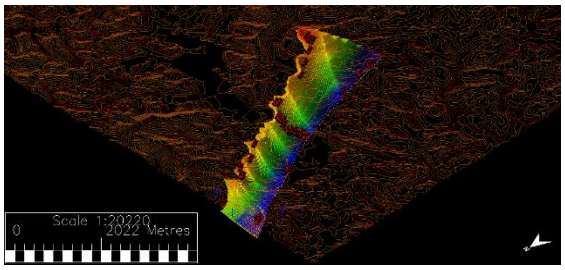
Gambar 19. Model 3D lapisan batubara F tampak atas



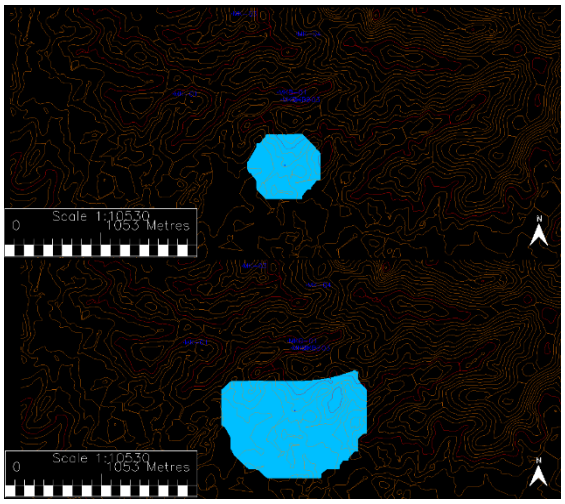
Gambar 20. Model 3D lapisan batubara F arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



Gambar 21. Model 3D lapisan batubara G tampak atas

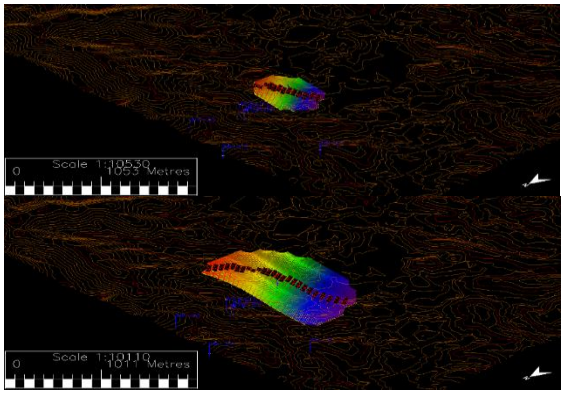


Gambar 22. Model 3D lapisan batubara G arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam



Gambar 23. Model 3D lapisan batubara H minimum (atas) dan maksimum (bawah) tampak atas

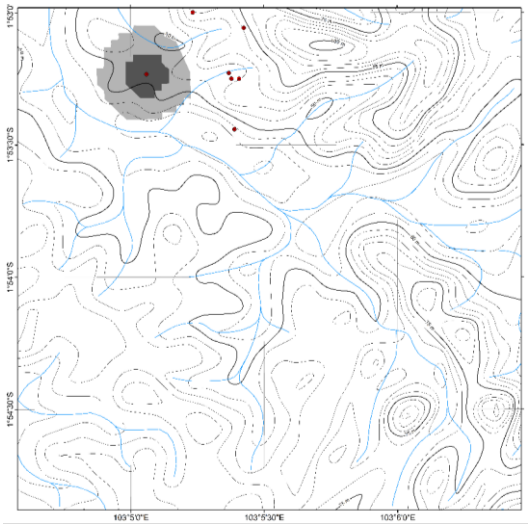
Berdasarkan hasil model yang telah dibuat, kedelapan lapisan tersebut memiliki rentang nilai arah jurus N 147º E-N 160º E dengan arah kelurusan barat laut-tenggara dan memiliki sudut penunjaman 5º-11º kearah barat daya.



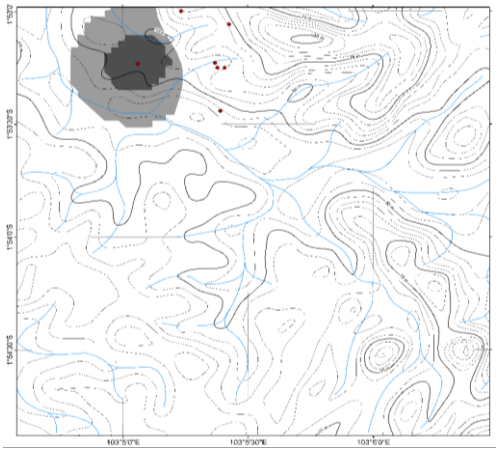
Gambar 24. Model 3D lapisan batubara H minimum (atas) dan maksimum (bawah) arah pandang tenggara, warna menunjukkan perbedaan kedalaman batubara, warna ungu menunjukkan kedalaman paling dalam

Estimasi Potensi Batubara

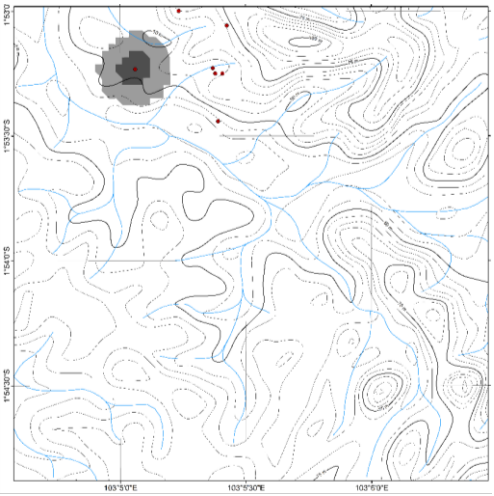
Berdasarkan SNI 5015:2019, batubara yang terdapat di daerah penelitian termasuk ke dalam kelompok target eksplorasi dan inventori batubara. Berdasarkan tingkat keyakinan geologis, perhitungan inventori batubara hanya bisa dilakukan atau dibatasi pada level tereka dan tertunjuk. Menurut SNI 5015:2019, batas perhitungan inventori yang dapat digunakan untuk kondisi geologi sederhana pada perhitungan inventori tereka yaitu 1.000<x<1500 meter dan perhitungan inventori tertunjuk yaitu 500<x<1000 meter (Gambar 25–32).



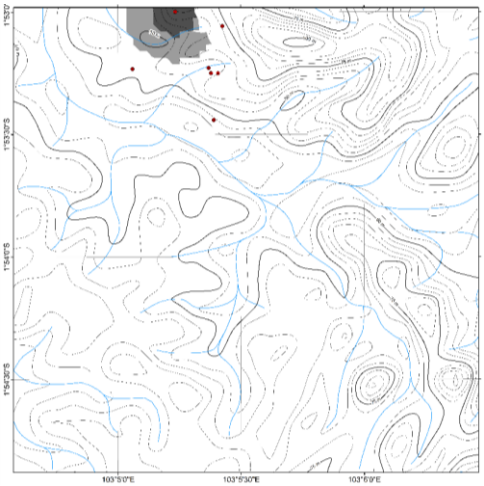
Gambar 25. Peta target eksplorasi batubara lapisan batubara A (Abu Muda Maksimal; Abu Tua Minimal)



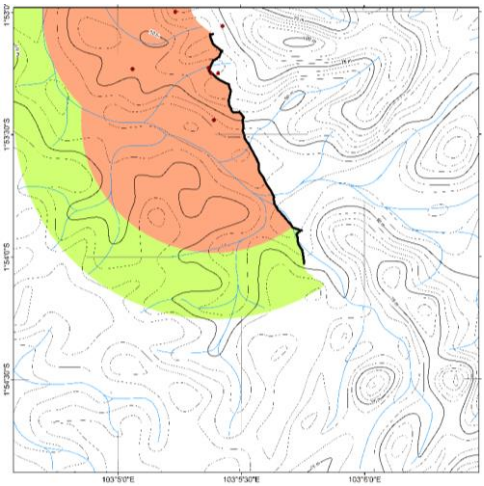
Gambar 26. Peta target eksplorasi batubara lapisan batubara B (Abu Muda Maksimal; Abu Tua Minimal)



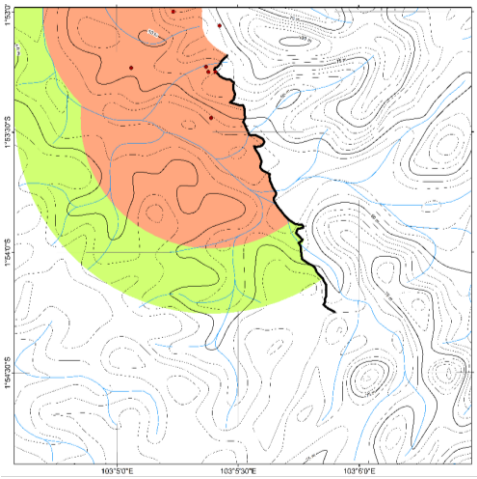
Gambar 27. Peta target eksplorasi batubara lapisan batubara C (Abu Muda Maksimal; Abu Tua Minimal)



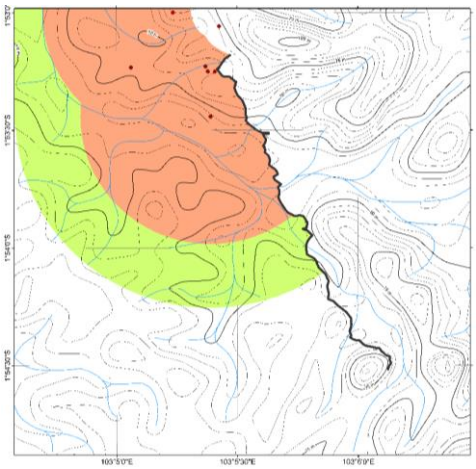
Gambar 28. Peta target eksplorasi batubara lapisan batubara D (Abu Muda Maksimal; Abu Tua Minimal)



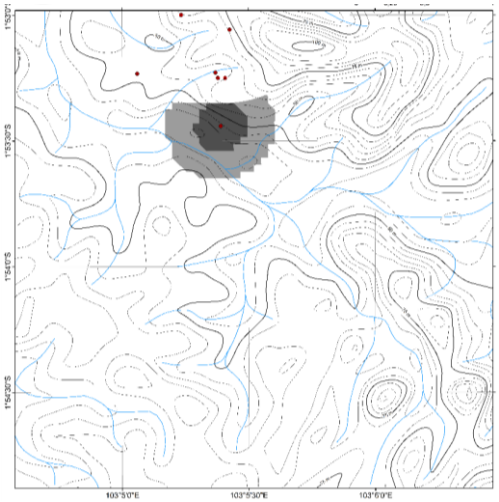
Gambar 29. Peta inventori batubara lapisan batubara E (Kuning Inventori Tereka; Oranye Inventori Tertunjuk)



Gambar 30. Peta inventori batubara lapisan batubara F (Kuning Inventori Tereka; Oranye Inventori Tertunjuk)



Gambar 31. Peta inventori batubara lapisan batubara G (Kuning Inventori Tereka; Oranye Inventori Tertunjuk)



Gambar 32. Peta target eksplorasi batubara lapisan batubara H (Abu Muda Maksimal; Abu Tua Minimal)

Tabel 3. Estimasi Potensi Batubara

lapisan batubara	Minimal (Ton)	Maksimal (Ton)
A	93.632,98	290.321,27
B	402.622,73	1.324.560,73
C	79.481,88	246.183,95
D	223.266,45	922.591,69
H	359.818,75	1.424.721,44
lapisan batubara	Tereka (Ton)	Tertunjuk (Ton)
E	3.396.718,76	2.497.736,62
F	1.180.426,05	1.045.207,88
G	8.339.630,89	5.753.359,95

Beberapa penelitian telah melakukan perhitungan sumber daya dan cadangan batubara pada daerah Jangga. Akan tetapi, metode dan titik yang diukur berbeda-beda. Secara umum, semakin banyak data dan metode yang digunakan maka tingkat keyakinan sumber daya dan cadangan semakin tinggi.

Hal tersebut dapat dilihat dari salah satu analisis geostatistik untuk estimasi potensi batubara yang memberikan hasil bahwa banyaknya data lapangan mempengaruhi detail dari estimasi potensi batubara (Fadhli dan Setiawan, 2022). Selain itu, beberapa penelitian menyebutkan bahwa potensi batubara di daerah penelitian mencapai 3.360.240 ton bahkan hingga 6.662.514 ton (Maharza dan Octova, 2018; Azis *et al.*, 2022). Hal tersebut tidak jauh berbeda dengan hasil penelitian ini karena banyaknya potensi batubara dipengaruhi oleh kondisi geologis dan interpretasi yang dilakukan.

KESIMPULAN

Daerah penelitian termasuk ke dalam Formasi Muaraenim yang terdiri dari 2 satuan batuan utama, yaitu satuan batulempung dan satuan batupasir serta dijumpai 3 singkapan batubara permukaan. Hasil penelitian memperlihatkan terdapat 8 lapisan batubara dari yang paling muda hingga tua yaitu A, B, C, D, E, F, G, dan H. Berdasarkan hasil model yang telah dibuat, kedelapan lapisan tersebut memiliki rentang nilai arah jurus N 147º E-N 160º E dengan arah kelurusan barat laut-tenggara dan memiliki sudut penunjaman 5º-11º ke arah barat daya.

Estimasi potensi batubara dibagi ke dalam 2 kelompok estimasi yaitu target eksplorasi dan inventori. Total estimasi potensi pada kelompok target eksplorasi minimum adalah 1.158.822,74 ton dan maksimum 4.208.379,08 ton. Sementara total estimasi potensi batubara pada kelompok inventori tereka sebesar 12.916.775,7 dan inventori tertunjuk sebesar 9.296.304,45 ton. Eksplorasi lebih lanjut perlu dilakukan untuk meningkatkan pemanfaatan batubara di daerah penelitian

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Kerja Batubara, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral yang telah membantu dalam kegiatan penelitian ini

DAFTAR PUSTAKA

Anonim, 2021. *Pemutakhiran data dan neraca sumber daya batubara, gambut, dan gas metana batubara*, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung: Laporan tidak dipublikasikan

Anonim, 2019. *Standar Nasional Indonesia 5015:2019, Pedoman pelaporan hasil eksplorasi, sumber daya, dan cadangan batubara*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

Aziz, M.J.H., Fanani, Y., & Cahyono, R.D.G., 2022. Calculation of coal resources using the cross-section method in the mining plan area of PT. Sentosa Prima Coal in Mersam District, Batang Hari District, Jambi. *Journal Of Earth and Marine Technology*, 3(1), p. 19-23.

Azmi, R. & Amir, H., 2014. Ketahanan energi: Konsep, kebijakan dan tantangan bagi Indonesia, Jakarta: Badan Kebijakan fiskal kementerian Keuangan.

Baihaqi, A., Susilawati, R., Fauzielly, L., & Muljana, B., 2017. Studi Perbandingan Karakteristik Kimia dan Petrografi Batubara Lapangan X, Cekungan Sumatera Selatan dan Lapangan Y Cekungan Sumatera Tengah Indonesia. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 12(2), p. 87-102.

Barber, A.J., Crow, M.J. & Milsom, J.S., 2005. *Sumatra: Geology, resource and tectonic evolution*. Geological Society Memoirs No. 31. The Geological Society, London.

Bishop, M.G., 2001. *South sumatra basin province, indonesia: the lahat/talang akar-cenozoic total petroleum system*. Denver, Colorado, USA: US Geological Survey.

Diessel, C.F., 1992. *Coal-bearing depositional systems.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Fadhli, M., & Setiawan, B., 2022. Determination of Relative Error in Coal Resource Classification Based On Geostatistical Drill Hole Spacing Analysis: A Case Study of Coal Deposits at Batang Hari, Jambi. *Jurnal Geomine*, 10(2), p. 145-155.

Maharza, C., & Octova, A., 2018. Estimasi Sumberdaya Batubara dengan Menggunakan Metode Cross Section di Pit 2 PT. Tambang Bukit tambi. Site Padang Kelapo. Kec. Muaro Sebo Ulu. Kab. Batanghari. Provinsi Jambi. *Jurnal Bina Tambang*, 3(4), p. 1793-1903.

Panggabean, H. & Santy, L.D., 2012. Sejarah penimbunan cekungan Sumatra Selatan dan implikasinya terhadap waktu generasi hidrokarbon. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 22(4), p. 225-235.

Sudinda, T.W., 2020. Analisis Kestabilan Lereng pada Lokasi Tambang Batubara Tanah Laut Kalimantan Selatan. *Jurnal ALAMI: Jurnal Teknologi Reduksi Risiko Bencana*, 4(2), p. 96-104.

van Zuidam, R.A. 1983. Guide to Geomorphologic aerial photographic interpretation and mapping. Netherlands: ITC Enschede.

Ward, C.R., Li, Z., & French, D.H., 2005. Geological sources of metals in coal and coal products. *Metal Contaminants in New Zealand, Resolutionz Press, Christchurch, New Zealand*, p. 49-79.

Wood, G.H., Kehn, T.M., Carter, M.D. & Culbertson, W.C., 1983. *Coal resource classification system of the US Geological Survey* (Vol. 891). US Department of the Interior, Geological Survey.

Diterima	: 4 Oktober 2022
Direvisi	: 31 Oktober 2022
Disetujui	: 30 November 2022

KARAKTERISTIK ALTERASI BAWAH PERMUKAAN DI LAPANGAN PANAS BUMI "X", KABUPATEN SUKABUMI, PROVINSI JAWA BARAT

(*CHARACTERISTICS ALTERATION OF SUB-SURVEY IN "X" GEOTHERMAL FIELD, SUKABUMI, WEST JAVA PROVINCE*)

Flaurentina Nadya[1], Aton Patonah[1], Undang Mardiana[1], dan Mochammad Nurhadi[2]
[1]Universitas Padjadjaran
[2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
flaurentina.nadya@gmail.com

ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia. Salah satunya terletak di Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. Untuk dapat mengoptimalkan potensi panas bumi, diperlukan penelitian mengenai karakteristik panas bumi, salah satunya penelitian mineral alterasi pada manifestasi panas bumi. Penelitian ini difokuskan pada studi alterasi menggunakan data *coring* dan *cutting* dari pengeboran Sumur X. Urutan Batuan pada sumur X dari tua ke muda terdiri atas endapan danau, tufa teralterasi, breksi tufa teralterasi, dasit teralterasi, andesit teralterasi, breksi andesit teralterasi dan breksi vulkanik teralterasi yang terbagi kedalam dua periode vulkanik yakni periode Pliosen yang berasal dari letusan Gunung Citorek dan Plistosen yang berasal dari letusan Gunung Halimun dan Gunung Tapos. Berdasarkan himpunan mineral alterasinya, zona alterasi pada sumur X terbagi kedalam 3 zona yakni zona smektit -klorit pada kedalaman 24 s.d 600 MD, zona ilit – klorit pada kedalaman 600 s.d 700 MD, dan zona klorit - smektit pada kedalaman 700 s.d 821 MD. Berdasarkan komposis mineral dan zona alterasinya, tipe alterasi pada sumur X adalah sub-profilitik dengan pH netral dan temperatur 200-300°C dan dapat bertindak sebagai zona penudung dan dilihat dari pemunculan manifestasi yang dikontrol oleh struktur, daerah penelitian berada di bagian zona *outflow.*

Kata Kunci: Panas Bumi, Alterasi, Zona Alterasi, Sub-Profilitik, Zona *Outflow*

ABSTRACT

Indonesia is one of the countries that has the largest geothermal potential in the world. One of them is located in Sukabumi Regency, West Java. In order to optimize geothermal potential, research on geothermal characteristics is needed, one of which is the study of alteration minerals in geothermal manifestations. This research is focused on alteration studies using coring and cutting data from the drilling of Well X. The sequence of rocks in Well X from oldest to younger succession consists of lake deposits, altered tuff, altered tuff breccias, altered dacite, altered andesite, altered andesite breccias and late volcanic breccias. which is divided into two volcanic periods, namely the Pliocene period from the eruption of Mount Citorek and the Pleistocene from the eruption of Mount Halimun and Mount Tapos. Based on the assemblage of alteration minerals, the alteration zone in Well X is divided into 3 zones, namely the smectite-chlorite zone at a depth of 24 to 600 MD, illite-chlorite zone at a depth of 600 to 700 MD, and the chlorite-smectite zone at a depth of 700 to 821 MD. Based on the mineral composition and alteration zone, the type of alteration in Well X is sub-prophylitic with neutral pH and temperature 200-300°C and can act as a containment zone and judging from the appearance of manifestations controlled by the structure, the study area is in the outflow zone.

***Keywords**: Geothermal, Alteration, Alteration Zone, Sub-prophylitic, Outflow Zone*

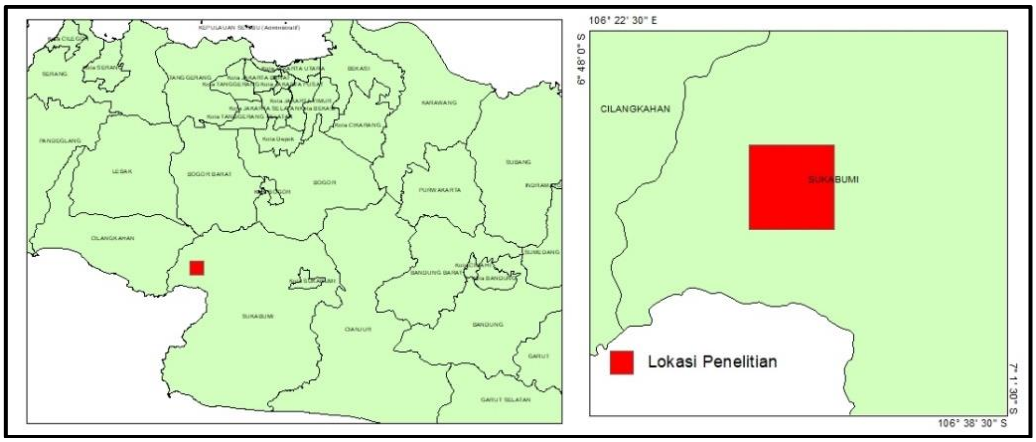
PENDAHULUAN

UU nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi, menyatakan bahwa Panas Bumi adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, dan batuan bersama dengan mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetik tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem panas bumi. Sumberdaya energi panas bumi dapat ditemukan pada batuan dan air di dekat permukaan bumi dengan ciri khas suhu yang tinggi. Selain di permukaan sumberdaya panas bumi juga dapat ditemukan di bawah permukaan sampai dengan kedalaman beberapa kilometer atau bahkan dapat ditemukan juga sampai dengan kedalaman yang sangat tinggi dengan suhu ekstrim dari batuan atau magma yang mencair.

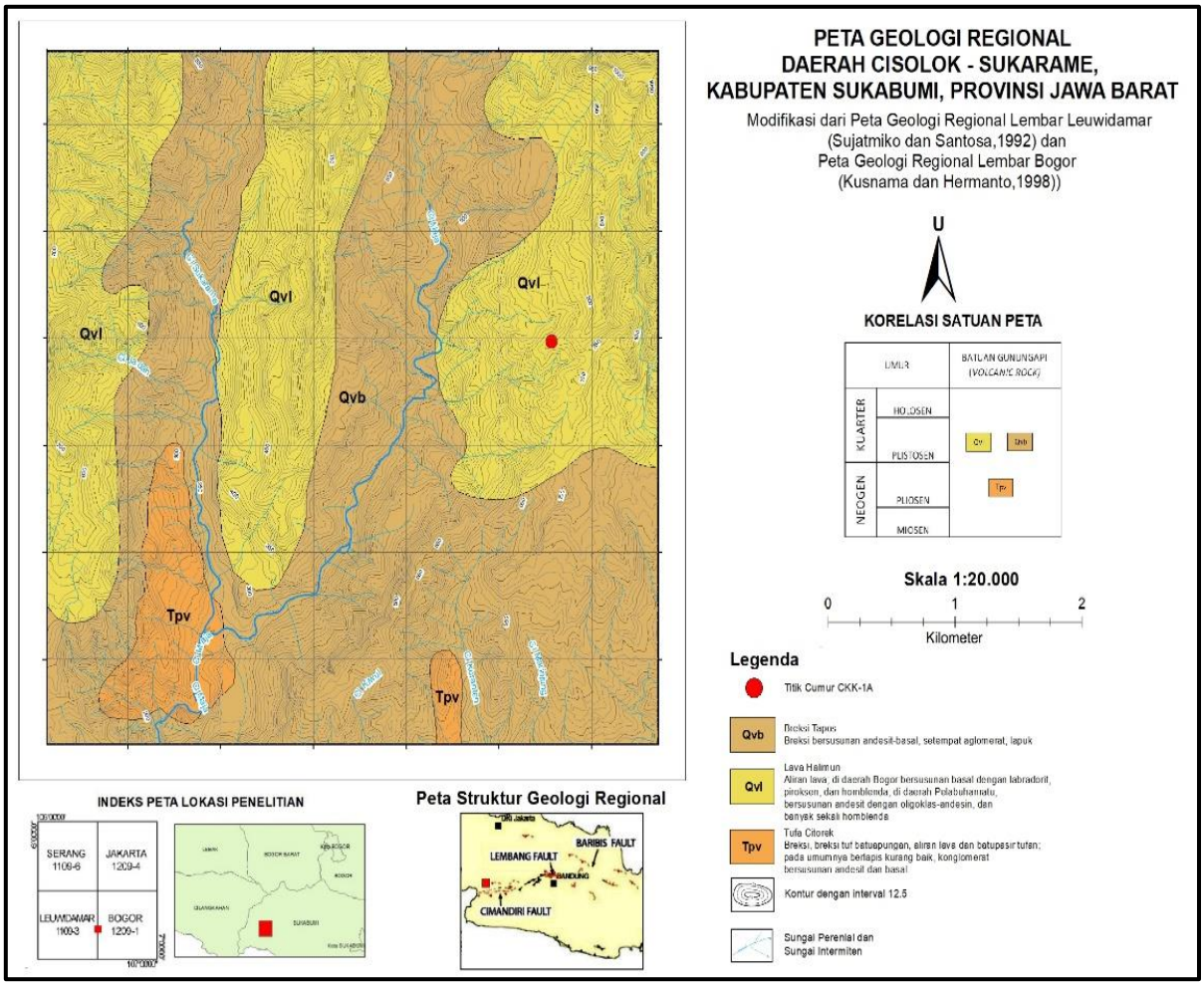
Secara geografis, Indonesia merupakan negara yang berada pada jalur *"Ring of Fire",* yang ditandai dengan banyaknya aktivitas vulkanisme sehingga potensi panas bumi di Indonesia sangatlah besar, yakni mencapai 23,9 Giga Watt. Potensi tersebut, Indonesia diharapkan bisa memanfaatkan sebagai sumber energi pembangkit listrik dan kegiatan perekonomian masyarakat (PPSDM KEBTKE, 2020).

Salah satu wilayah Indonesia yang memiliki potensi panas bumi yang dapat dikembangkan lebih lanjut adalah daerah Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat (Gambar 1). Potensi ini dibuktikan dengan adanya geyser, kubangan lumpur panas, mata air panas, kolam air panas, dan travertin. Untuk dapat mengoptimalkan potensi panas bumi tersebut, diperlukan penelitian mengenai karakteristik panas bumi, salah satunya adalah meneliti manifestasi panas bumi berupa mineral alterasi. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai karakteristik alterasi lapangan panas bumi dan pendugaan temperatur pembentukannya.

Lokasi daerah penelitian termasuk ke dalam fisiografi Zona Pegunungan Selatan yang terbentang mulai dari Teluk Pelabuhanratu sampai Pulau Nusakambangan. Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Leuwidamar skala 1:100.000 (Sujatmiko dan Santosa, 1992) dan sebagian Peta Geologi Regional Lembar Bogor skala 1:100.000 (Kusnama dan Hermanto, 1998), daerah penelitian tersusun dari tiga formasi, yaitu Batuan Tufa Citorek (Tpv) yang berumur Pliosen, Batuan Lava Halimun (Qvl), dan Breksi Tapos (Qvb) yang berumur Plistosen (Gambar 2). Struktur geologi regional daerah penelitian terdiri atas kekar dan sesar dengan arah orientasi timur laut – barat daya, barat – timur, dan hampir utara – selatan. Ketiga sesar utama tersebut, terdapat satu sesar utama, yakni sesar dengan orientasi timur laut – barat daya, sesar tersebut merupakan sesar yang paling berperan dalam mengontrol pemunculan manifestasi di permukaan (Haty dan Nugroho, 2013).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian



Gambar 2. Peta Geologi Regional daerah penelitian

METODOLOGI

Penelitian ini difokuskan kepada studi alterasi dengan objek penelitian yang diamati adalah data hasil pengeboran yang terdiri dari sampel into bor *(coring)*, sampel serbuk bor (*cutting*) dan data *SpecTerra*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengamatan secara megaskopis dengan tujuan untuk mengidentifikasi karakteristik fisik batuan sehingga dapat diketahui tekstur, struktur, komposisi, dan jenis litologi pada daerah penelitian. Selanjutnya, dilakukan pemilihan yakni sebanyak sepuluh sampel mewakili dari setiap batuan dan mineral ubahan untuk dilakukan analisis petrografi dengan tujuan mendeskripsi lebih detail tekstur, struktur, dan mineral penyusun batuan serta mineral ubahannya. Tahapan berikutnya adalah analisis SpecTerra, sebagai salah satu metoda yang digunakan untuk menentukan jenis mineral yang berbutir sangat halus terutama mineral lempung dengan menembakan spektrum cahaya pada sampel terpilih sehingga menghasilkan grafik reflektan terhadap panjang gelombang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

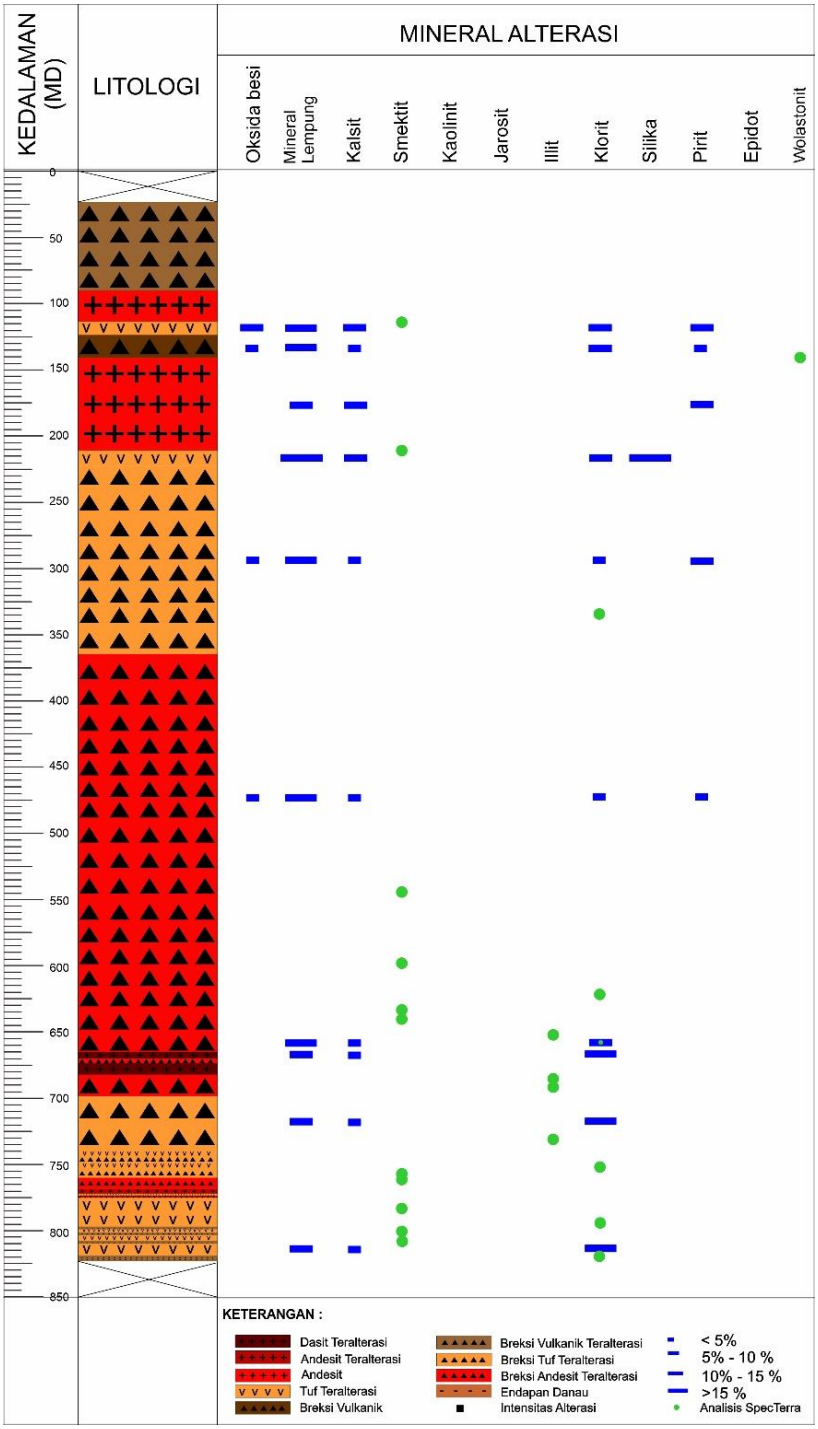
Stratigrafi Sumur X

Data diperoleh dari Sumur X dengan kedalaman hingga 821 MD (*Meter Depth*). Penentuan litologi pada sumur X dilakukan melalui analisis megaskopis dan analisis mikroskopis dari kenampakan sampel batuan di bawah permukaan berupa sampel serbuk bor (*cutting*) dan sampel inti bor (*coring*). Berdasarkan hasil pengamatan tersebut, urutan batuan pada sumur X dari tua ke muda terdiri atas endapan danau, tufa teralterasi, breksi tufa teralterasi, dasit teralterasi, andesit

teralterasi, breksi andesit teralterasi dan breksi vulkanik terlaterasi yang terbagi kedalam dua periode vulkanik yakni periode Pliosen pada kedalaman 600 s.d 821MD yang berasal dari letusan Gunung Citorek dan periode Plistosen pada kedalaman 24 s.d 600MD yang berasal dari letusan Gunung Halimun dan Gunung Tapos (Gambar 3).

Mineral Alterasi Hidrotermal Sumur X

Berdasarkan hasil analisis mikroskopis dan analisis specterra, mineral alterasi yang terdapat pada sumur X adalah Mineral Lempung, Mineral Karbonat, Klorit, Mineral Oksida, dan Mineral Sulfida (Gambar 3). Berikut penjelasan lebih detail mengenai karakteristik masing – masing mineral alterasi.



Gambar 3. Komposisi mineral alterasi pada Sumur X

Mineral Lempung
Jenis mineral lempung merupakan mineral yang sulit diidentifikasi melalui analisis megaskopis dan mikroskopis, dengan demikian perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk menentukan namanya, salah satunya yakni dengan analisis *SpecTerra*. Berdasarkan hasil analisis tersebut, jenis mineral lempung yang terdapat pada sumur X ini terdiri atas mineral smektit dan ilit.

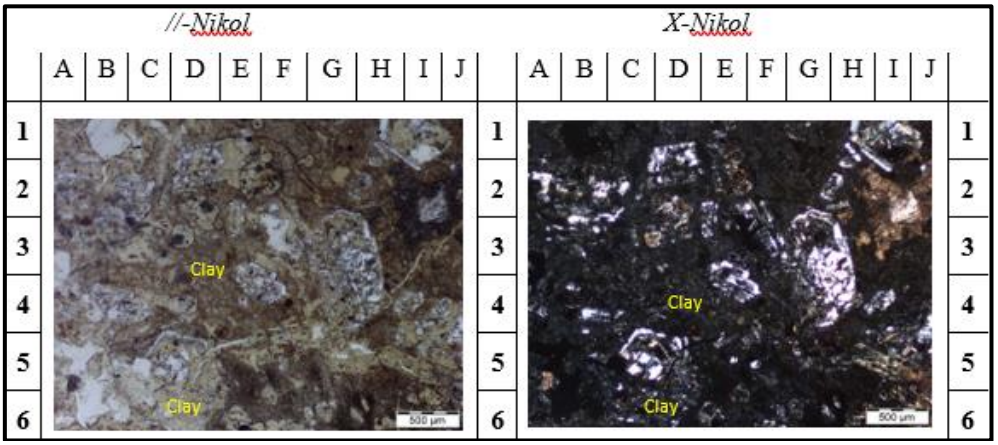
Smektit hadir pada kedalaman 114 MD s.d 639 MD. Mineral smektit pada sumur X merupakan mineral monmorilonit (Gambar 4 dan 5). Mineral ini adalah mineral hasil ubahan dari mineral plagioklas dan gelas vulkanik. Mineral ini umumnya terdapat pada tipe alterasi argilik (Corbet dan Leach, 1998) dan terbentuk pada temperatur cukup rendah yakni <200°C (Reyes,1990). Selain smektit, juga hadir mineral Ilit yang merupakan mineral lempung berwarna putih yang terlihat kehadiranya pada kedalaman 654 s.d 732 MD. Mineral ini memiliki PH 4 s.d 6 yang merupakan penciri dari tipe alterasi argilik dan terbentuk pada temperatur 200°C s.d 250°C (Corbet dan Leach, 1998) (Gambar 6).

Mineral Karbonat
Mineral karbonat jenis kalsit hadir pada setiap kedalaman sampel yang dilakukan analisis petrografi. Mineral ini mengisi rekahan pada batuan. Berdasarkan mikroskopis, mineral kalsit tersebut memiliki karakteristik agak kecoklatan, granular, relif tinggi bias rangkap tinggi, mengisi rekahan pada batuan. (Gambar 6).

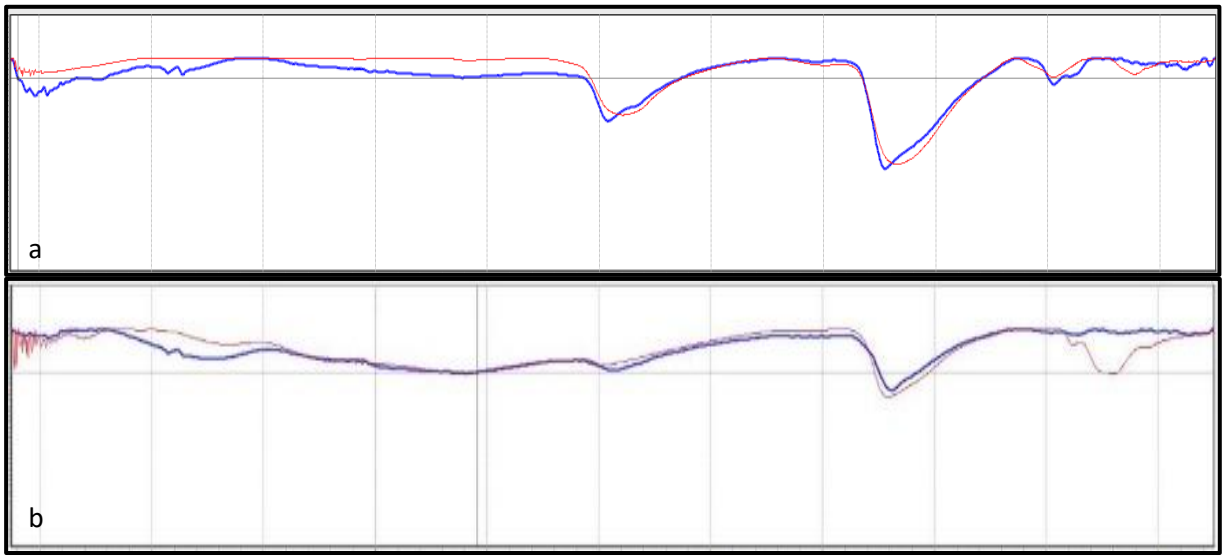
Klorit
Mineral klorit melimpah seiring dengan bertambahnya kedalaman. Pada pengamatan petrografi, mineral klorit memiliki warna hijau muda, beragregat (Gambar 7), mengisi celah dan hasil ubahan dari mineral piroksen dan plagioklas. Mineral klorit merupakan mineral yang memiliki rentang temperatur yang cukup panjang yakni 0 s.d 120°C (Reyes,1990).

Mineral Oksida
Mineral oksida pada sumur X terlihat dalam analisis mikroskopis. Mineral ini hadir dengan karakteristik berwarna coklat pucat, warna interferensi coklat kehitaman, mengisi rekahan atau menggantikan mineral piroksen dan plagioklas. (Gambar 8).

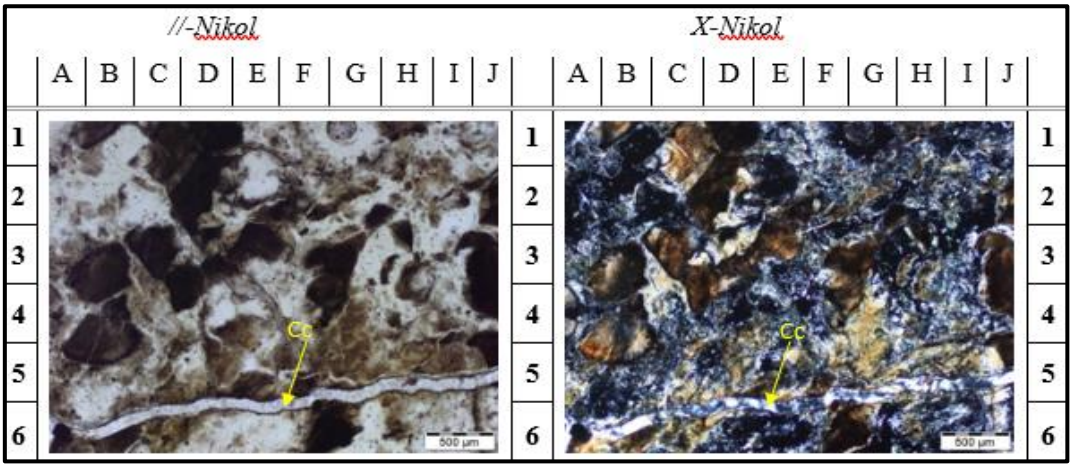
Mineral Sulfida
Mineral sulfida yang terdapat pada sumur X adalah mineral pirit. Mineral ini memiliki karakteristik berwarna hitam, berbentuk kubik isometris, ukuran butir <2mm, bersifat isotrop (Gambar 9). Mineral pirit terdapat hampir di seluruh sampel sayatan tipis dan terdapat secara *spotted* pada titik kedalaman tertentu dan ada juga yang mengisi rekahan bersama dengan mineral kalsit.



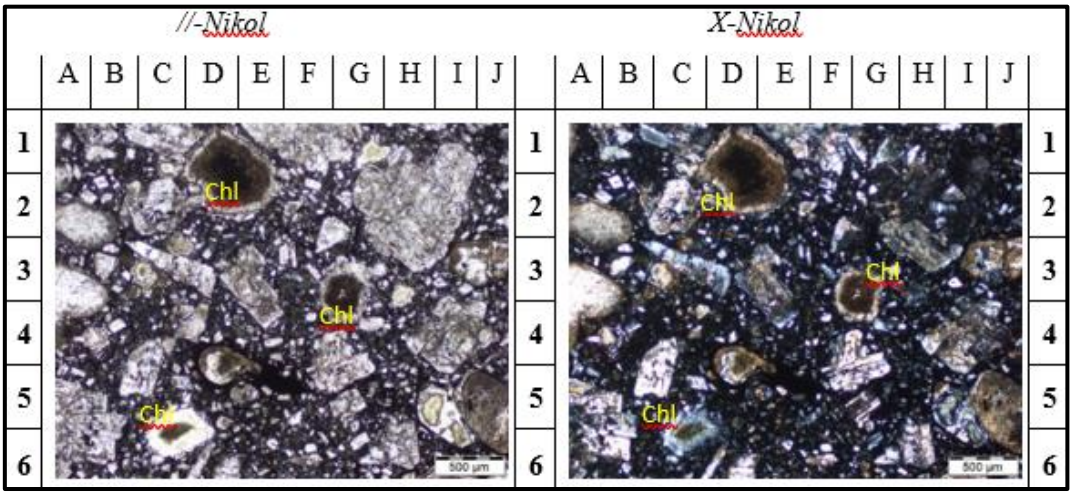
Gambar 4. Kenampakan mineral lempung menggantikan mineral plagioklas dan gelas vulkanik pada sampel batuan breksi vulkanik kedalaman 125 s.d. 141MD (*clay* = mineral lempung)



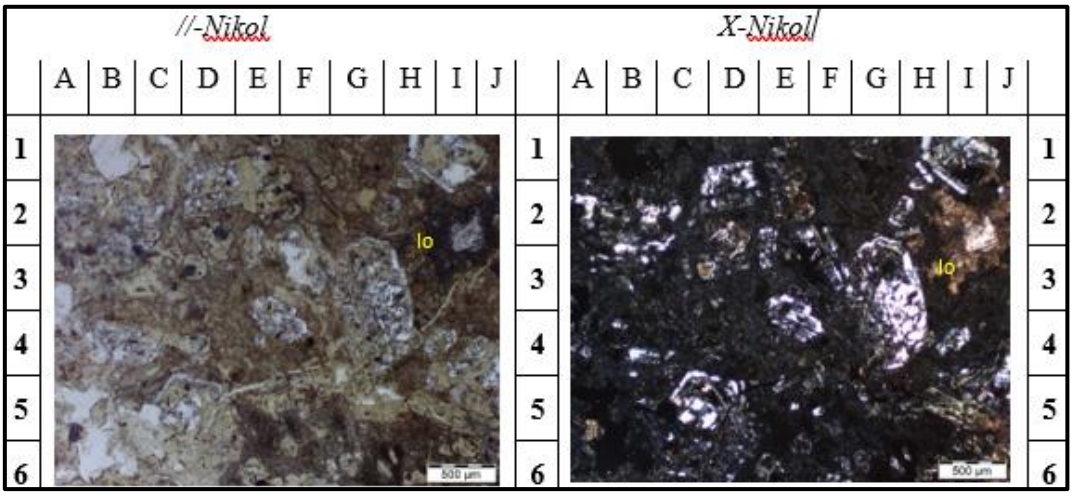
Gambar 5. a. Grafik specterra mineral monmorilonit pada kedalaman 114 MD
b. Grafik specterra mineral ilit pada kedalaman 654 MD



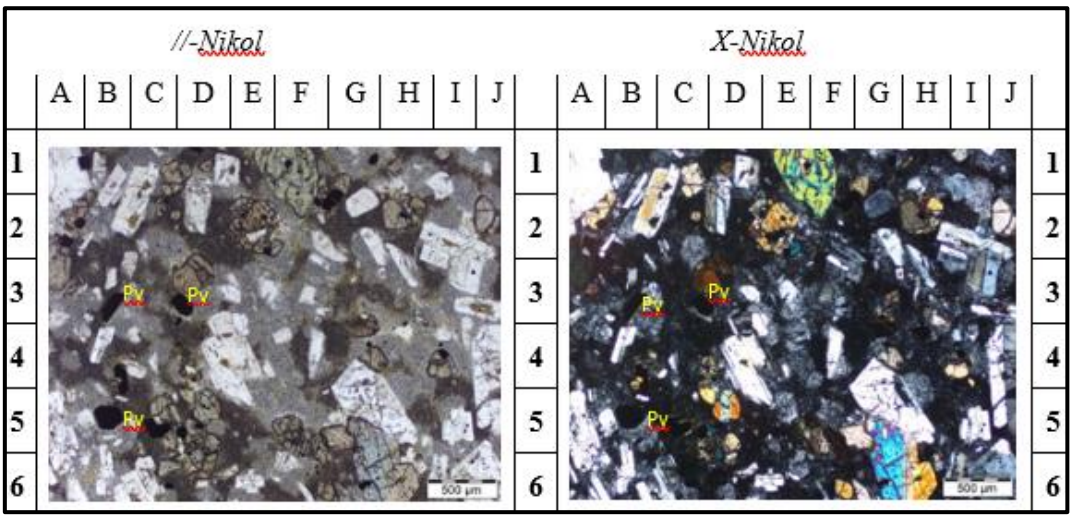
Gambar 6. Kenampakan mineral kalsit pada batuan breksi andesit teralterasi kedalaman 211 s.d 223 MD, kalsit hadir dengan mengisi rekahan (Cc = Kalsit)



Gambar 7. Kenampakan mineral klorit pada batuan breksi andesit teralterasi kedalaman 656 s.d 665 MD (Chl = Klorit)



Gambar 8. Kenampakan mineral oksida pada batuan breksi vulkanik kedalaman 125 s.d 141 MD (IO = Iron Oxide)



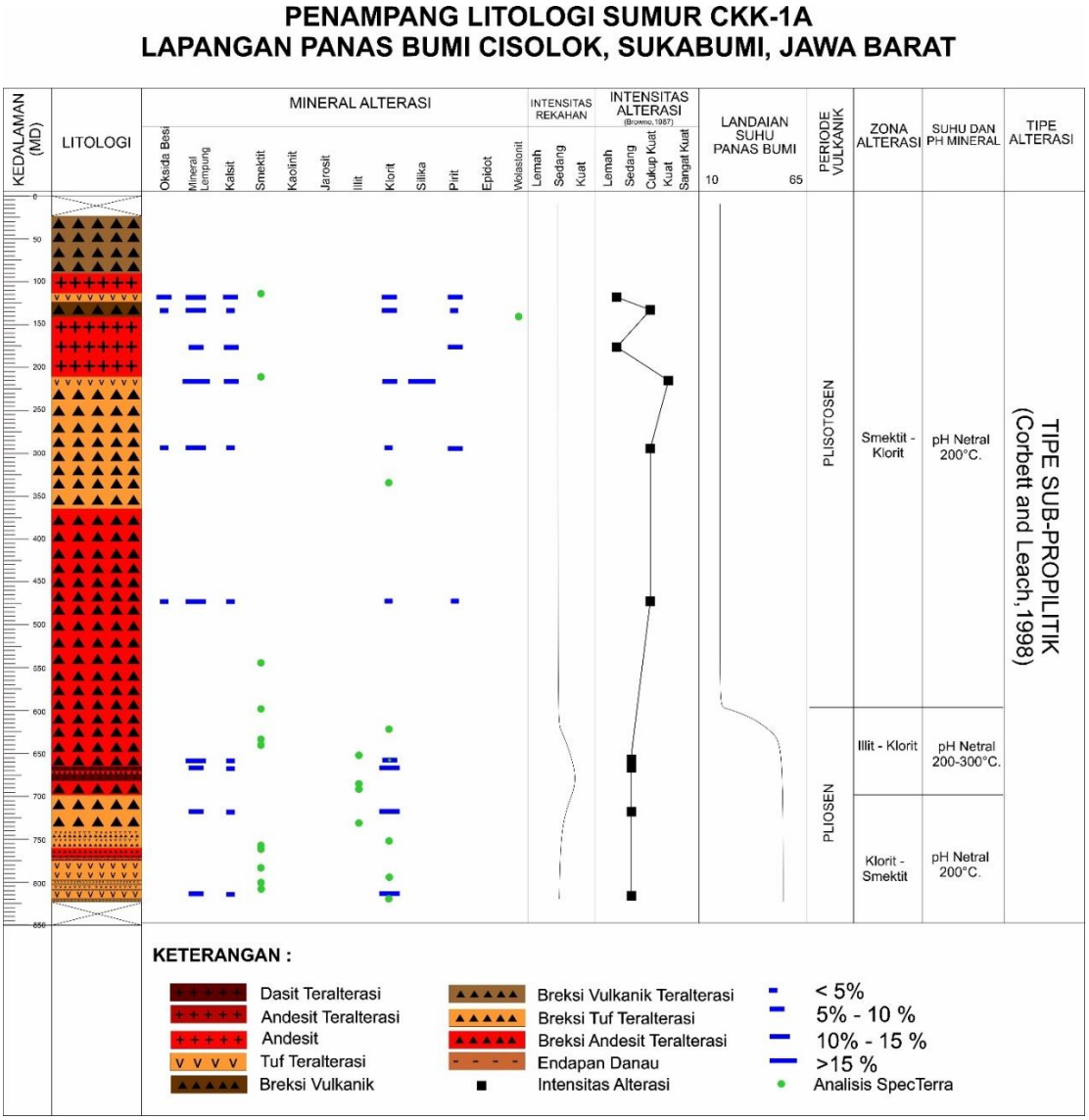
Gambar 9. Kenampakan mineral pirit) pada batuan andesit kedalaman 141 s.d 211 MD (Py = *Pyrite*)

Zonasi Mineral Alterasi Sumur X

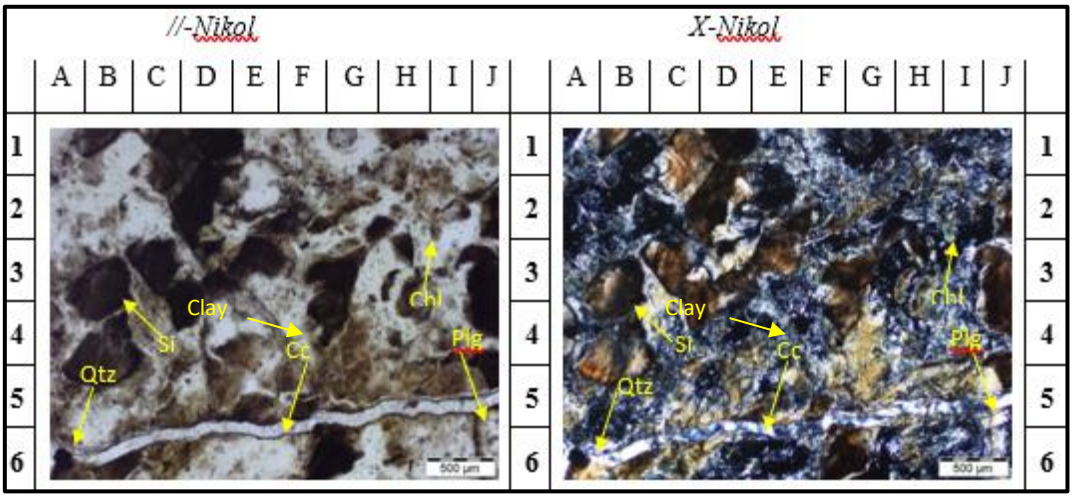
Hasil analisis mikroskopis pada 10 sampel sayatan dan analisis *SpecTerra* pada 24 titik kedalaman pada sumur X, terdapat tiga zona alterasi (Gambar 10) yaitu;

Zona Smektit – Klorit

Zona Smektit – Klorit terdapat pada kedalaman 24 s.d 600 MD. Pada kedalaman tersebut, ditemukan mineral alterasi smektit, klorit, ilit, mineral oksida, kalsit, dan pirit (Gambar 10). Berdasarkan himpunan mineralnya zona mineral alterasi didominasi oleh smektit – klorit (Gambar 11). Menurut Corbet dan Leach (1998), zona smektit – klorit merupakan zona transisi dari alterasi tipe argilik yang merupakan zona penudung dan tipe sub-propilitik (Corbett dan Leach, 1998).



Gambar 10. Penampang litologi beserta pembagian zona alterasi



Gambar 11. Foto sayatan *crystal tuff* pada kedalaman 211 s.d 223m memperlihatkan alterasi yang intensif, didominasi mineral lempung dan klorit (Cc = Kalsit, Plg = Plagioklas, Qtz = Kuarsa, Chl = Klorit)

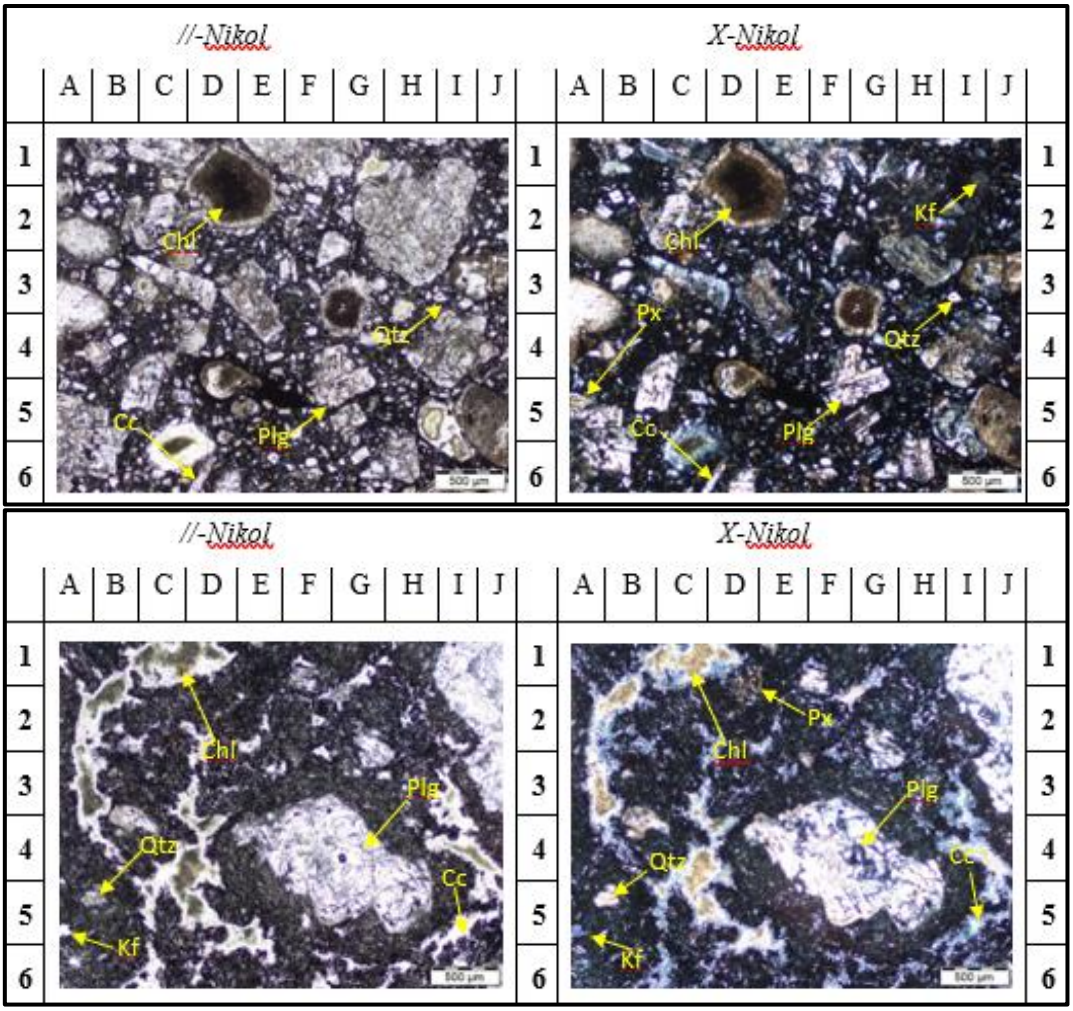
Dilihat dari mineral alterasi yang dominan yakni mineral smektit dan mineral klorit , maka pH zona ini termasuk pH netral. Untuk temperaturnya itu sendiri, mineral smektit memiliki temperatur keterbentukan <200°C dan mineral klorit memiliki temperatur keterbentukan >200°C (Reyes,1990) sehingga zona smektit – klorit ini terbentuk pada temperatur 200°C (Tabel 1).

Zona Ilit – Klorit

Zona ini dapat ditemukan pada kedalaman 600 s.d 700 MD. Pada Zona ini, mineral alterasi didominasi oleh mineral ilit dan klorit, sebagian kecil hadir mineral oksida, kalsit, dan pirit (Gambar 12).Mineral ini hadir padabatuan breksi, andesit teralterasi dan dasit, Berdasarkan himpunan mineral alterasinya, zona ini merupakan zona transisi antara tipe argilik dan propilitik yakni zona sub-propilitik (Corbett dan Leach, 1998).

Tabel 1. Temperatur keterbentukan zona smektit – klorit

JENIS MINERAL	TEMPERATUR (°C)						
	50	100	150	200	250	300	350
SMEKTIT							
KLORIT							



Gambar 12. a. Foto sayatan komponen breksi andesit teralterasi pada kedalaman 656 s.d 665 MD. b. Foto sayatan dasit pada kedalaman 665 s.d 670 MD (Cc = Kalsit, Plg = Plagioklas, Kf = k-feldspar, Qtz = Kuarsa, Chl = Klorit)

Dilihat dari asosiasi mineral alterasi yang hadir, maka zona ini memiliki pH netral dengan temperatur pembentukan di antara 200 s.d 300°C (Reyes, 1990). (Tabel 2)

Zona Klorit - Smektit

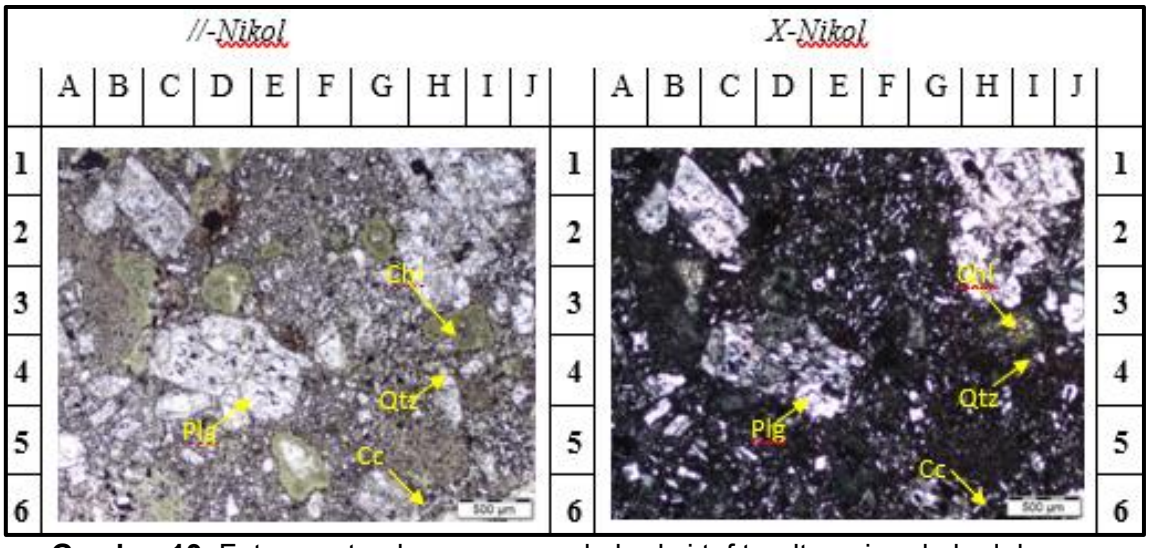
Zona Klorit – Smektit terdapat pada kedalaman 700 s.d 821 MD Sumur X. Pada kedalaman tersebut memiliki kesamaan mineral alterasi dominan dengan kedalaman 24 s.d 615 MD, namun terdapat perbedaan komposisi mineral alterasi lainya yakni ditemukan mineral alterasi monmorilonit, klorit yang lebih dominan, dan sedikit ilit. Mineral klorit pada kedalaman tersebut semakin banyak kehadiranya dari kedalaman sebelumnya dan sangat mendominasi.

Salah satu sampel yang dilakukan analisis yang hasilnya mewakili zona klorit – smektit ini adalah sampel sayatan batuan pada kedalaman 700 s.d 740 MD dengan litologi breksi tuf teralterasi. Berdasarkan hasil analisis batuan ini memiliki intensitas alterasi sedang (Browne,1984) dengan mineral sekunder sebesar 30% yang tersusun atas mineral lempung, kalsit, dan klorit yang kehadiranya cukup banyak. (Gambar 13).

Dilihat dari mineral alterasi yang dominan yakni mineral klorit maka pH zona ini adalah netral, dengan temperaturnya keterbentukan mineral klorit >200°C dan mineral smektit <200°C (Reyes,1990) sehingga zona ini diperkirakan terbentuk pada temperatur 200°C (Tabel 3).

Tabel 2. Temperatur keterbentukan zona Ilit – Klorit

JENIS MINERAL	TEMPERATUR (°C)						
	50	100	150	200	250	300	350
ILIT							
KLORIT							



Gambar 13. Foto sayatan komponen pada breksi tuf teralterasi pada kedalaman 700 –s.d 740 MD (Cc= Kalsit, Plg = Plagioklas, Qtz = Kuarsa, Chl = Klorit)

Tabel 3. Temperatur keterbentukan zona klorit - smektit

JENIS MINERAL	TEMPERATUR (°C)						
	50	100	150	200	250	300	350
SMEKTIT							
KLORIT							

Karakteristik Alterasi Sumur X

Hasil pengamatan dan identifikasi karakteristik batuan hasil pemboran pada Sumur X dan grafik landaian suhu panas bumi, litologi daerah penelitian berasal dari dua paket erupsi yakni erupsi periode Pliosen pada kedalaman 600 s.d 821 MD yang tersusun atas batuan breksi andesit teralterasi, dasit teralterasi, breksi tuf teralterasi, tuf teralterasi, andesit teralterasi, dan endapan danau, serta paket erupsi periode Plistosen pada kedalaman 24 s.d 600 MD yang tersusun atas litologi batuan breksi vulkanik teralterasi, andesit, tufa teralterasi, breksi andesit teralterasi, dan breksi tufa teralterasi. Kedua periode tersebut dibatasi dengan perbedaan temperatur yang dilihat pada grafik landaian suhu dimana pada kedalaman 600 MD terjadi kenaikan temperatur dan juga didukung dengan data intensitas rekahan yang semakin banyak dengan ukuran yang lebih besar pada kedalaman 600m tersebut yang diduga karena pengaruh dari tektonik Pliosen Atas (Plio-Plistosen) (Van Bemmelen, 1949). Batuan pada sumur X secara umum memiliki tingkat alterasi yang beragam yakni mulai dari lemah sampai kuat, hal ini juga dipengaruhi oleh beberapa faktor dan salah satunya adalah intensitas rekahan pada batuan disetiap kedalamanya.

Berdasarkan kelimpahan mineral alterasi pada Sumur X yang telah diidentifikasi melalui analisis megaskopis dan analisis spectra, zona mineral alterasi pada Sumur X terbagi menjadi 3 yakni zona smektit – klorit yang berada pada kedalaman 24 s.d 600 MD, zona ilit – klorit pada kedalaman 600 s.d 700 MD, dan zona klorit - smektit pada kedalaman 700 s.d 821 MD (Tabel 4).

Zona smektit – klorit berada pada kedalaman 24 s.d 600 MD memiliki pH netral dan temperatur 200°C dengan kehadiran mineral sekunder lebih banyak mineral smektit daripada mineral kloritnya, zona ilit – klorit yang berada pada kedalaman 600 s.d 700 MD memiliki pH netral dan temperatur 200 s.d 300°C dan zona klorit - smektit pada kedalaman 700 s.d 821 MD memiliki pH netral dan temperatur 200 °C dengan kehadiran mineral klorit lebih dominan daripada mineral smektitnya.

Berdasarkan karakteristik tersebut dapat disimpulkan bahwa ketiga zona tersebut tergolong kedalam tipe alterasi sub-propilitik (Corbet and Leach, 1997) dan dapat bertindak sebagai zona penudung (*caprock*), merupakan zona yang tersusun dari mineral lempung tertentu yakni smektit, kaolinit, klorit, mineral silika berupa kuarsa dan kristobalit, iron oxide, kalsit, dan mineral sulfida. Namun, bila melihat pemunculan manifestasi air panas di daerah penelitian, maka diduga berasosiasi dengan adanya struktur geologi berupa zona lemah yang menyebabkan fluida dapat melewati zona tersebut sehingga muncul di permukaan. Berdasarkan hal tersebut, maka daerah penelitian berada di bagian zona *outflow*.

Tabel 4. Himpunan mineral alterasi, karakteristik pH dan temperatur setiap zona dan tipe alterasi

KEDALAMAN (M)	PERIODE VULKANIK	KOMPOSISI MINERAL ALTERASI	LANDAIAN SUHU	ZONA MINERAL ALTERASI	KARAKTERSITIK PH FLUIDA	TEMPERATUR MINERAL ALTERASI	TIPE ALTERASI
24 - 600 m	PLISTOSEN	Klorit, Smektit, Illit, Silika, Pirit, Kalsit, Oksida	12°C	Smektit - Klorit	Netral	200°C	SUB-PROPILITIK (Corbet and Leach, 1998)
600 - 700 m				Illit - Klorit	Netral	200 - 300°C	
700 - 823 m	PLIOSEN		58°C	Klorit - Smektit	Netral	200°C	

KESIMPULAN

Hasil identifikasi litologi dari hasil pemetaan permukaan dan sumur, litologi daerah penelitian merupakan produk dari dua periode vulkanik yakni periode Pliosen dan Plistosen yang terdiri atas batuan breksi tufa teralterasi, tufa teralterasi, breksi andesit teralterasi, endapan danau, dasit teralterasi, andesit, dan breksi vulkanik teralterasi. Sebagian besar batuan pada Sumur X mengalami peningkatan intensitas ubahan seiring dengan bertambahnya kedalaman kecuali pada kedalaman 700 s.d 821 MD mengalami penurunan kembali. Hal tersebut diduga karena adanya pengaruh dari struktur geologi yang terjadi pada tektonik Pliosen Atas sehingga menyebabkan kenaikan intesnsitas alterasi pada kedalaman 600 s.d 700 MD yakni pada periode Pliosen. Batuan pada Sumur X mengalami ubahan yang menghasilkan zona alterasi smektit – klorit pada kedalaman 24 s.d 600 MD, ilit – klorit pada kedalaman 600 s.d 700 MD dan klorit smektit pada kedalaman 700 s.d 821 MD. Zona alterasi tersebut tergolong kedalam tipe sub-propilitik dengan pH netral dan temperatur 200°C. Berdasarkan manifestasi panas bumi ,litologi, struktur geologi, dan tipe alterasinya, daerah penelitian termasuk ke dalam zona *outflow.*

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji dan Syukur kepada Tuhan yang Maha Esa yang telah memberikan berkat dan rahmat hingga penulis dapat menyelesaikan peneitian ini. Terimakasih kepada PSDMBP yang telah memfasilitasi penelitian dan memberikan izin untuk mempublikasi penelitian ini. Terimakasih kepada dosen pembimbing yang senantiasa membimbing dan mendukung penulis hingga penelitian ini selesai.

DAFTAR PUSTAKA

Corbett G and Leach T. 1997. Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration, and Mineralization, Manual Kursus Singkat Eksplorasi di Baguio, Philippines.

Bemmelen Van, R.W. 1949. The Geology of Indonesia. Martinus Nyhoff, Netherland: The Haque.

Browne, P. R. L. (1978). Hydrothermal alteration in active geothermal fields. Annual review of earth and planetary sciences, 6, 229-250.

Haty, I. P. & Nugroho, A. N., (2013). Geothermometer dan Heat Loss dalam Eksplorasi Geokimia Lapangan Panas bumi Daerah Cisukarame, Jawa Barat. National Journal Acreditation, 1(1).

Kusnama, A. E. & Hermanto, B., 1998. Peta Geologi Lembar Bogor, Bandung; Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Pirajno, F. (2009). Hidrotermal Processes and Mineral Systems. Springer, Australia

Reyes G Agnes. (1998) Petrology and Mineral Alteration in Hydrothermal Systems: from Diagenesis to Volcanic Catastrophes. United Nations University.

Sujatmiko & Santosa, S., 1992. Peta Geologi Lembar Leuwidamar, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Diterima	: 11 Juli 2022
Direvisi	: 6 Oktober 2022
Disetujui	: 30 November 2022

PERKIRAAN ULANG CADANGAN MUNGKIN PANAS BUMI TEMPERATUR MENENGAH DI INDONESIA

MEDIUM TEMPERATURE GEOTHERMAL POSSIBLE RESERVE REASSESSMENT IN INDONESIA

Husin Setia Nugraha, Rina Wahyuningsih, dan Tony Rahadinata
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
husin.nugraha@esdm.go.id

ABSTRAK

Informasi tentang nilai dan karakteristik sumber daya dan cadangan energi panas bumi yang akurat dibutuhkan dalam perencanaan kebijakan energi yang tepat dalam rangka optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi di Indonesia. Selain itu, perbedaan hasil perhitungan sumber daya dan/atau cadangan energi panas bumi yang dilakukan pengembang dan pemerintah menyebabkan perhitungan keekonomian proyek pengembangan panas bumi suatu area prospek juga berbeda. Studi ini melakukan perhitungan ulang sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah kelas cadangan mungkin dengan mengganti asumsi beberapa parameter dengan asumsi parameter *best practice* yang digunakan dalam beberapa literatur. Kelima parameter tersebut yaitu perhitungan termal yang terkandung dalam fluida, temperatur akhir, saturasi air, faktor konversi listrik dan faktor kapasitas pembangkit. Hasil perhitungan ulang pada studi ini menghasilkan nilai sumber daya panas bumi yang berbeda dari hasil perhitungan Badan Geologi. Persentase perbedaan perhitungan Badan Geologi dan studi ini terdapat indikasi korelasi kuat dengan temperatur reservoir ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 85%. Korelasi yang kuat ini mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematik, yang diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*). Hasil perhitungan ulang dengan menggunakan persamaan korelasi tersebut dengan *input* temperatur reservoir menghasilkan pengurangan nilai sumber daya panas bumi sebesar 27% atau sebesar 940 MW_e dari hasil perhitungan Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

Kata kunci: perhitungan sumber daya panas bumi, metode volumetrik perhitungan energi panas bumi, karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah

ABSTRACT

Accurate information about the value and characteristics of geothermal energy resources and reserves is needed in planning appropriate energy policies to optimize the utilization of geothermal resources in Indonesia. In addition, differences in the results of calculating geothermal energy resources and/or reserves by developers and the government cause the economic calculations of geothermal development projects in particular prospect area to also be different. This study performs a recalculation of geothermal medium temperature resources category by replacing the assumptions of several parameters with the assumptions of best practice parameters used in several literatures. The five parameters are thermal calculations contained in the fluid, final reservoir temperature, water saturation, electricity conversion factor and generating capacity factor. The results of this recalculation resulted in a geothermal resource value that was different from the results of the Geological Agency's calculations. The percentage difference between the calculations of the Geological Agency and this study

indicates a strong correlation with reservoir temperature as shown by the R^2 value of 85%. This strong correlation indicates that there is a systematic difference, which is suspected because in the Geology Agency's calculations it is assumed that there is a change in the water phase from the liquid phase to the vapor phase. The results of recalculation using the correlation equation with the reservoir temperature as an input resulted in the value of geothermal resources reduction by 27% or 940 MWe from the results of the Geological Agency's calculations. The recalculation result of medium temperature geothermal resources which previously reached 3,482 MW_e reduced to a total of 2,541 MW_e.

***Keywords**: geothermal resources calculation, volumetric method for geothermal energy calculation, medium temperature geothermal resources characteristics*

PENDAHULUAN

Metode penentuan sumber daya panas bumi berdasarkan parameter input yang digunakan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu metode berdasarkan data pada penentuan berdasarkan satu titik waktu (*single point*) dan berdasarkan sejarah (*historical*). Metode berdasarkan satu titik waktu tidak memerlukan data-data sejarah produksi sebagai parameter input perhitungan, contoh metodenya adalah perhitungan *Heat Flux*, *Planar Fracture*, *Magmatic Heat Budget*, *Total Well Flow*, *Volumetric*, *Mass-in-Place*, dan *Power Density*. Sedangkan metode historical artinya metode yang menggunakan data dan informasi sejarah produksi lapangan sebagai parameter input. Metode yang termasuk jenis ini antara lain *Decline Analysis, Lumped-Parameter* dan Simulasi Reservoir Numerik (Ciriaco et al., 2020).

Sampai saat ini, untuk metode volumetrik, ada 3 (tiga) jenis pendekatan yang dapat digunakan yaitu metode *United States Geological Survey* (USGS) untuk menghitung energi termal pada batuan, metode USGS untuk menghitung energi termal pada batuan dan fluida; dan metode *the Australian Geothermal Reporting Code Committee* (AGRCC) untuk menghitung energi termal pada batuan dan fluida (Ciriaco et al., 2020).

Di Indonesia, penentuan sumber daya dan/atau cadangan panas bumi berdasarkan pada beberapa Standard Nasional Indonesia (SNI) yang sudah ditetapkan. Ada tiga SNI yang bisa jadi acuan penentuan sumber daya dan/atau cadangan panas bumi ini, yaitu SNI 6169:2018 tentang metode estimasi potensi energi panas bumi, SNI 6482:2018 tentang parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi, dan SNI 6009:2017 tentang klasifikasi sumber daya dan cadangan energi panas bumi Indonesia (Badan Standardisasi, 2017, 2018a, 2018b).

Dua SNI merupakan SNI revisi dari SNI yang telah ditetapkan sebelumnya. SNI 6169:2018 tentang metode estimasi potensi energi panas bumi merupakan revisi SNI 13-6171-1999 dengan judul yang sama. Sedangkan SNI 6482:2018 tentang parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi adalah revisi SNI 13-6482-2000 tentang angka parameter dalam estimasi potensi energi panas bumi (Badan Standardisasi, 1999, 2000).

Metode volumetrik dan simulasi reservoir numerik merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk perhitungan sumber daya panas bumi. Metode volumetrik ini merupakan metode yang paling banyak digunakan pada tahap sebelum adanya pengeboran sumur karena kemudahan dan akurasinya dibandingkan metode-metode lain. Sedangkan pada tahap sesudah dilakukan pengeboran sumur, simulasi reservoir numerik lebih banyak digunakan karena memberikan data dan informasi yang lebih akurat dan terpercaya (Ciriaco et al., 2020).

Namun, di luar kemudahannya dalam penggunaannya, metode volumetrik ini juga memiliki ketidakpastian yang cukup

tinggi terutama dalam hal penentuan dimensi reservoir dan proporsi jumlah energi panas yang dapat dimanfaatkan (Ciriaco et al., 2020). Hal ini akan menyangkut ketidakpastian parameter-parameter yang dijadikan input dalam perhitungan. Ketidakpastian nilai input parameter untuk metode ini dapat dikurangi dengan menerapkan pendekatan perhitungan probabilistik menggunakan simulasi monte carlo.

Di Indonesia, ketidakpastian penggunaan metode volumetrik ini semakin bertambah besar untuk penentuan sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah. Hal ini dikarenakan SNI yang telah ditetapkan merupakan hasil analisis data dan informasi berdasarkan karakterisasi sumber daya panas bumi kategori temperatur tinggi. Sampai saat ini di Indonesia, belum ada sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah yang telah berproduksi.

Dalam Badan Standardisasi (1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b) dijelaskan bahwa sumber daya panas bumi dibedakan menjadi tiga kategori sumber daya berdasarkan perkiraan temperatur reservoir. Reservoir dengan temperatur di atas dengan 225°C diklasifikasikan sebagai sumber daya panas bumi temperatur tinggi, untuk reservoir dengan temperatur di bawah atau sama dengan 125°C digolongkan kepada sebagai sumber daya panas bumi temperatur rendah, sedangkan reservoir dengan temperatur di antara kedua interval temperatur tadi dikategorikan sebagai sumber daya panas bumi menengah. Di Indonesia, sumber daya temperatur tinggi dan menengah diasumsikan sebagai sumber daya energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik.

Berdasarkan studi yang dilakukan Direktorat Panas Bumi (2014) dinyatakan bahwa dari 269 titik sumber daya panas bumi yang teridentifikasi dan tersedia datanya pada tahun 2014, sebanyak 36% di antaranya termasuk sumber daya kategori temperatur tinggi, 43% kategori temperatur menengah dan persentase sisanya termasuk dalam kategori temperatur rendah. Dengan proporsi sumber daya panas bumi temperatur menengah yang cukup besar tersebut, maka nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah ini cukup signifikan mempengaruhi nilai total sumber daya energi panas bumi Indonesia.

Dalam rangkaian kegiatan pengusahaan pemanfaatan tidak langsung energi panas bumi, kegiatan akan dimulai dengan penetapan Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP). Sesuai dengan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 37 Tahun 2017 tentang Wilayah Kerja Panas Bumi Untuk Pemanfaatan Tidak Langsung bahwa area prospek dapat ditentukan sebagai WKP minimal harus dengan status Sumber Daya Kelas Mungkin (*Possible Reserve*) (Kementerian ESDM, 2017). Minimal Sumber Daya Kelas Mungkin ini yang akan digunakan oleh pemerintah dalam merencanakan pemanfaatan energi panas bumi.

Nilai sumber daya panas bumi ini akan digunakan oleh institusi pemerintah untuk merencanakan penggunaan energi baik pemanfaatannya secara independen ataupun sebagai bagian dari pemanfaatan energi terbarukan. Jadi perhitungan sumber daya energi panas bumi yang belum sesuai dengan karakteristik sumber daya energi sebenarnya akan menyebabkan perencanaan pemanfaatan energi kurang akurat.

Tujuan utama dari tulisan ini mendapatkan nilai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah untuk kelas cadangan mungkin yang lebih terpercaya sesuai dengan karakteristik sumber daya tersebut. Untuk mencapai tujuan tersebut akan dilakukan analisis terhadap nilai asumsi parameter-parameter yang kurang tepat apabila digunakan untuk menghitung sumber daya panas bumi temperatur menengah tersebut.

Selanjutnya, dilakukan studi literatur untuk mendapatkan nilai asumsi parameter yang lebih sesuai untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. Akhirnya, dilakukan perhitungan ulang sumber daya panas bumi menggunakan nilai asumsi parameter yang dianggap lebih tepat dan sesuai tersebut. Perhitungan ulang sumber daya panas bumi tersebut dilakukan pada beberapa area prospek dengan kategori temperatur menengah dengan status kelas cadangan mungkin.

METODOLOGI

Metode yang diterapkan pada penelitian ini dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu analisis parameter yang digunakan sebagai input perhitungan sumber daya panas bumi dan perhitungan ulang sumber daya panas bumi untuk kelas cadangan mungkin dengan menggunakan metode volumetrik.

Tiga belas parameter dalam perhitungan sumber daya panas bumi dengan metode volumetrik di analisis kesesuaian nilainya dengan karakter sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia. Analisis dilakukan terhadap penerapan metode dan penggunaan nilai asumsi parameter perhitungan sumber daya panas bumi yang dilakukan oleh Badan Geologi. Nilai asumsi parameter tersebut yang dibandingkan dengan nilai asumsi parameter *best practices* yang diterapkan pada referensi literatur yang ada.

Untuk mengurangi ketidakpastian nilai input parameter dalam perhitungan ulang sumber daya panas bumi untuk kelas cadangan mungkin ini, simulasi monte carlo akan diterapkan dengan menggunakan aplikasi *add-ins* excel @risk.

A. Analisis Parameter Input Perhitungan Sumber Daya

Parameter input perhitungan sumber daya panas bumi dapat dikategorikan sebagai parameter yang diperkirakan dari hasil survei lapangan, parameter hasil perhitungan menggunakan formula tertentu, dan parameter yang diasumsikan. Parameter yang merupakan perkiraan dari analisis dan interpretasi hasil survei lapangan antara lain Luas Daerah Prospek (*A*), Tebal Reservoir (*h*), dan Temperatur Reservoir (*T*). Parameter input yang merupakan hasil perhitungan adalah Energi Dalam (*U*) dan Densitas Fluida (ρ_L) yang ditentukan menggunakan formula tertentu atau menggunakan *steam table*. Sedangkan sisa nilai parameter input yang lain merupakan hasil dari asumsi dari data/informasi hasil pengukuran lapangan yang ada atau studi literatur.

A.1. Luas Daerah Panas Bumi Prospek (A)

Dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 dijelaskan bahwa penentuan luas dan ketebalan reservoir serta parameter fisik batuan dan fluida diperkirakan didasarkan hasil survei detail terpadu (Badan Standardisasi, 2000, 2018b). Sedangkan SNI 6009:2017 lebih menjelaskan bahwa luas ditentukan dari kompilasi data-data seperti lokasi manifestasi, tahanan jenis, struktur geologi dan data landaian temperatur jika ada. Data tersebut kemudian direpresentasikan dalam peta dengan skala minimal 1:50.000 (Badan Standardisasi, 2017).

Bagaimana cara menarik batas Luas Daerah Prospek panas bumi (*A*) tidak dijelaskan dalam SNI-SNI yang ada. Badan Geologi menarik batas *A* berdasarkan studi integrasi tiga survei lapangan yaitu survei geologi, geokimia, dan geofisika. Ada tiga batas area yang ditentukan yaitu batas area minimum, maksimum dan *most-likely*. Batas area minimum digambarkan sebagai area di mana anomali terjadi untuk ketiga jenis survei tersebut. Sedangkan batas area *most-likely*, didefinisikan area di mana anomali nilai gaya berat dan nilai resistivitas dari survei magnetotellurik (MT). Untuk batas area maksimum diambil dari area anomali survei magnetotellurik (MT).

The Australian Geothermal Reporting Code Committee atau AGRCC (2010) menggunakan nilai temperatur *cut-off*

untuk dapat mendelineasi batas bawah volume reservoir yang akan digunakan dalam perhitungan sumber daya. Temperatur *cut-off* sendiri definisikan sebagai temperatur minimum di mana pada temperatur tersebut fluida pada sumur dapat mengalir secara alami untuk sistem panas bumi konvektif atau temperatur fluida minimum yang dibutuhkan yang ekonomis untuk sistem panas bumi yang membutuhkan pompa untuk memindahkan fluida ke permukaan.

A.2. Tebal Reservoir (h)

Berdasarkan Badan Standardisasi (2017), Tebal Reservoir (h) ditentukan berdasarkan kedalaman maksimal 3.000 meter dikurangi kedalaman puncak reservoir yang diperkirakan dari model geologi dan geofisika serta data sumur eksplorasi jika tersedia. Ketebalan reservoir dapat ditentukan dimulai kedalaman dari bagian terbawah batuan penudung (*cap rocks*) atau puncak reservoir sampai dengan kedalaman batuan dasar (*basement*) bila diketahui.

Jika kedalaman batuan dasar tidak diketahui maka total kedalaman akan diasumsikan dari total kedalaman pengeboran sumur yang dianggap masih komersial ditambah kedalaman yang masih terpengaruh produksi sumur tersebut. Untuk hal tersebut, SNI 6009:2017 mengasumsikan kedalamannya adalah 3.000 meter. Dalam asumsi perhitungan keekonomian panas bumi, Danar (2010) mengasumsikan bahwa sumur eksplorasi panas bumi memiliki kedalaman 2.500 meter. Lebih lanjut, Lawless (2007) memberikan gambaran bahwa nilai 500-meter tersebut merupakan tambahan kedalaman sebagai area yang masih dalam jangkauan radius vertikal pengurasan sumur.

Dalam prakteknya, penentuan ketebalan ini akan menggunakan data dan informasi hasil interpretasi pemodelan magnetotellurik (MT) dan/atau hasil pengeboran landaian temperatur jika ada. Dalam SNI 6009:2017, apabila data dan informasi tentang ketebalan reservoir ini tidak diketahui maka untuk perhitungan sumber daya dapat diasumsikan bahwa ketebalan reservoirnya 1.000 meter.

A.3. Temperatur Reservoir (T)

Temperatur reservoir (T) maksimum yang dimasukkan ke dalam kategori sumber daya panas bumi temperatur menengah adalah 225°C. Nilai untuk Temperatur Awal (T_i) yang akan dipergunakan dalam perhitungan sumber daya panas bumi berasal dari hasil perhitungan geotermometer. Sedangkan Temperatur Akhir (T_f) merupakan temperatur paling rendah yang masih memiliki nilai keekonomian (Ciriaco et al., 2020). SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 menegaskan bahwa penentuan nilai T_f selain aspek ekonomi juga harus memperhatikan aspek teknologi yang ada (Badan Standardisasi, 1999, 2018b).

SNI 6009:2017 tidak menentukan berapa nilai T_f yang dipergunakan untuk menghitung nilai sumber daya. Namun dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018, nilai T_f ditentukan sebesar 120°C untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. West Japan Engineering Consultant (2017) menggunakan nilai 130°C sebagai nilai T_f atau setara dengan nilai 0,3 MPaA untuk sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah.

Kajian dari Quinlivan (2009) tentang harga biaya produksi listrik dari panas bumi untuk Selandia Baru, sistem panas bumi temperatur menengah diasumsikan memiliki temperatur reservoir maksimum 230°C dan T_f diasumsikan sebesar 134°C, dengan pertimbangan nilai tersebut memiliki nilai *Silica Saturation Index* (SSI) yang masih bisa ditolerir. Dalam studi ini, nilai T_f diambil 120°C selain sesuai dengan SNI juga untuk mengakomodasi sumber daya panas bumi yang memiliki temperatur reservoir pada nilai ambang batas sumber daya temperatur menengah yaitu pada 125°C.

A.4. Saturasi (S)

Saturasi yang menjadi input dalam perhitungan sumber daya yaitu saturasi dalam fasa cair dan saturasi dalam fasa uap. Saturasi (*S*) adalah nilai perbandingan antara volume fluida dalam pori-pori batuan dengan volume pori-pori batuan. Dalam SNI 13-6171-1999 diasumsikan bahwa Saturasi air 100 % karena fluida dalam reservoir dianggap jenuh air. Tidak dijelaskan lebih lanjut tentang apakah diasumsikan akan terjadi perubahan fasa atau tidak. Jadi dapat diasumsikan bahwa selama proses produksi tidak terjadi perubahan fasa (Badan Standardisasi, 1999). Namun pada SNI 6482:2018, nilai saturasi air untuk sumber daya temperatur menengah diasumsikan sebesar 80% sehingga dapat diartikan bahwa akan terjadi perubahan fasa cair ke fasa uap (Badan Standardisasi, 2018b).

Hal tersebut sudah sesuai dengan apa yang dinyatakan oleh Williams (2004) dan Kaya et al. (2011) bahwa sistem panas bumi dengan reservoir yang bertemperatur di bawah 220°C dikategorikan sebagai Sistem *Hot-Water*. Nilai Saturasi Fasa Cair Awal (S_{Li}) dan Saturasi Fasa Cair Akhir (S_{Lf}) diasumsikan sebesar 100% pada fasa cair. Hal ini berarti bahwa fluida selama perjalanan dari dalam reservoir sampai ke permukaan tidak terjadi perubahan fasa cair menjadi fasa uap. Jadi untuk studi ini, digunakan nilai saturasi fasa cair sebesar 100% untuk awal dan akhir (S_{Li} = S_{Lf} = 100%).

A.5. Densitas Fluida (ρ_f) dan Energi Dalam (U)

Saptadji (2001) mendefinisikan Densitas Fluida (ρ_f) nilai perbandingan antara massa dengan volume dari fasa fluida tersebut. Nilai densitas fluida ini tergantung nilai tekanan dan temperatur. Jika menggunakan *steam table* nilainya kebalikan dari volume spesifik fluida pada tekanan dan temperatur tertentu. Sedangkan Energi Dalam (*U*) didefinisikan sebagai jumlah energi termal yang dikandung suatu fasa fluida yang tergantung pada tekanan dan temperatur.

Densitas fluida baik Densitas Air Fasa Cair atau fasa *liquid* (ρ_L) maupun Densitas Air Fasa Uap atau fasa *vapor* (ρ_v) dan Energi Dalam (*U*) dapat ditentukan menggunakan formula atau menggunakan *steam table*. Parameter input yang dibutuhkan untuk menentukan *ρ* dan *U* ini adalah temperatur reservoir. Jika ingin menggunakan *steam table*, maka *steam table* dari Rogers & Mayhew (1995) paling sering digunakan. Sedangkan jika menggunakan formula, pilihannya adalah formula dari Tortike & Ali (1989) atau Ashat & Saptadji (2001) dapat digunakan.

Berikut adalah formula perhitungan untuk *ρ* dan *U* dari Ashat & Saptadji (2001) yang akan digunakan dalam studi ini.

$$\rho_f = -2.23821695 \,.\, 10^{-28} \,.\, T^{12} + 4{,}94472419 \,.\, 10^{-23} \,.\, T^{10} - 1{,}48693151 \,.\, 10^{-18} \,.\, T^{8} - 4{,}68969075 \,.\, 10^{-13} \,.\, T^{6} + 4{,}76629260 \,.\, 10^{-8} \,.\, T^{4} - 452735.43928009 \,.\, 10^{-8} \,.\, T^{2} + 999.39961079 \quad \ldots\ldots\ldots (1)$$

$$U_f = 4{,}19 \,.\, 10^{-12} \,.\, T^{6} - 4{,}096153 \,.\, 10^{-9} \,.\, T^{5} + 1{,}52643267 \,.\, 10^{-6} \,.\, T^{4} - 2{,}63691597 \,.\, 10^{-4} \,.\, T^{3} + 2{,}15772134 \,.\, 10^{-2} \,.\, T^{2} + 3{,}45058994 \,.\, T + 7{,}05389383 \quad \ldots\ldots\ldots (2)$$

Dengan *T* adalah temperatur fluida fasa cair. Nilai *ρ* dan *U* untuk fasa uap tidak digunakan karena asumsi nilai S_w 100%.

A.6. Porositas Batuan Reservoir (ϕ)

Porositas ialah nilai perbandingan volume pori-pori pada batuan dengan volume keseluruhan (*bulk*) dari batuan. Porositas batuan reservoir merupakan parameter yang biasanya diasumsikan dalam perhitungan. Asumsi berdasarkan rata-rata nilai porositas tersebut pada beberapa lapangan seperti dijelaskan pada Badan Standardisasi (1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b).

Dalam standar tersebut, nilai porositas diasumsikan sama untuk temperatur tinggi

maupun menengah yaitu sebesar 10%. Nilai tersebut juga merupakan nilai yang digunakan sebagai nilai *most-likely* perhitungan sumber daya panas bumi untuk penyusunan review master plan panas bumi, sedangkan nilai minimum dan maksimumnya sebesar 5% dan 10% (West Japan Engineering Consultant, 2017).

Porositas untuk sistem panas bumi dua fasa dominasi air memiliki nilai antara 15 - 30% (Kaya, Zarrouk, and O'Sullivan 2011). Sedangkan, sistem panas bumi temperatur tinggi akan memiliki nilai porositas yang lebih kecil. Jadi sistem panas bumi temperatur menengah atau sistem *hot-water* diasumsikan memiliki nilai porositas lebih tinggi. Jadi nilai 10% merupakan nilai yang cukup moderat untuk dapat dipergunakan dalam perhitungan. Untuk perhitungan dalam studi ini, nilai minimum, maksimum dan *most-likely* masing-masing di 5%; 15%; dan 10%. Dengan asumsi bentuk distribusi datanya ialah segitiga.

A.7. Kapasitas Panas Batuan (c_r)

Definisi Kapasitas Panas Batuan berdasarkan SNI 13-6171-1999 dan SNI 6169:2018 adalah (C_r) adalah besarnya banyaknya termal yang diperlukan untuk menaikkan temperatur batuan satuan massa sebesar 1°C. Definisi ini sesuai yang diuraikan oleh Saptadji (2001). Untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah, kedua SNI menetapkan bahwa asumsi nilai C_r sebesar 0,9 kJ/kg°C dengan interval nilai dinyatakan dalam Saptadji (2001) antara 0,85 – 0,95 kJ/kg°C. Untuk perhitungan, asumsi nilai C_r memiliki data jenis distribusi segitiga dengan nilai minimum, maksimum dan *most-likely* masing-masing di 0,85 kJ/kg°C; 0,95 kJ/kg°C; dan 0,9 kJ/kg°C.

A.8. Densitas Batuan (ρ_r)

Densitas Batuan (ρ_r) merupakan nilai perbandingan antara berat dan volume batuan. Badan Standardisasi (1999) menentukan untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah nilainya adalah 2.600 kg/m^3.

Sedangkan West Japan Engineering Consultant (2017) mengambil nilai minimum, maksimum dan *most-likely* sebesar 2.400 kg/m^3, 2.600 kg/m^3 dan 2.500 kg/m^3 tanpa membedakan perbedaan temperatur reservoir. Untuk perhitungan dalam studi ini, dengan asumsi distribusi segitiga diambil nilai minimum, maksimum dan *most-likely* sebesar 2.500 kg/m^3, 2.700 kg/m^3 dan 2.600 kg/m^3.

A.9. Faktor Perolehan (R_f)

Faktor Perolehan (R_f) merupakan nilai perbandingan asumsi besaran energi panas maksimum yang dapat digunakan dengan total besaran energi panas yang dikandung dalam reservoir. Untuk perhitungan sumber daya, dalam SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 disebutkan bahwa nilai R_f ini menggunakan asumsi, namun tidak dijelaskan asumsi apa sebaiknya yang digunakan. Mulai dari tahun 2010-an, Badan Geologi menggunakan nilai R_f lebih kecil dari sebelumnya yaitu sebesar 25% dengan nilai sebelumnya sebesar 50%.

Menurut Williams et al. (2008), nilai R_f yang sesuai dengan yang ada saat itu adalah 5 – 20% dengan nilai rata-rata mendekati 10%. Dijelaskan bahwa nilai sebelumnya sebesar 25% yang berasal dari Lapangan Geysers dengan reservoir dua fasa dominasi uap, yang merupakan satu-satunya lapangan yang berproduksi pada saat itu. Lebih lanjut Quinao & Zarrouk (2014) menjelaskan bahwa untuk sistem *hot-water,* yang identik sumber daya panas bumi temperatur menengah, memiliki nilai R_f secara teori bisa mencapai 50% namun secara real nilainya tidak akan lebih dari 25%. Jadi nilai R_f sebesar 25% digunakan dalam perhitungan ulang sumber daya panas bumi temperatur menengah dalam studi ini.

A.10. Lama Waktu Pembangkitan Listrik (t)

Lama Waktu Pembangkitan Listrik (t) adalah asumsi durasi waktu suatu lapangan panas bumi dapat menghasilkan listrik dengan mempertimbangkan

keteknikan, keekonomian dan lingkungan. Menurut Lawless (2007), nilai *t* ini dapat diambil sampai dengan 50 tahun dengan didasarkan bahwa Lapangan Wairakei di Selandia Baru telah beroperasi lebih dari 50 tahun. Namun pengambilan nilai *t* harus memperhatikan juga aspek-aspek lain seperti regulasi dan teknologi yang dipergunakan.

SNI 13-6482-2000 dan SNI 6482:2018 menggunakan nilai 30 tahun sebagai standar nilai yang dipergunakan dalam perhitungan sumber daya panas bumi. Dari sisi regulasi, berdasarkan Undang-undang Nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi menyatakan bahwa masa pemanfaatan tidak langsung energi panas bumi paling lama 30 tahun. Meskipun, durasi pemanfaatan tersebut dapat diperpanjang (Pemerintah Indonesia, 2014). Namun untuk perhitungan sumber daya biasanya durasi yang dipakai adalah durasi tanpa perpanjangan.

A.11. Faktor Konversi Listrik (η)

Faktor Konversi Listrik (*η*) adalah nilai persentase atau fraksi yang dipergunakan untuk mengonversi dari satuan energi panas (MW_{th}) ke satuan energi listrik (MW_e). SNI 13-6171-1999 dan SNI 13-6482-2000 asumsi nilai *η* adalah 10%, ini artinya hanya 10% dari nilai energi panas yang dikandung dapat dikonversikan menjadi energi listrik (Badan Standardisasi, 1999, 2000). Kedua SNI di atas, tidak membedakan nilai ini untuk sumber daya panas bumi bertemperatur tinggi, menengah atau pun rendah. Sedangkan pada SNI terbaru yaitu SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018, nilai faktor konversi ini dibedakan berdasarkan temperatur sumber daya panas bumi. Untuk sumber daya panas bumi temperatur tinggi dan menengah nilai faktor konversi listrik adalah sebesar 10%, sedangkan untuk temperatur rendah sebesar 7% (Badan standardisasi, 2018a, 2018b).

Sebagaimana diketahui bahwa untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah akan menggunakan pembangkit listrik dengan sistem binari yang memiliki teknologi yang berbeda dengan sistem konvensional, karena hal tersebut, akan diambil nilai *η* dari formula dari Zarrouk & Moon (2014) dibawah ini.

$$\eta = 6{,}9681\ ln(T_i)\ -\ 29{,}713 \quad \text{.....(3)}$$

Dengan nilai
η : Faktor Konversi Listrik
T_i : Temperatur Reservoir Awal

Formula tersebut mengaitkan nilai faktor konversi listrik (*η*) dengan nilai temperature reservoir awal (T_i), sehingga nilainya tidak tetap, tetapi akan berbeda-beda tergantung pada nilai temperatur reservoir awal tersebut.

A.12. Faktor Kapasitas Pembangkit (L)

Faktor Kapasitas Pembangkit (*L*) merupakan perbandingan waktu suatu pembangkit listrik dapat menghasilkan listrik dengan total waktu seharusnya pembangkit listrik menghasilkan listrik. Perbedaan tersebut mungkin karena pembangkit tersebut membutuhkan perawatan atau perbaikan dalam kurun waktu tertentu. Dalam SNI 13-6171-1999, SNI 13-6482-2000, SNI 6009:2017, SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018, nilai *F* ini tidak digunakan sehingga diasumsikan bahwa nilainya tersebut adalah sebesar 100%.

Pembangkit listrik pasti memerlukan pemeliharaan dan perbaikan baik besar (*major overhaul*) maupun kecil (*minor overhaul*). Biasanya, o*verhaul* kecil dilakukan setiap tahun, sedangkan *overhaul* besar dilakukan antara 2-4 tahun sekali tergantung pada kondisi pembangkit. Proses *minor overhaul* minor bisa berlangsung dari beberapa hari sampai satu minggu. Sedangkan *major overhaul* bisa berlangsung beberapa minggu. Jadi bisa dipastikan bahwa nilai *F* tidak mungkin 100%. Maka untuk studi ini, nilai *F* yang digunakan diambil dari hasil studi yang dilakukan oleh Zarrouk & Moon (2014) yaitu sebesar 92,7% untuk pembangkit sistem binari.

B. Perhitungan Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah

Pada tahap kedua ini, dengan menggunakan nilai asumsi parameter yang telah disesuaikan pada tahap pertama (Bagian A) akan dilakukan perhitungan ulang nilai sumber daya pada 19 (Sembilan belas) prospek panas bumi yang data parameter input untuk perhitungan sumber daya tersedia lengkap. Prospek ini dikategorikan sumber daya temperatur menengah dengan kelas cadangan mungkin dan telah dilakukan perhitungan oleh Badan Geologi. Sedangkan titik potensi sisanya hanya tersedia data perkiraan temperatur reservoir.

Perhitungan sumber daya prospek akan menggunakan Persamaan 9, yang telah memasukkan parameter tambahan yaitu Faktor Kapasitas Pembangkit (*L*).

$$H_{el} = \frac{H_{th}\ x\ R_f\ x\ \eta_c}{L\ x\ t\ x\ 1.000} \quad \text{.....(4)}$$

dengan

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad \text{.....(5)}$$

dengan

$$H_{ei} = A\ .\ h\ .\ [(\ 1 - \phi\ ).\ \rho_r\ .\ c_r\ .\ T_i + \phi\ .(\ \rho_L\ .\ U_L\ .\ S_L + \rho_v\ .\ U_v\ .\ S_v)] \quad \text{.....(6)}$$

$$H_{ef} = A\ .\ h\ .\ [(\ 1 - \phi\ ).\ \rho_r\ .\ c_r\ .\ T_f + \phi\ .(\ \rho_L\ .\ U_L\ .\ S_L + \rho_v\ .\ U_v\ .\ S_v)] \quad \text{.....(7)}$$

dengan

$$S_T = S_L + S_v$$

Karena untuk sistem *hot-water*, nilai S_L *=1* atau S_v *= 0*, maka persamaan 6 dan 7 menjadi lebih sederhana seperti berikut ini:

$$H_{ei} = A\ .\ h\ .\ [(\ 1 - \phi\ ).\ \rho_r\ .\ c_r\ .\ T_i + \phi\ .\ \rho_L\ .\ U_L\ ] \quad \text{.....(8)}$$

$$H_{ef} = A\ .\ h\ .\ [(\ 1 - \phi\ ).\ \rho_r\ .\ c_r\ .\ T_f + \phi\ .\ \rho_L\ .\ U_L] \quad \text{.....(9)}$$

keterangan:

H_{el} : sumber daya listrik panas bumi (MW_e)
H_{th} : energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan (kJ)
R_f : faktor perolehan (fraksi)
η_c : faktor konversi listrik (fraksi)
L : faktor kapasitas pembangkit (fraksi)
t : lama waktu (umur) pembangkitan listrik (detik)
H_{ei} : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan awal (kJ)
H_{ef} : kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan akhir (kJ)
A : luas daerah panas bumi prospek (km^2)
h : tebal reservoir (m)
ϕ : porositas batuan reservoir (fraksi)
c_r : kapasitas panas batuan reservoir (kJ/kg°C)
T_i : temperatur reservoir awal (°C)
T_f : temperatur reservoir akhir (°C)
ρ_r : densitas batuan (kg/m^3)
ρ_L : densitas air fasa cair – *liquid* (kg/m^3)
U_L : energi dalam air fasa cair – *liquid* (kJ/kg)
S_L : saturasi air fasa cair – *liquid* (fraksi)
ρ_v : densitas air fasa uap – *vapor* (kg/m^3)
U_v : energi dalam air fasa uap – *vapor* (kJ/kg)
S_v : saturasi air fasa uap – *vapur* (fraksi)

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Perbedaan Perhitungan

Secara prinsip perbedaan penentuan kelas cadangan dan kelas sumber daya terletak pada kelayakan suatu lapangan untuk dikembangkan dilihat dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Kelas cadangan dianggap telah memiliki kelayakan suatu lapangan untuk dikembangkan berdasarkan tiga aspek tersebut (Lawless, 2007 dan Badan Standardisasi Nasional, 1999, 2000, 2017, 2018a, 2018b). Secara teknis, ada tiga kriteria suatu prospek panas bumi dapat dikembangkan lebih lanjut yaitu adanya fluida yang cukup, permeabilitas dan temperatur yang layak (Saptadji, 2001). Berdasarkan hal tersebut, maka sumber daya kelas cadangan mungkin dalam SNI 6009:2017 sebenarnya belum dapat dikategorikan dalam kelas

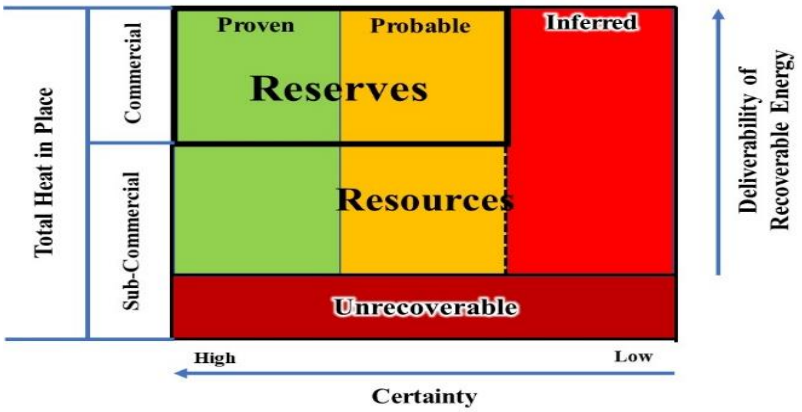
cadangan, namun baru dapat dikategorikan sebagai kelas sumber daya. Hal ini karena belum adanya data dan informasi dari kegiatan pengeboran yang cukup untuk memastikan adanya fluida, permeabilitas dan temperatur yang layak untuk dikembangkan.

Cadangan Mungkin (*possible reserves*) menurut SNI 6009:2017 akan menjadi kelas sumber daya pada klasifikasi sumber daya yang diusulkan Lawless (2007) untuk standar pelaporan cadangan dan sumber daya panas bumi Australia sebagaimana ditunjukkan Gambar 1. Lawless (2007) membagi cadangan menjadi *proven* dan *probable*, sedangkan sumber daya dibagi menjadi *proven, probable* dan *inferred*. Masih menurut Lawless (2007), jika menghitung sumber daya panas bumi menggunakan simulasi monte carlo maka hasil P50 merupakan penjumlahan nilai *proven* ditambah *probable*.

Jadi jika hasil perhitungan dengan menggunakan simulasi monte carlo menghasilkan nilai P10 dan P50, maka nilai *proven* adalah nilai P10, sedangkan nilai *probable* adalah nilai P50 dikurangi dengan nilai P10.

A.1. Perbedaan Perhitungan Badan Geologi dan SNI

Terdapat perbedaan parameter dan nilainya dalam metode estimasi sumber daya panas bumi antara yang tercantum dalam, SNI 6009:2017, SNI 6169:2018, dan SNI 6482:2018 dan yang dipergunakan oleh Badan Geologi untuk sumber daya panas bumi temperatur menengah. Tiga perbedaannya utama antara lain parameter energi termal yang terkandung dalam fluida, asumsi nilai temperatur dan saturasi fluida. Tabel 1 menunjukkan perbedaan parameter dan asumsi perhitungan Badan Geologi, perhitungan berdasarkan SNI 6169:2018 dan SNI 6482:2018 dan perhitungan pada studi ini selengkapnya.



Gambar 1. Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Menurut Lawless (2007)

Tabel 1. Perbedaan parameter dan asumsi perhitungan Badan Geologi, SNI dan perhitungan pada studi

No	Parameter	SNI	BG	Studi ini
1.	Energi termal yang terkandung dalam fluida	Energi Dalam	Entalpi	Energi Dalam
2.	Temperatur Akhir	120°C	Berbeda-beda tergantung Temperatur Awal	120°C
3.	Perbedaan Saturasi Air Awal dan Akhir	Nilai saturasi Awal dan Akhir berbeda (S_{Wi} = 100% & S_{Wf} =80%)	Nilai saturasi Awal dan Akhir berbeda	Tetap (100%)
4.	Faktor Konversi Listrik	10%	Berbeda-beda	Menggunakan persamaan 3
5.	Faktor Kapasitas Pembangkit	Tidak ada (asumsi 100%)	Tidak ada (asumsi 100%)	92,7%

Perbedaan pertama adalah parameter energi termal dalam fluida. Badan Geologi mempergunakan nilai entalpi (*H*) sedangkan SNI 6169:2018 mempergunakan nilai Energi Dalam (*U*). Penggunaan nilai entalpi ini sama dengan yang digunakan oleh standar pelaporan sumber daya panas bumi Australia dari AGRCC (2010). Penggunaan nilai Energi Dalam seperti yang digunakan dalam SNI 6169:2018 sudah sesuai dengan saran dari Ciriaco et al. (2020). Hal ini dikarenakan Energi Dalam lebih sesuai untuk keadaan statis seperti lapangan yang belum diproduksikan. Entalpi sendiri merupakan penjumlahan dari Energi Dalam (*U*) dengan energi yang dihasilkan oleh kerja karena adanya tekanan seperti digambarkan dalam Persamaan 10.

$$H_L = U_L + \frac{P}{V_L} \quad \text{.....(10)}$$

dengan

H_L : entalpi fasa cair (kJ/kg)
P : tekanan (bar)
U_L : energi dalam (kJ/kg)
V_L : volume spesifik (m^3/kg)

Perbedaan kedua ialah nilai asumsi parameter Temperatur Akhir (T_f). SNI dalam Badan Standarisasi (1999, 2000, 2018a, 2018b) menetapkan nilai sebesar 120ºC, sedangkan Badan Geologi menggunakan nilai yang berbeda-beda antara 90ºC sampai dengan 150ºC tergantung pada nilai Temperatur Awal (T_i) suatu sumber daya panas bumi.

Perbedaan ketiga ialah nilai asumsi parameter Saturasi Air (S_w). SNI 13-6171-1999 dan SNI 13-6482-2000 menetapkan asumsi nilai S_w dari awal sampai akhir adalah 100%, jadi tidak terjadi perubahan fasa pada air dari fasa *liquid* ke fasa *vapor*. Asumsi dari SNI ini bahwa tidak terjadi perubahan fasa pada fluida sudah sesuai dengan hasil studi dari Kaya et al. (2011) yang menyatakan bahwa sistem yang bertemperatur di bawah <220ºC dikategorikan sebagai Sistem *Hot-Water*. Sedangkan pada SNI terbaru yaitu SNI 6482:2018, menetapkan asumsi nilai S_w untuk sumber daya temperatur menengah diasumsikan sebesar 80% (Badan Standardisasi, 2018b). Jadi pada SNI terbaru dan perhitungan Badan Geologi mengasumsikan terjadi perubahan fasa dari awal sampai akhir produksi sehingga nilai S_w awal dan S_w akhir berbeda.

A.2. Perbedaan Perhitungan SNI 6169:2018 *dan Metode Lain*

Perbedaan lain antara SNI 6169:2018 dengan sistem perhitungan volumetrik yang lain adalah Faktor Kapasitas Pembangkit (*L*). Pada SNI tidak menggunakan nilai parameter *L* dalam penghitungannya sama dengan Saptadji (2001), Sarmiento & Bjornsson (2007) dan Sarmiento et al. (2013). Sedangkan sistem perhitungan volumetrik yang menggunakan nilai *L* antara lain Lawless (2007), Lawless et al. (2010), Quinao & Zarrouk (2014); Zarrouk & Simiyu (2013).

A.3. Contoh Perhitungan Badan Geologi dan Studi Ini

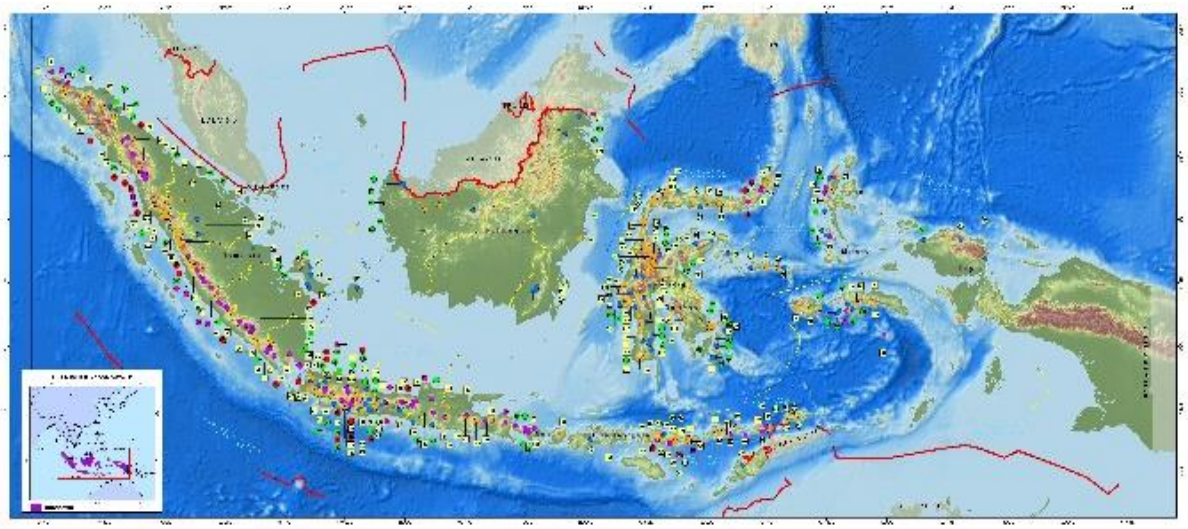
Sebagai contoh perhitungan sumber daya panas bumi pada studi ini, kami mengambil Area Prospek Panas Bumi Gunung Pandan yang berada di Provinsi Jawa Timur. Tabel 2 menunjukkan perbedaan nilai parameter perhitungan pada studi ini dan parameter yang digunakan Badan Geologi. Hasil perhitungan ulang sumber daya panas bumi *most-likely* (P50) untuk area tersebut sebesar 23,3 MW_e, sedangkan hasil perhitungan oleh Badan Geologi sebesar 30 MW_e. Jadi hasil perhitungan studi ini mengurangi nilai sumber daya panas bumi sebesar 22% hasil perhitungan Badan Geologi.

B. Struktur Data Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah

Saat ini terdapat 131 titik potensi yang memiliki sumber daya panas bumi kelas cadangan mungkin dari total 356 titik potensi (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2022) sebagaimana terlihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Contoh nilai parameter-parameter perhitungan Badan Geologi dan perhitungan pada studi ini

No	Parameter	Unit	Studi Ini				Badan Geologi			
			Min	Most	Max	Fix	Min	Most	Max	Fix
1	Luas Area (A)	Km^2	12	15	18		12	15	18	
2	Ketebalan (h)	m	1.000	1.000	1.500		1.000	1.000	1.500	
3	Porositas (ϕ)	%	5	10	15		5	10	15	
4	Densitas Batuan (ρ_r)	kg/m^3	2.000	2.500	2.700		2.400	2.500	2.500	
5	Kapasitas Panas Batuan (c_r)	kJ/kg°C	0,8	0,9	1		0,8	1	1	
6	Temperatur Awal (T_i)	°C	150	165	170		150	165	170	
7	Temperatur Akhir (T_f)	°C				120	120	120	150	
8	Saturasi Air Awal (S_{wi})	%				100	80	100	100	
9	Saturasi Air akhir (S_{wf})	%				100	30	50	50	
10	Faktor perolehan (R_f)	%				25				25
11	Faktor konversi listrik (η_c)	%				5,7				7
12	Faktor Kapasitas Pembangkit (L)	%				92.7				-
13	Lama pembangkitan listrik (t)	tahun				30				30
14	Random Number (N)	kali				10.000				10.000
	Sumber Daya Panas Bumi	**MW_e**	**17,2**	**23,3**	**30,4**		**20**	**30**	**41**	

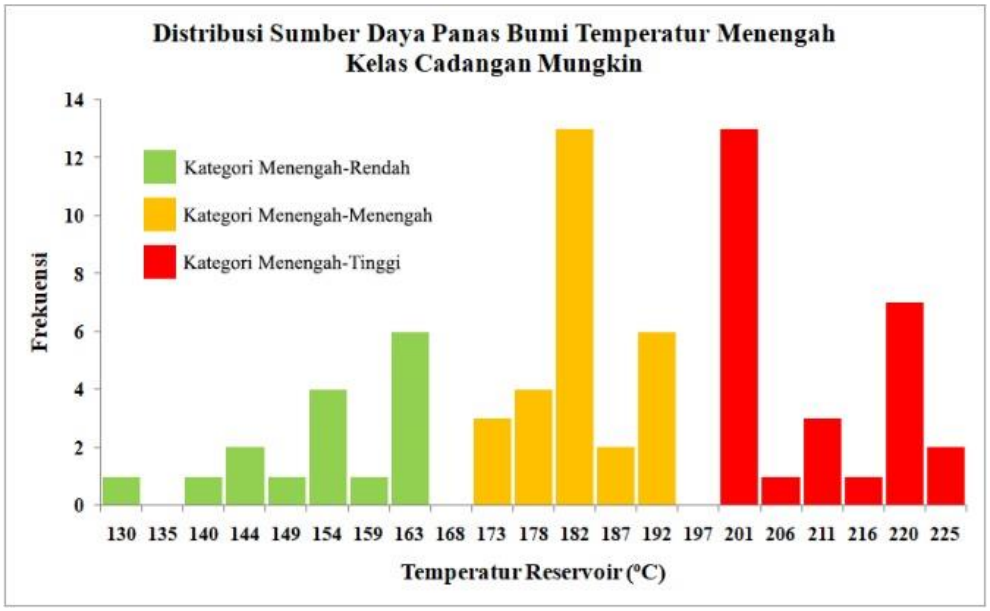


Gambar 2. Peta Distribusi dan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, 2022)

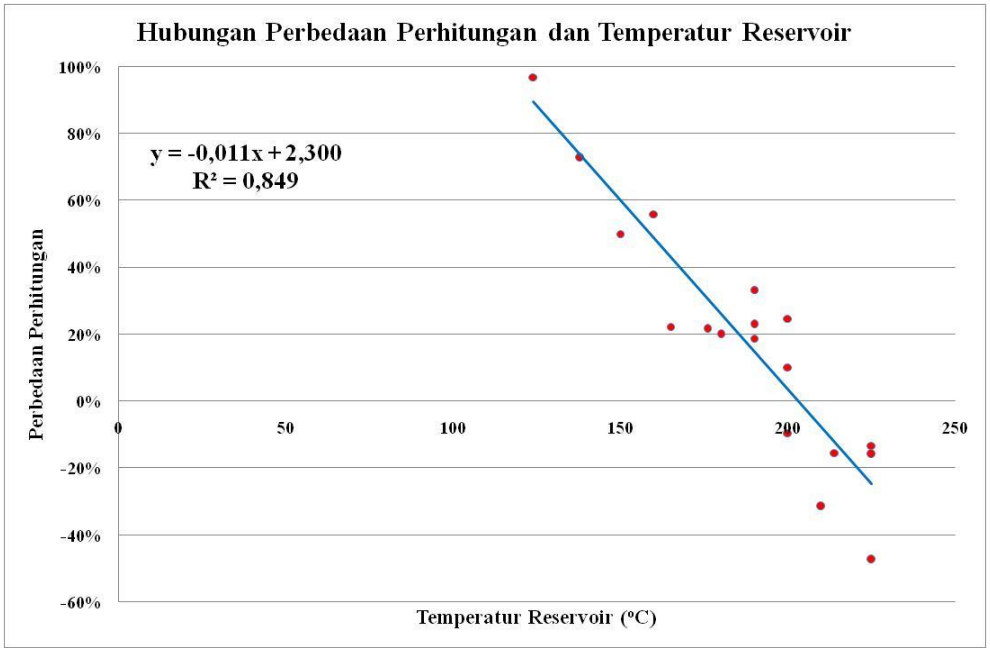
Dengan mengacu pada Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (2022), dari 131 tersebut, 55 titik potensi (42%) digolongkan sebagai sumber daya panas bumi temperatur tinggi, 71 titik potensi (54%) sebagai sumber daya panas bumi temperatur menengah dan sisanya sebagai sumber daya panas bumi temperatur rendah. Sedangkan jika berdasarkan besar nilai energi dalam MW_e, maka proporsi sumber daya panas bumi temperatur menengah ini mencapai 39% atau setara dengan 3.482 MW_e.

Gambar 3 merupakan histogram sumber daya panas bumi temperatur menengah kelas cadangan mungkin di Indonesia. Dengan asumsi data memiliki distribusi normal, maka dapat dihitung bahwa nilai rata-rata temperatur sumber daya menengah kelas cadangan mungkin adalah sebesar 184°C. Dengan mengacu histogram yang sama, secara sederhana dapat dilihat terdapat tiga populasi sumber daya panas bumi yang berbeda, yaitu populasi dengan interval 130-165°C; 165-200°C, dan 200-225°C yang dapat dinamai secara berturut-turut sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah-rendah, temperatur menengah-menengah dan temperatur menengah-tinggi.

Setelah dilakukan perhitungan ulang, terdapat perbedaan antara perhitungan dalam studi ini dan perhitungan Badan Geologi. Contoh perbedaan nilai parameter-parameter yang digunakan antara yang dilakukan studi ini dan perhitungan Badan Geologi sebagaimana tercantum pada Tabel 2. Ada indikasi korelasi yang kuat antara persentase perbedaan perhitungan keduanya tersebut dengan temperatur reservoir yang ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 85%. Korelasi keduanya dapat dilihat pada Persamaan 11 yang merupakan hasil regresi linear. Korelasi tersebut menunjukkan tren apabila semakin besar temperatur reservoir maka semakin kecil persentase perbedaannya, sebagaimana dilihat pada Gambar 4.



Gambar 3. Histogram Sumber Daya Panas Bumi Temperatur Menengah di Indonesia



Gambar 4. Hubungan Persentase Perbedaan Perhitungan Badan Geologi dan Studi Ini dengan Temperatur Reservoir

$\Delta MW = -0{,}011\ .\ T_i + 2{,}3$ .....(11)

Korelasi yang kuat ini mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematik antara kedua perhitungan. Hal ini diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*), sedangkan perhitungan pada studi ini diasumsikan tidak ada perubahan fasa air. Kemungkinan perubahan fasa air ini akan semakin besar seiring dengan semakin tinggi temperatur reservoir. Sedangkan perbedaan nilai *input* parameter yang lain hanya mengurangi nilai besaran nilai sumber daya secara proporsional.

Persamaan 11 diterapkan pada area prospek panas bumi yang lain dengan kategori sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin dengan *input* temperatur reservoir menghasilkan persentase pengurangan nilai sumber daya adalah sebesar 27% atau sebesar 940 MW_e dari perhitungan Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

C. Hubungan Nilai Sumber Daya Dengan Perencanaan Energi

Untuk perencanaan kebijakan energi, hasil studi ini dapat digunakan dengan tujuan optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia. Perencanaan pemanfaatan energi panas bumi dapat lebih akurat karena hasil studi ini menggunakan parameter-parameter yang lebih sesuai dengan karakteristik sumber daya temperatur menengah.

Dalam histogram pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa distribusi titik potensi sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin paling banyak pada interval temperatur 180-200^oC. Sebagai contoh, untuk penetapan harga listrik yang berasal dari sumber daya panas bumi temperatur menengah berdasarkan *production cost analysis* seperti yang dilakukan Nugraha et al. (2017), maka asumsi temperatur reservoir dapat menggunakan interval temperatur tersebut. Sedangkan jika ingin menggunakan nilai energi dalam satuan MW_e sebagai dasar rencana pengembangan energi panas bumi temperatur menengah, maka nilai sumber daya panas bumi dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi (2022), sebaiknya dilakukan pengurangan nilai MW_e terlebih dahulu menggunakan Persamaan 11 sehingga tidak *overestimate* dalam penentuan nilai sumber daya panas bumi temperatur menengah dalam perencanaan kebijakan energi.

Nilai *overestimate* sumber daya panas bumi temperatur menengah ini akan berdampak perencanaan kapasitas terpasang pembangkit dan perhitungan keekonomian yang tidak akurat. Nilai keekonomian harga listrik dari panas bumi, akan sangat tergantung pada kualitas yang diwakili temperatur reservoir dan kuantitas yang diwakili besarnya kapasitas terpasang pembangkit.

Perhitungan keekonomian yang tidak akurat dapat mengakibatkan lelang Wilayah Kerja Panas Bumi kurang diminati para calon investor. Hal ini karena nilai asumsi kapasitas terpasang pembangkit lebih besar dan acuan temperatur reservoir yang digunakan pemerintah lebih tinggi. Sehingga pemerintah dapat menganggap bahwa harga yang ditetapkan sudah cukup menarik secara perhitungan keekonomian, sedangkan investor menganggap harga yang ada belum cukup untuk mendapatkan nilai *investment return* yang diinginkan.

KESIMPULAN

Kelas cadangan mungkin (*possible reserves*) energi panas bumi dalam SNI 6009:2017 sebenarnya belum dapat dikategorikan dalam kelas cadangan, namun baru dapat dikategorikan sebagai kelas sumber daya apabila penentuan nilai sumber daya tersebut didasarkan *the Australian Geothermal Reporting Code*

Committee (AGRCC).. Hal ini karena belum adanya data dan informasi dari kegiatan pengeboran yang cukup untuk memastikan adanya fluida, permeabilitas dan temperatur yang layak untuk dikembangkan berdasarkan asepek teknis.

Perbedaan hasil perhitungan Badan Geologi dan hasil perhitungan pada studi ini dikarenakan perbedaan penentuan pada lima asumsi nilai parameter. Kelima parameter tersebut yaitu perhitungan termal yang terkandung dalam fluida, temperatur akhir, saturasi air, faktor konversi listrik dan faktor kapasitas pembangkit. Untuk perhitungan yang dilakukan Badan Geologi, terdapat satu parameter yang tidak dipertimbangkan yaitu faktor kapasitas pembangkit (L). Hal ini bisa diartikan bahwa efisiensi kapasitas pembangkit dianggap 100%.

Berdasarkan analisis histogram, nilai rata-rata temperatur sumber daya menengah kelas cadangan mungkin adalah sebesar 184ºC. Selain itu, terdapat tiga populasi sumber daya panas bumi yang berbeda, yaitu populasi dengan interval 130-165ºC; 165-200ºC, dan 200-225ºC yang dapat dinamai secara berturut-turut sebagai sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah-rendah, temperatur menengah-menengah dan temperatur menengah-tinggi.

Perbedaan persentase perhitungan Badan Geologi dan studi ini menunjukkan adanya korelasi kuat (R^2 = 85%) yang mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematik, yang diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (*liquid*) ke fasa uap (*vapor*), sedangkan perhitungan pada studi ini diasumsikan tidak ada perubahan fasa air.

Hasil perhitungan ulang dengan menggunakan korelasi perbedaan persentase hasil perhitungan Badan Geologi dan studi ini dengan temperatur reservoir menghasilkan pengurangan nilai sumber daya panas bumi sebesar 27% atau sebesar 940 MW_e dari perhitungan oleh Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya temperatur menengah yang sebelumnya mencapai 3.482 MW_e berkurang menjadi total 2.541 MW_e.

Dengan mengetahui populasi sumber daya panas bumi temperatur menengah kelas cadangan mungkin dan besar nilai sumber daya temperatur menengah yang lebih akurat bisa digunakan untuk perencanaan kebijakan energi lebih tepat. Sehingga perencanaan kebijakan energi dengan tujuan optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi temperatur menengah di Indonesia dapat dicapai. Perhitungan sumber daya panas bumi lebih akurat karena menggunakan nilai asumsi parameter yang lebih sesuai dengan karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah.

UCAPAN TERIMA KASIH

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

DAFTAR PUSTAKA

Ashat, A., & Saptadji, N. M. (2002). Correlations for Thermodynamic Properties of Pure Water At Saturation Condition. In *Teknik Panas Bumi* (p. 305). ITB.

Badan Standardisasi Nasional. (1999). *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 13-6171-1999. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). *Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 13-6482-2000. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Energi Panas Bumi Indonesia*. SNI 6009:2017. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2018a). *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 6169:2018. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Badan Standardisasi Nasional. (2018b). *Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI 6482:2018. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.

Ciriaco, A. E., Zarrouk, S. J., & Zakeri, G. (2020). Geothermal resource and reserve assessment methodology: Overview, analysis and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *119*, 109515. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109515

Danar, A. (2010). Keputusan Investasi Panas Bumi Di Indonesia. In *Energi Panas Bumi Di Indonesia* (pp. 61–179). Badan Geologi.

Direktorat Panas Bumi. (2014). *Penyiapan Data dan Informasi Awal untuk Penyusunan Masterplan Panas Bumi*.

Kaya, E., Zarrouk, S. J., & O'Sullivan, M. J. (2011). Reinjection in geothermal fields: A review of worldwide experience. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(1), 47–68. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.032

Kementerian ESDM. (2017). Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 37 Tahun 2017 Tentang Wilayah Kerja Panas Bumi Untuk Pemanfaatan Tidak Langsung.

Lawless, J. (2007). *Discussion Paper on Guidelines for Geothermal Reserves Definition*.

Lawless, J. v, Ward, M., & Beardsmore, G. (2010). The Australian code for geothermal reserves and resources reporting: practical experience. *Proceedings of the World Geothermal Congress*.

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

Pemerintah Indonesia. (2014). Undang-Undang Nomor 21 tahun 2014 tentang Panas Bumi.

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara Panas Bumi. (2022). *Peta Potensi dan Distribusi Panas Bumi Indonesia*.

Quinao, J. J., & Zarrouk, S. J. (2014). A Review of the Volumetric Stored-Heat Resource Assessment: One Method, Different Result. *Proceedings of 36th New Zealand Geothermal Workshop*, 24–26.

Quinlivan, P. (2009). Assessment of Current Costs of Geothermal Power Generation in New Zealand (2007 Basis). *New Zealand Geothermal Association*, *74*.

Rogers, G. F. C., & Mayhew, Y. R. (1995). *Thermodynamic and transport properties of fluids*. John Wiley & Sons.

Saptadji, N. M. (2001). Teknik Panas Bumi. *Bandung, Penerbit ITB*.

Sarmiento, Z. F., & Bjornsson, G. (2007). Geothermal resource assessment-volumetric reserves estimation and numerical modelling. *Reykjavik, Iceland: United Nations University-Geothermal Training Programme and La Geo*.

Sarmiento, Z. F., Steingrímsson, B., & Axelsson, G. (2013). Volumetric resource assessment. *Proceedings of the Short Course V on Conceptual Modelling of Geothermal Systems, Santa Tecla, El Salvador*, *2*.

The Australian Geothermal Reporting Code Committee (AGRCC). (2010). *Australian Code for Reporting of Exploration Results, Geothermal Resources and Geothermal Reserves - The Geothermal Reporting Code*.

Tortike, W. S., & Ali, S. M. F. (1989). Saturated-Steam-Property Functional Correlations for Fully Implicit Thermal Reservoir Simulation. *SPE Reservoir Engineering*, *4*(04), 471–474. https://doi.org/10.2118/17094-PA

West Japan Engineering Consultant. (2017). *Review of the Target of Geothermal Development Plan*.

Williams, A. F., Lawless, J. v, Ward, M. A., Holgate, F. L., & Larking, A. (2010). A code for geothermal resources and reserves reporting. *Proceedings World Geothermal Congress*.

Williams, C. F. (2004). Development of revised techniques for assessing geothermal resources. *Proceedings, 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University*.

Williams, C. F., Reed, M., & Mariner, R. H. (2008). *A Review of Methods Applied by the US Geological Survey in the Assessment If Identified Geothermal Resources*. (p. 27). US Department of Interior, US Geological Survey.

Zarrouk, S. J., & Moon, H. (2014). Efficiency of geothermal power plants: A worldwide review. *Geothermics*, *51*, 142–153. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.11.001

Zarrouk, S. J., & Simiyu, F. (2013). A review of geothermal resource estimation methodology. *Proceedings, New Zealand Geothermal Workshop, Rotorua*.

Diterima	: 18 Oktober 2022
Direvisi	: 31 Oktober 2022
Disetujui	: 30 November 2022

UCAPAN TERIMA KASIH

Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para editor dan mitra bestari atas kerjasamanya dalam proses review lima makalah untuk edisi ketiga Buletin Sumber Daya Geologi tahun 2022. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya, antara lain Prof. Dr. Ir. Binarko Santoso, M.Sc; 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, Ir. Agus Didit Haryanto, M.T; Ir. Sabtanto Joko Suprapto, M.T; Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DEA; Ir. Bambang Pardiarto; Ir. Teuku Ishlah; Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi dan Ir. Asep Suryana.

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

Ucapan terimakasih juga disampaikan kepada semua unsur Dewan Redaksi dalam proses penyusunan dan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.17 Nomor 3, Tahun 2022. Semoga hadirnya Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bentuk cetakan maupun digital secara *online* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

Salam sehat dan selalu semangat.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 3 Tahun 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Ana Nurul Hidayati
Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung
Email: ana705389@gmail.com

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

Aton Patonah
Universitas Padjadjaran
Email: a.patonah@unpad.ac.id

Bayu Sayekti
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: sayekti_bayu@yahoo.co.id

Flaurentina Nadya
Universitas Padjadjaran
Email: flaurentina.nadya@gmail.com

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

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

Mochammad Nurhadi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: mochamad.hadi@esdm.go.id

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

Nurcahyo Indro Basuki
Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung
Email: n.basuki@itb.ac.id

Rezky Aditiyo
Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia
Email: rino.destama@ui.ac.id

Rina Wahyuningsih
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: rina.wahyuningsih@esdm.go.id

Rino Destama Sugandhi
Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia
Email: rino.destama@ui.ac.id

Rizki Satria Rachman
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: rizkisatriarachman@gmail.com

Sigit Arso Wibisono
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: wibiars@yahoo.com

Sulaeman
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: sulaeman.1988@gmail.com

Tony Rahadinata
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Email: tony.rahadinata@esdm.go.id

Undang Mardiana
Universitas Padjadjaran
Email: undang.mardiana@unpad.ac.id

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 17 Nomor 3 Tahun 2022 ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

Alterasi 137 - 139, 141, 143 - 147, 161, 177 – 188
Batubara 149, 152, 161 - 177, 189, 199, 200, 202 – 204
Estimasi 163 - 169, 171, 173, 175, 176, 190, 198, 203, 204
Hidrotermal 137 - 139, 141 - 143, 145 - 148, 161, 180, 188
ilit±kaolinit 137, 138, 143
illit±klorit 137, 143 - 147
illit±smektit 137, 143, 145 – 147
Jangga 163 - 165, 167, 169, 171, 173, 175
karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah 189, 203
kaolinit 137, 138
Kompleks Sibolga 149 – 150
metode volumetrik perhitungan energi panas bumi 189
Panas Bumi 149, 152, 161 - 164, 175, 177 - 179, 181, 183, 185, 187 - 205
Parmonangan 149 - 152, 154 - 156
pelapukan granitoid 149, 155, 157, 161
Pemodelan 163 - 167, 169 - 171, 173, 175, 193
perhitungan sumber daya panas bumi 189, 190, 192, 193, 195 - 197, 199, 203
Potensi 155, 163 - 168, 171, 173, 175 - 178, 190, 197, 199, 200, 202 – 204
Sub-Profilitik 177
unsur tanah jarang 149 - 151, 153, 155, 157, 159, 161
Zona Alterasi 137, 138, 141, 143 - 147, 177, 183, 184, 188
Zona *Outflow 177, 187, 188*

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

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

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

ALTERASI HIDROTERMAL ENDAPAN SINABAR DAERAH BUKIT TEMBAGA, IHA – LUHU, PULAU SERAM, MALUKU

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2022 Vol. 17 No. 3 Hal. 137 - 148

Daerah Iha – Luhu berlokasi di bagian barat Pulau Seram yaitu sekitar 59,2 km dari Kota Piru. Secara geografis terletak pada 128°0'35" s.d 128°2'42" BT dan 3°20'40" s.d 3°22'05" LS dan termasuk dalam wilayah Kecamatan Huamual Kabupaten Seram Bagian Barat, Provinsi Maluku. Wilayah Iha – luhu tersusun atas litologi batuan metapelitik dan batuan malihan berderajat rendah yaitu satuan meta batupasir kuarsa – muskovit dan filit kuarsa – muskovit serta ditutupi secara tidak selaras oleh endapan aluvial diatasnya.

Daerah penelitian mempunyai tiga zona alterasi hidrotermal yaitu zona alterasi illit±kaolinit, zona alterasi illit±klorit dan zona alterasi Illit±smektit±kaolinit. Zona alterasi illit±kaolinit dicirikan dengan himpunan mineral lempung yaitu illit dan kaolinit. Alterasi ini berasosiasi dengan meta-batulanau kuarsa-muskovit dan dominan pada meta-batupasir kuarsa-muskovit. Intensitas alterasi sedang – kuat (moderate to strong altered) dengan parameter presentase kehadiran mineral alterasi > 75 %. Berdasarkan kumpulan mineral alterasi kaolinit dan illit, maka zona alterasi illit±kaolinit terbentuk pada temperatur <220° -300° C. Zona Alterasi illit±klorit berasosiasi dengan pengayaan endapan bijih sinabar tipe urat (fracture -related mineralization) dan disseminated dimana pola alterasi merupakan pola alterasi pervasive. Zona ini dicirikan oleh kehadiran mineral lempung mika (illit) dengan kehadiran klorit dan kuarsa. Alterasi illit±klorit lebih dominan berasosiasi dengan filit kuarsa-muskovit dan meta-batulanau kuarsa-muskovit serta menyebar di bagian tengah Bukit Tembaga. Suhu pembentukan zona alterasi ini diperkirakan 250°-300°C.

Zona alterasi illit±smektit±kaolinit menyebar secara luas di puncak Bukit Tembaga hingga pedataran rendah dengan luas area mencapai > 9,6 Km^2. Alterasi ini menyelubungi alterasi illit±klorit dan illit±kaolinit dengan pola alterasi pervasive dan intensitas alterasi tinggi/kuat (strong altered). Lempung pada zona ini merupakan alterasi mineral muskovit/serisit dan plagioklas. Kehadiran smektit pada zona alterasi ini mencerminkan kedalaman vertikal yang relatif jauh dari zona bijih (ore) atau pada bagian atas/top formasi dengan temperatur yang cenderung lebih rendah dibandingkan illit dan kaolinit. Suhu pembentukan zona alterasi ini diperkirakan pada temperatur 220°-300°C.

Kata kunci: Alterasi, hidrotermal, illit±kaolinit, illit±klorit, illit±smektit±kaolinit

Ana Nurul Hidayati[1], Nurcahyo Indro Basuki[1], Sulaeman[2], dan Bayu Sayekti[2]
([1]Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, [2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

DISTRIBUSI UNSUR UTAMA DAN UNSUR TANAH JARANG PADA PELAPUKAN BATUAN GRANITOID DI DAERAH PARMONANGAN, KABUPATEN TAPANULI UTARA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2022 Vol. 17 No. 3 Hal. 149 - 162

Hasil penyelidikan oleh PSDMBP pada tahun 2011 menunjukkan kandungan REE pada pelapukan granitoid di Parmonangan terdapat beberapa unsur dengan anomali yang cukup signifikan seperti Ce (600 s.d. 1400 ppm), La (400 s.d. 1000 ppm), dan Pr (600 s.d. 1400 ppm). Oleh karena itu, penyelidikan lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui persebaran REE ke arah bagian barat dari daerah penyelidikan sebelumnya. Penyelidikan ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik granitoid, pola pelapukan, dan profil kandungan REE di daerah penyelidikan.

Pelapukan granitoid di daerah Parmonangan berasal dari granit biotit dan granit biotit hornblende. Karakteristik geokimia hasil pelapukan menunjukkan bahwa Na_2O, CaO, K_2O, SiO_2, P_2O_5, dan MnO mengalami pelarutan dan bersifat mobile saat berlangsungnya pelapukan sehingga menunjukkan penurunan kadar pada soil dibandingkan batuan dasar. Sedangkan Al_2O_3, Fe_2O_3, TiO_2, dan LOI menunjukkan kenaikan pada hasil pelapukannya akibat mengalami pengayaan residual.

Kandungan pada pelapukan granitoid daerah Parmonangan menunjukkan pengayaan relatif ΣLREE terhadap ΣHREE. Kandungan ΣLREE dipengaruhi oleh persebaran unsur La dan Ce yang terkandung dalam mineral monasit. Kandungan ΣHREE dikontrol oleh persebaran unsur Y. Berdasarkan korelasi Spearman mineral titanit dan apatit juga berpengaruh pada kelimpahan ΣLREE. Sedangkan mineral pembawa ΣHREE adalah zirkon. Interval sampel berada pada zona pencucian REE sehingga konsentrasi ΣREE yang didapat pada soil lebih rendah dibanding batuan dasar.

Kata kunci: pelapukan granitoid, Parmonangan, unsur tanah jarang, Kompleks Sibolga

Rino Destama Sugandhi[1], Rezky Aditiyo[1], Sigit Arso Wibisono[2], dan Rizki Satria Rachman[2]
([1]Program Studi Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, [2]Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas Bumi)

PEMODELAN DAN ESTIMASI POTENSI BATUBARA DI DAERAH JANGGA, KABUPATEN BATANG HARI, PROVINSI JAMBI

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2022 Vol. 17 No. 3 Hal. 163 - 176

Batubara merupakan salah satu komoditas terbesar yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik di Indonesia. Mengingat batubara merupakan sumber energi yang tidak terbarukan, maka perlu dilakukan eksplorasi untuk mencari sumber potensi batubara baru. Eksplorasi yang dilakukan berada di daerah Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi. Kegiatan ini merupakan kegiatan eksplorasi tahap pendahuluan yang dilakukan bersama Pusat Sumber Daya

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

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

Mineral, Batubara, dan Panas Bumi. Kegiatan eksplorasi yang dilakukan terdiri dari dua kegiatan, yaitu pemetaan geologi permukaan dan pengeboran inti. Setelah itu, dilakukan pengolahan data untuk merekonstruksi bentuk model 3D lapisan batubara dan menghitung estimasi potensi batubara. Pada kegiatan pemetaan geologi permukaan didapati kondisi geologi daerah penelitian yang terdiri dari dua satuan batuan, yaitu satuan batuan batupasir dan satuan batulempung, serta didapati tiga singkapan batubara permukaan. Kegiatan pengeboran dilakukan pada empat titik koordinat yaitu MK-01, MK-02, MK-03, dan MK-04. Pemodelan lapisan dan estimasi potensi batubara dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MineScape 5.7. Hasil data pengeboran menunjukkan bahwa terdapat 8 lapisan batubara yang dapat dimodelkan dengan data pendukung berupa data singkapan batubara. Estimasi potensi batubara pada penelitian ini mengacu pada SNI 5015:2019 yang terbagi menjadi kelompok target eksplorasi dan kelompok inventori batubara. Hasil perhitungan estimasi diketahui bahwa total target eksplorasi minimum adalah 1.158.822,74 ton dan maksimum 4.208.379,08 ton, sementara total estimasi potensi batubara pada kelompok inventori tereka sebesar 12.916.775,7 dan inventori tertunjuk sebesar 9.296.304,45 ton.

Kata kunci: Batubara, Pemodelan, Estimasi, Potensi, Jangga

Flaurentina Nadya[1], Aton Patonah[1], Undang Mardiana[1], dan Mochammad Nurhadi[2]
([1]Universitas Padjadjaran, [2]Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

KARAKTERISTIK ALTERASI BAWAH PERMUKAAN DI LAPANGAN PANAS BUMI "X", KABUPATEN SUKABUMI, PROVINSI JAWA BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2022 Vol. 17 No. 3 Hal. 177 - 188

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi panas bumi terbesar di dunia. Salah satunya terletak di Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. Untuk dapat mengoptimalkan potensi panas bumi, diperlukan penelitian mengenai karakteristik panas bumi, salah satunya penelitian mineral alterasi pada manifestasi panas bumi. Penelitian ini difokuskan pada studi alterasi menggunakan data coring dan cutting dari pengeboran Sumur X. Urutan Batuan pada sumur X dari tua ke muda terdiri atas endapan danau, tufa teralterasi, breksi tufa teralterasi, dasit teralterasi, andesit teralterasi, breksi andesit teralterasi dan breksi vulkanik teralterasi yang terbagi kedalam dua periode vulkanik yakni periode Pliosen yang berasal dari letusan Gunung Citorek dan Plistosen yang berasal dari letusan Gunung Halimun dan Gunung Tapos. Berdasarkan himpunan mineral alterasinya, zona alterasi pada sumur X terbagi kedalam 3 zona yakni zona smektit -klorit pada kedalaman 24 s.d 600 MD, zona ilit – klorit pada kedalaman 600 s.d 700 MD, dan zona klorit - smektit pada kedalaman 700 s.d 821 MD. Berdasarkan komposis mineral dan zona alterasinya, tipe alterasi pada sumur X adalah sub-profilitik dengan pH netral dan temperatur 200-300°C dan dapat bertindak sebagai zona penudung dan dilihat dari pemunculan manifestasi yang dikontrol oleh struktur, daerah penelitian berada di bagian zona outflow.

Kata kunci: Panas Bumi, Alterasi, Zona Alterasi, Sub-Profilitik, Zona Outflow

Husin Setia Nugraha, Rina Wahyuningsih, dan Tony Rahadinata
(Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

PERKIRAAN ULANG CADANGAN MUNGKIN PANAS BUMI TEMPERATUR MENENGAH DI INDONESIA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG November 2022 Vol. 17 No. 3 Hal. 189 - 205

Informasi tentang nilai dan karakteristik sumber daya dan cadangan energi panas bumi yang akurat dibutuhkan dalam perencanaan kebijakan energi yang tepat dalam rangka optimalisasi pemanfaatan sumber daya panas bumi di Indonesia. Selain itu, perbedaan hasil perhitungan sumber daya dan/atau cadangan energi panas bumi yang dilakukan pengembang dan pemerintah menyebabkan perhitungan keekonomian proyek pengembangan panas bumi suatu area prospek juga berbeda. Studi ini melakukan perhitungan ulang sumber daya panas bumi kategori temperatur menengah kelas cadangan mungkin dengan mengganti asumsi beberapa parameter dengan asumsi parameter best practice yang digunakan dalam beberapa literatur. Kelima parameter tersebut yaitu perhitungan termal yang terkandung dalam fluida, temperatur akhir, saturasi air, faktor konversi listrik dan faktor kapasitas pembangkit. Hasil perhitungan ulang pada studi ini menghasilkan nilai sumber daya panas bumi yang berbeda dari hasil perhitungan Badan Geologi. Persentase perbedaan perhitungan Badan Geologi dan studi ini terdapat indikasi korelasi kuat dengan temperatur reservoir ditunjukkan dengan nilai R2 sebesar 85%. Korelasi yang kuat ini mengindikasikan adanya perbedaan yang sistematik, yang diduga karena dalam perhitungan Badan Geologi diasumsikan adanya perubahan fasa air dari fasa cair (liquid) ke fasa uap (vapor). Hasil perhitungan ulang dengan menggunakan persamaan korelasi tersebut dengan input temperatur reservoir menghasilkan pengurangan nilai sumber daya panas bumi sebesar 27% atau sebesar 940 MWe dari hasil perhitungan Badan Geologi. Hal tersebut mengakibatkan nilai sumber daya temperatur menengah kelas cadangan mungkin yang sebelumnya mencapai 3.482 MWe berkurang menjadi total 2.541 MWe.

Kata kunci: perhitungan sumber daya panas bumi, metode volumetrik perhitungan energi panas bumi, karakteristik sumber daya panas bumi temperatur menengah



Bongkah Rijang Penyelidikan, Kabupaten Maluku Tengah, Provinsi Maluku
(John Mauritz F.P., 2021)



Distribusi Mineral Berat di dalam Konsentrat Dulang yang Menunjukkan Adanya Butiran-butiran Emas
Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara (Agata Vanessa, 2021)



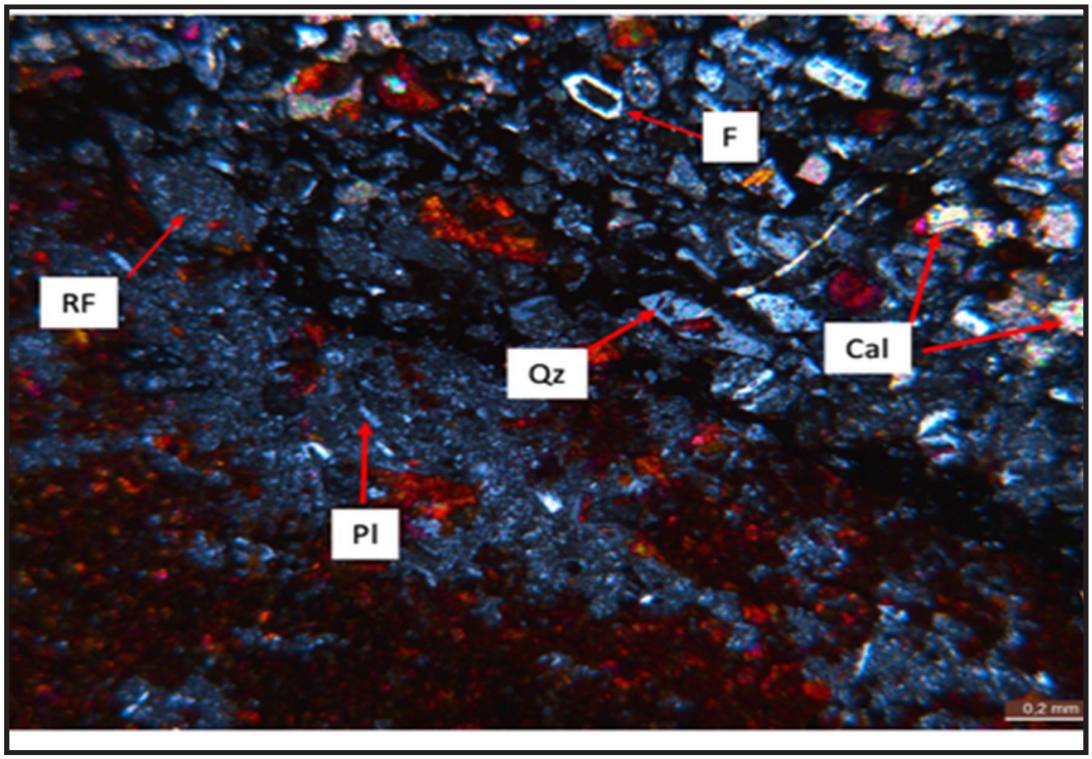
Kenampakan Kuarsit di Kabupaten Aceh Selatan, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2021)



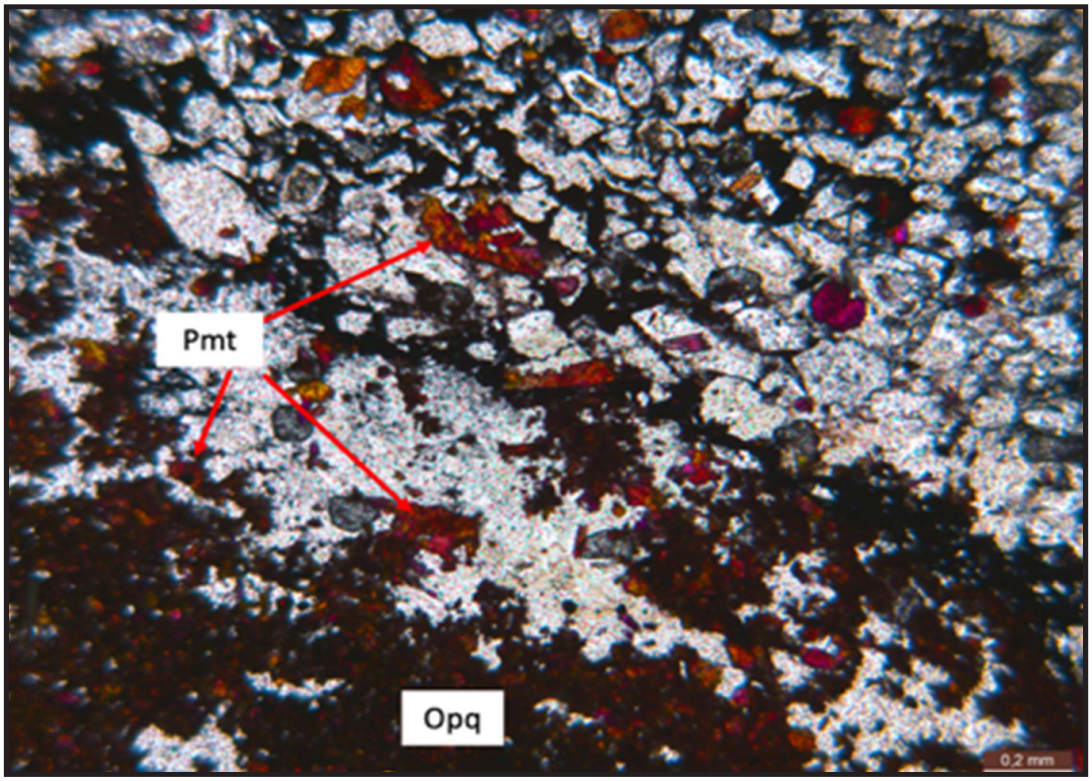
Andesit Terubah Propilitik, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Bongkah Mangan Diantara Batuan Andesit Propilitik,
Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Fotomikrograf Piemontit – Opak, Terlihat Perlapisan Opak,
Disusun oleh Fragmen Batuan (RF) dan Mineral Piemontit (Pmt), Kalsit (Cal), Opak (Opq),
Plagioklas (Pl), Fosil (F), Kuarsa (Qz). Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Fotomikrograf Piemontit – Opak (xpl)
Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Kuarsa Bertekstur Druzzy dengan Diseminasi Pirit,
Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Mangan Konkresi dan Sejajar Perlapisan, Kabupaten Timor Tengah Utara,
Provinsi Nusa Tenggara Timur (Reza M. Faisal, 2021)



Masif Comb, Kabupaten Sintang, Provinsi Kalimantan Barat
(Hartaja M. Hatta Wicaksono, 2021)



Singkapan Batuan Tuf Kristal di Daerah Aliran Sungai Siarung-Arung,
Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara
(Sulaeman, 2021)



Singkapan Filit di Tamilaw yang Mengalami Ubahan dan Terpotong Urat Kuarsa
Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara (Agata Vanessa, 2021)



Singkapan Perlapisan Mangan Serpih, Kabupaten Timor Tengah Utara,
Provinsi Nusa Tenggara Timur (Reza M. Faisal, 2021)



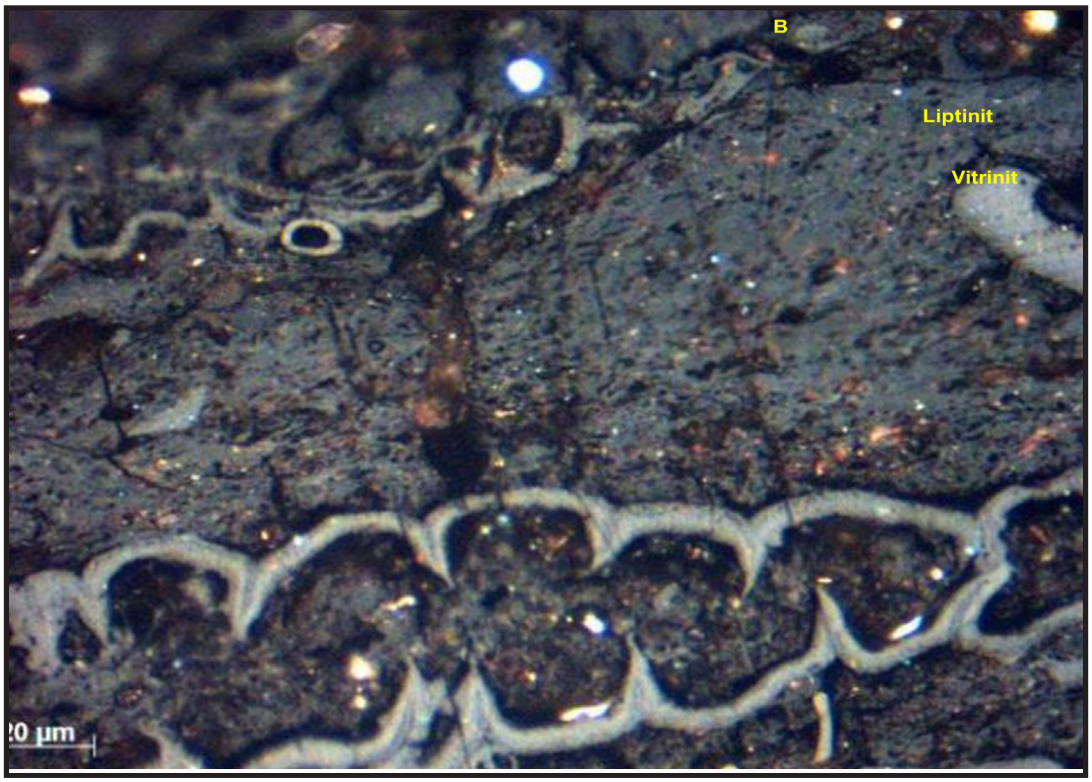
Tuf Terubah Propilitik yang Berasosiasi dengan Silisifikasi, Kabupaten Sumbawa,
Provinsi Nusa Tenggara Barat (Agata Vanessa, 2021)



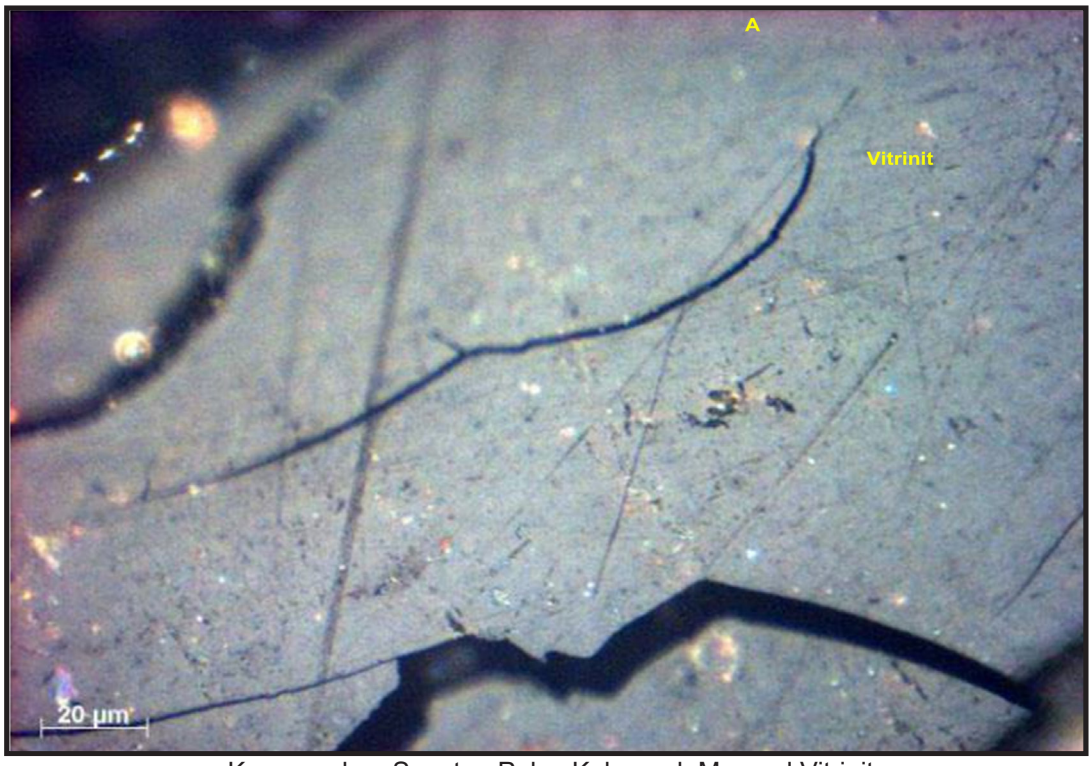
Urat Kuarsa Teroksidasi, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat
(Agata Vanessa, 2021)



Singkapan Filit di Dusun Parai pada Blok Terati, Kabupaten Sanggau,
Provinsi Kalimantan Barat (Reza Marza D., 2021)



Kenampakan Sayatan Poles Kelompok Liptinit, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Sigit A Wibisono, 2021)



Kenampakan Sayatan Poles Kelompok Maseral Vitrinit Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Sigit A Wibisono, 2021)



Peninjauan Infrastruktur Rencana Area Pemboran Panas Bumi
yang Berbatasan dengan Area Hutan Lindung, Kabupaten Pandeglang,
Provinsi Banten (Eko Suryanto, 2022)



Peninjauan Infrastruktur Rencana Area Pemboran Panas Bumi,
Jalur Mobilisasi Peralatan Pemboran, Kabupaten Pandeglang,
Provinsi Banten (Eko Suryanto, 2022)

PEDOMAN PENULISAN
Makalah/Karya Tulis Ilmiah
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

ISI DAN KRITERIA UMUM

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

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

FORMAT

UMUM

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

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

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

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

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

Buku

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

Bab dalam Buku

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

Prosiding

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

Skripsi/Tesis/Disertasi

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

Informasi dari Internet

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

Wewenang Redaksi

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

Pengiriman Naskah

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

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

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

SERTIFIKAT

Kementerian Riset dan Teknologi/
Badan Riset dan Inovasi Nasional

RISTEK-BRIN

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

Buletin Sumber Daya Geologi

E-ISSN: 25801023

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

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

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

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

Bambang P. S. Brodjonegoro

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

ISSN 1907-5367
9 771907 536770

eISSN 2580-1023
9 772580 102009