

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral

Badan Geologi

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 16	No. 2	Halaman 71 - 151	Bandung Agustus 2021	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 200/M/KPT/2020
--------------------------------	---------	-------	---------------------	-------------------------	---

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Hasil pemodelan 3D berdasarkan pola kelurusan patahan
dengan manifestasi panas bumi di Gunung Tampomas (Abizar Adi, dkk., 2021)

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

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

DEWAN REDAKSI

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

Alamat sekretariat dan pengiriman naskah

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

PENGANTAR REDAKSI

Buletin Sumber Daya Geologi volume.16 nomor.2 telah hadir kembali di akhir Bulan Agustus 2021. Berdasarkan Keputusan Menristek/Kepala BRIN nomor 200/M/KPT/2020 tentang Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020, BSDG dinyatakan lulus berpredikat Peringkat 2 dengan EISSN nomor 25801023 yang berlaku sejak volume.15 nomor 2 Tahun 2020 hingga lima tahun selanjutnya.

Lima makalah yang hadir pada edisi ini tentang karakteristik fluida pembawa mineralisasi, peningkatan nilai tambah batubara dan tiga makalah tentang panas bumi yang membahas tentang pemanfaatan penginderaan jauh dan metode lainnya untuk mengidentifikasi pengaruh struktur terhadap potensi panas bumi dan peluang pemanfaatan langsung energi panas bumi.

Makalah pertama berupa kajian tentang penggunaan analisis inklusi fluida untuk mengidentifikasi evolusi cebakan tipe hidrotermal dan jenis fluida pembawa mineralisasi pada Pit Ramba Joring. Berdasarkan data hasil pengukuran temperatur, tekanan, densitas dan kedalaman pembentukan mineralisasi dapat diketahui jenis fluida pembawa mineralisasi tersebut.

Selanjutnya makalah tentang upaya meningkatkan nilai tambah batubara dengan cara memanfaatkan batubara bawah permukaan yang dikonversi ke dalam bentuk gas sekaligus lebih ramah lingkungan melalui metode *underground coal gasification* (UCG). Upaya tersebut mengkaji potensi di tiga lokasi prospek yang mengacu pada beberapa parameter yang telah ditentukan kemudian disimpulkan bahwa terdapat satu lokasi yang memiliki potensi untuk dikembangkan.

Makalah ketiga berupa pemanfaatan citra penginderaan jauh dan *Fault Fracture Density* (FFD) yang dibuat pemodelan 3D untuk mengidentifikasi hubungan permeabilitas dengan kemunculan manifestasi panas bumi. Hal tersebut menunjukkan adanya kemunculan mata air panas sebagai manifestasi potensi panas bumi dipengaruhi oleh struktur patahan yang berkembang di daerah penelitian.

Gunung Rajabasa merupakan objek penelitian pada makalah keempat. Metode yang digunakan mirip dengan makalah sebelumnya yang bertujuan mengidentifikasi zona permeabilitas tinggi berdasarkan analisis *Fault Fracture Density* (FFD) dan menganalisis keterkaitan antara karakteristik struktur jalur fluida panas bumi ke permukaan dengan lokasi zona reservoir panas bumi.

Makalah terakhir berupa kajian tentang potensi pemanfaatan energi panas bumi secara langsung pada lokasi panas bumi sistem non vulkanik di Cekungan Kutai. Karakteristik kimia air panas seperti tipe, asal-usul, dan temperatur fluida merupakan dasar pertimbangan untuk rekomendasi pemanfaatannya.

Kami mengucapkan terimakasih kepada para Penulis, Editor dan Mitra Bestari atas kontribusi dan dukungannya untuk menghadirkan buletin edisi saat ini. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi dan manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi sehingga dapat menjadi salah satu media penyebaran informasi kebumian yang terakreditasi. Semoga kehadiran Buletin ini dapat menambah wawasan dan pengetahuan untuk para pembaca dalam bidang ilmu kebumian.

Salam hangat,

Dewan Redaksi

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

- 71 - 81 **KARAKTERISTIK FLUIDA PEMBAWA MINERALISASI PIT RAMBA JORING DEPOSIT MARTABE, SUMATRA UTARA**
MINERALIZATION BEARING FLUID CHARACTERISTIC OF RAMBA JORING PIT MARTABE DEPOSIT, NORTH SUMATRA
Oleh : Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSSA
- 83 - 97 **EVALUASI PENDAHULUAN POTENSI UNDERGROUND COAL GASIFICATION DI CEKUNGAN SUMATRA SELATAN: STUDI KASUS BATUBARA FORMASI MUARA ENIM**
A PRELIMINARY EVALUATION OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION POTENTIAL IN THE SOUTH SUMATRA BASIN: A CASE STUDY OF THE MUARA ENIM COAL FORMATION
Oleh : Eska P. Dwitama, M. Rizki Ramdhani dan R. Maria Ulfa
- 99 - 118 **ANALISIS PENGINDERAAN JAUH DAN PEMODELAN 3D FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) DALAM PENENTUAN ZONA PERMEABILITAS PERMUKAAN DI WILAYAH PANAS BUMI GUNUNG TAMPOMAS, JAWA BARAT**
REMOTE SENSING ANALYSIS AND 3D FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) MODELING INTO DETERMINATION OF SURFACE PERMEABILITY ZONES IN MOUNT TAMPOMAS GEOTHERMAL AREA, WEST JAVA
Oleh : Abizar Adi, Agus Didit Haryanto, Johannes Hutabarat, dan Dewi Gentana
- 119 - 131 **IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS FAULT FRACTURE DENSITY CITRA DIGITAL ELEVATION MODEL ALOS PALSAR DI GUNUNG RAJABASA**
IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL RESERVOIR ZONE BASED ON FAULT FRACTURE DENSITY ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODEL ALOS PALSAR IMAGE IN MOUNT RAJABASA
Oleh : I Gede Boy Darmawan, Dirga Ilham Fahlevi, Muhammad Farhan Yassar dan Fachri Aldi Pramudya
- 133 - 151 **SISTEM PANAS BUMI TEMPERATUR RENDAH-SEDANG PADA CEKUNGAN KUTAI DAN REKOMENDASI PEMANFAATANNYA**
LOW-MEDIUM GEOTHERMAL SYSTEM IN KUTAI BASIN AND ITS UTILIZATION
Oleh : Andri Eko Ari Wibowo, Mochamad Nur Hadi, dan Dikdik Risdianto

ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi

**KARAKTERISTIK FLUIDA PEMBAWA MINERALISASI PIT RAMBA JORING
DEPOSIT MARTABE, SUMATRA UTARA**

**MINERALIZATION BEARING FLUID CHARACTERISTIC OF RAMBA JORING PIT
MARTABE DEPOSIT, NORTH SUMATRA**

Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSA
Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran
Asri15008@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui evolusi hidrotermal dari fluida pembawa mineralisasi yang terdapat di *Pit* Ramba Joring, meliputi temperatur, tekanan, densitas dan kedalaman pembentukan mineralisasi. Penelitian ini menggunakan analisis inklusi fluida. Sampel yang dianalisis merupakan sampel yang terindikasi terbentuk bersamaan dengan mineralisasi bijih (*syngenetik*), pada dua tekstur utama bijih yaitu batuan dengan tekstur *silica vuggy yang terbentuk pada kisaran Th 331°C hingga 394°C, Tm -15,19°C hingga -12,94°C* dengan salinitas 14,42 wt% hingga 14,89 wt%. NaCl *equivalent* dan batuan dengan tekstur *brecciated* terbentuk pada kisaran *Th 287,8°C hingga 398,2°C, Tm -14,89°C hingga -11,76°C* serta salinitas 13,91 wt% hingga 4,87 wt%. NaCl *equivalent*. Korelasi positif antara temperatur homogenisasi pembentukan mineralisasi dengan salinitas larutan menandakan bahwa proses *leaching* yang membentuk rongga pada batuan terjadi pada *stage* awal proses alterasi hidrotermal yang diawali dengan proses *leaching* membentuk rongga (*vuggy silica*) yang diikuti proses silisifikasi dengan tekstur *brecciated*, pada fase ini berlangsung pengendapan mineralisasi. Asal larutan yang menjadi larutan pembentuk endapan hidrotermal merupakan jenis larutan *basinal water-seawater* dalam bentuk *connate water* yang masih dipengaruhi oleh air permukaan/*meteoric water* yang menunjukkan adanya indikasi hubungan dengan *magmatic water*. Densitas fluida pembentuk bijih logam berkisar pada 0,8 gr/cm³ sampai dengan 0,9 gr/cm³ sedangkan proses pembentukan bijih pada *Pit* Ramba Joring termasuk dalam *isothermal mixing* dengan sedikit pengaruh pemanasan/*boiling*.

Kata kunci: Ramba Joring, inklusi fluida, *leaching*, *vuggy silica*, *brecciated*, *basinal water-sea water*

ABSTRACT

The research aims to determine hydrothermal evolution of the mineralisation bearing fluid contained in the Ramba Joring Pit, including temperature, pressure, density and depth of mineralisation deposition formation. This research uses the fluid inclusion analysis. Inclusion sampling was carried out on two main textures of ore namely vuggy silica texture formed at range Th 331°C to 394°C, Tm -15.19°C to -12.94°C with salinity of 14.42 wt% - 14.89 wt%. NaCl equivalent and brecciated texture formed at range Th 287.8°C – 398.2°C, Tm -14.89°C to -11,76°C and salinity 13.91 wt% – 14.87 wt%. NaCl equivalent. The positive correlation between the homogenization temperature of mineralization formation and salinity of the solution indicates that the leaching process that forms cavities in rocks occurs at the initial stage of the hydrothermal alteration process that begins with the leaching process forming cavities (silica vuggy) followed by the process of silicification with brecciated texture, the deposition of mineralization takes place at this stage. The origin of the solution forms a hydrothermal deposition is a type of basinal water-seawater solution in the form of connate water which is still influenced by surface water/meteoritic water, also shows an indication of a

relationship with magmatic water. The density of metal-forming fluids ranges from 0.8 gr/cm³ – 0.9 gr/cm³ while the process that takes place in the formation of ore in Ramba Joring Pit is isothermal mixing with a slight warming effect/boiling.

Keywords: Ramba Joring, fluid inclusion, leaching, vuggy silica, brecciated, basinal water-sea water

PENDAHULUAN

Pit Ramba Joring merupakan salah satu cebakan emas-perak yang terdapat pada Deposit Martabe PT Agincourt Resources terletak pada Kecamatan Batangtoru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Provinsi Sumatra Utara (Gambar 1). Berdasarkan pada analisis tekstur batuan, petrografi, mineragrafi, analisis ASD dan analisis SEM EDS diketahui bahwa sistem yang berkembang pada cebakan ini merupakan sistem sulfidasi tinggi. Analisis ASD (*Analytical Spectral Device*) digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik mineral silikat hidroksil, sulfat hidroksida, fosfat dan karbonat berdasarkan rentang panjang gelombang yang diterima perangkat ASD, sedangkan analisis SEM-EDS (*Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive x-RAY Spectroscopy*) digunakan untuk mengetahui gambaran permukaan objek mineral dan mengidentifikasi komposisi elemen yang terdapat pada mineral tersebut. Penentuan karakteristik dan evolusi fluida pembawa mineralisasi pada cebakan Ramba Joring meliputi suhu, tekanan densitas serta kedalaman pembentukan mineralisasi menggunakan analisis inklusi fluida.

Pit Ramba Joring memiliki cebakan dengan sistem tipe epitermal sulfidasi tinggi (Sutopo *et al.*, 2013) dengan tubuh mineralisasi yang berbentuk sub-vertikal dan berasosiasi dengan batuan breksi freatik-freatomagmatik sepanjang patahan yang berarah relatif utara sampai timurlaut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui evolusi fluida hidrotermal pembentuk

alterasi dan mineralisasi yang berlangsung pada cebakan tersebut.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini secara garis besar terbagi atas dua tahap yaitu pekerjaan lapangan dan pekerjaan laboratorium

Pengambilan sampel batuan

Pekerjaan pengambilan sampel batuan merupakan bagian dari kegiatan pemetaan geologi lapangan. Sampel batuan yang dipilih merupakan jenis batuan yang terindikasi mengandung inklusi fluida yang terjebak dalam sampel batuan yang diperlukan dalam analisis laboratorium (inklusi fluida).

Analisis inklusi fluida

Analisis inklusi fluida dengan mikroskop polarisasi dilengkapi dengan alat pengukur temperatur homogenisasi dan temperatur pelelehan "Linkam THMSG600" untuk mengidentifikasi *paleosurface* pembentukan fluida pembawa mineralisasi emas. Analisis ini dilakukan pada Laboratorium kimia milik Unit Geomin PT Antam Tbk.

Inklusi fluida merupakan sampel fluida berukuran sangat kecil yang terjebak dalam mineral selama proses pertumbuhan mineral/*initial growth (primary inclusion)* atau setelahnya pada saat pecahan yang terdapat pada mineral terisi kembali pada fase fluida (*secondary* atau *pseudosecondary*) (Roedder, 1984).

Temperatur fluida mineralisasi merupakan salah satu faktor penting dalam pembentukan endapan bijih. Klasifikasi awal endapan bijih didasarkan pada temperatur mineralisasi yang disimpulkan

(atau diasumsikan) dari sampel batuan pada tiap cebakan (Lindgren, 1933). Inklusi fluida memberikan teknik estimasi yang langsung dan dalam banyak kasus, paling akurat.

Dalam inklusi fluida dikenal dua jenis temperatur yaitu temperatur homogenisasi (T_h) dan temperatur pelelehan (T_m). Temperatur homogenisasi merupakan inklusi fluida pada fase cair atau uap yang terperangkap dalam sistem fluida yang tidak bercampur dan homogen yang menunjukkan suhu perangkap sama dengan suhu inklusinya. Temperatur homogenitas mewakili suhu pertumbuhan mineral. Temperatur pelelehan/*melting* digunakan untuk memprediksi komposisi fluida yang terperangkap yang dibandingkan dengan titik pelelehan eustatiknya, Roedder (1984), Shepperd *et al.*, (1985), Randive *et al.*, (2014).

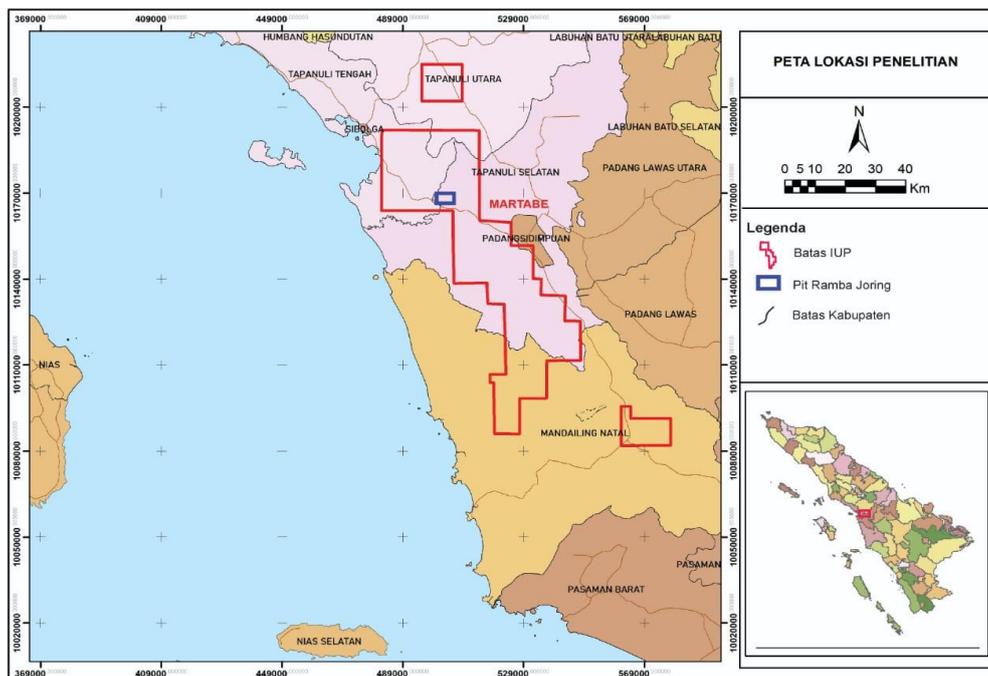
Penentuan nilai T_m dilakukan dengan cara membekukan inklusi fluida sampai -60°C , kemudian temperatur dinaikkan secara perlahan sampai mengalami pelelehan (*melting*) maka akan didapat nilai T_m (*temperature of melting*). Nilai T_h (*temperature of homogeneization*)

ditentukan dengan cara melakukan pemanasan pada inklusi fluida secara perlahan sampai semua gas menghilang. Kemudian temperatur diukur sehingga didapat nilai T_h (*temperature of homogeneization*) dari inklusi fluida tersebut. Salinitas fluida dapat dihitung dengan menggunakan *software BULK* versi 01/03.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran mikrotermometri dilakukan terhadap 3 sampel batuan dengan 25 pengukuran inklusi fluida pada sampel batuan *Pit* Ramba Joring pada fragmen batuan yang mengandung kuarsa, khususnya pada sampel batuan dengan tekstur *vuggy silica* dan *brecciated* (Tabel 1).

Pengukuran miktotermometri merupakan pengukuran inklusi fluida menggunakan mikrotermometer pada mikroskop terhadap sampel sayatan tipis yang telah dipoles dua kali (*double polished thin section*), pemeriksaan inklusi diawali dengan tahap pemanasan dan pendinginan bersama pasokan nitrogen cair untuk pengukuran suhu beku.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Batuan tekstur vuggy silica

Inklusi fluida tersebar secara tidak merata, baik yang ditemukan secara terisolir maupun terorientasi membentuk suatu jalur kubik dan tidak beraturan, ditemukan berbentuk *rounded*, *elongate* dan *oblate*. Jenis inklusi yang ditemukan pada *Pit Ramba Joring* secara umum merupakan inklusi yang terbentuk pada kondisi bifase, yang memperlihatkan rasio L>V (*liquid rich*) (Roedder, 1976) dengan *liquid* >40%. Ukuran inklusi yang ditemukan pada batuan *vuggy silica* bervariasi antara 2 µm hingga <12 µm dengan rata-rata diameter inklusi 5,65 µm (Gambar 2).

Pengukuran mikrotermometrik inklusi batuan dengan tekstur *vuggy silica* menunjukkan kisaran temperatur homogenitas (*Th*) antara 331°C hingga 394°C, kisaran temperatur pelelehan (*Tm*) antara -15,19°C hingga -12,94°C dengan

salinitas 14,42 wt% NaCl *equivalent* sampai dengan 14,89 wt% NaCl *equivalent*.

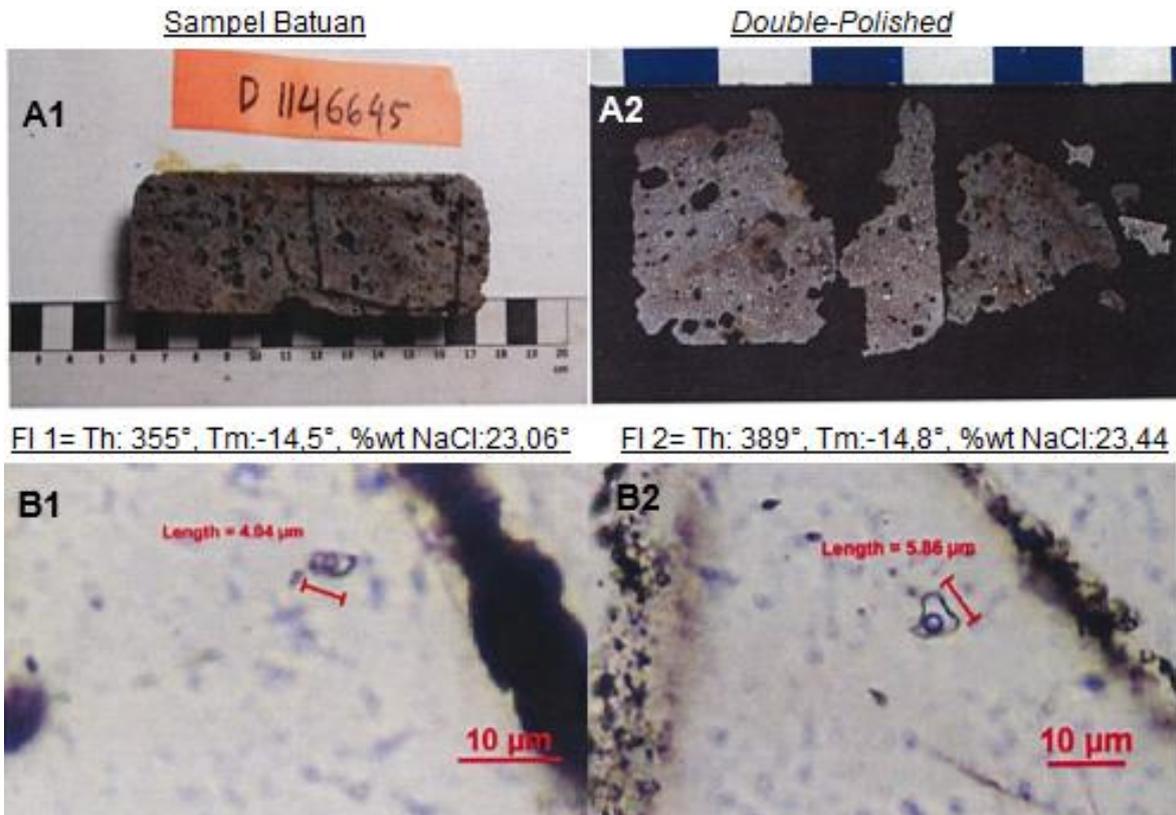
Batuan tekstur brecciated

Inklusi fluida tersebar secara tidak merata, baik yang ditemukan secara terisolir maupun terorientasi membentuk suatu jalur kubik dan tidak beraturan, ditemukan berbentuk *rounded*, *elongate* dan *oblate*, memiliki ukuran inklusi yang bervariasi antara 2 µm hingga <11 µm dengan rata-rata diameter inklusi 5,75 µm (Gambar 3).

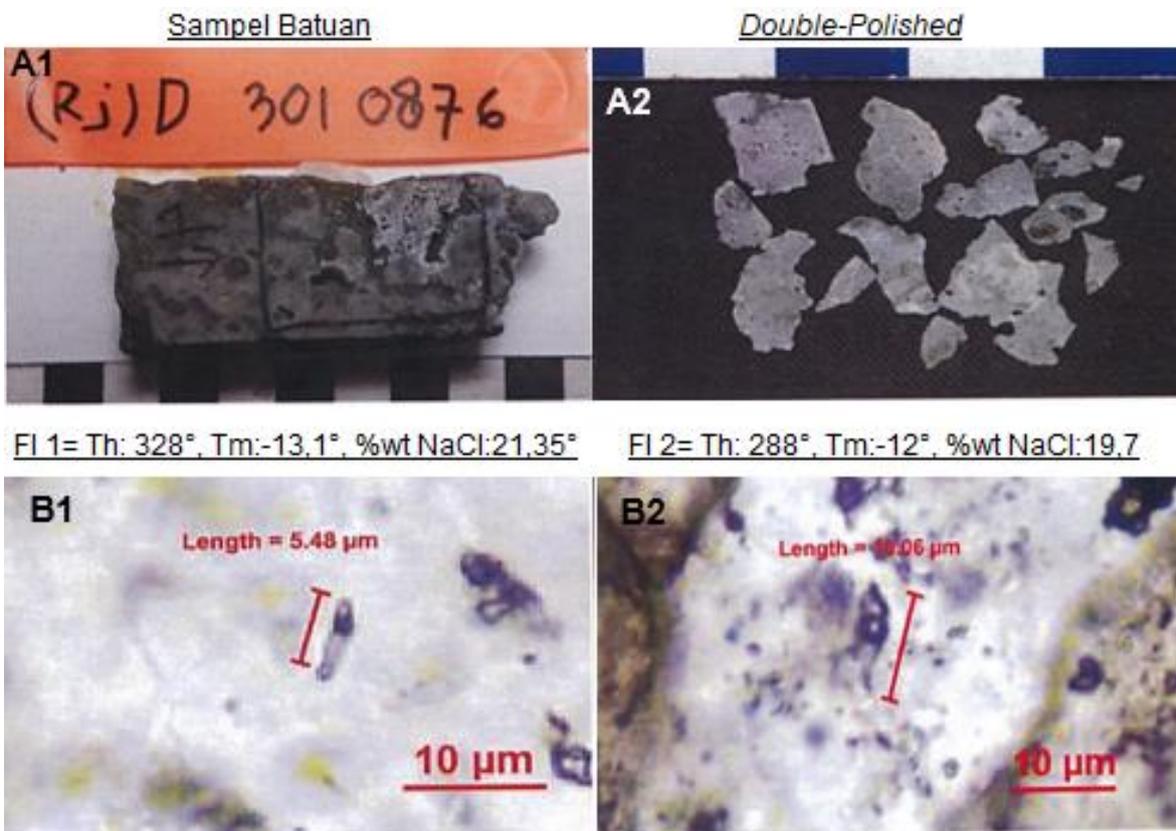
Pengukuran mikrotermometrik inklusi batuan *brecciated* menunjukkan kisaran temperatur homogenitas (*Th*) antara 287,8°C hingga 398,2°C, kisaran temperatur pelelehan (*Tm*) antara -14,89°C hingga -11,76°C serta salinitas 13,91 wt% NaCl *equivalent* sampai dengan 14,87 wt% NaCl *equivalent*.

Tabel 1. Pengukuran *Th*, *Tm* dan salinitas inklusi fluida sampel Ramba Joring

Deposit	Sampel	Tekstur	Ukuran (µm)	Tipe	Genesa	Th (°C)	Tm (°C)	Salinitas (wt% NaCl Equiv.)
Ramba Joring	RJ. D.3010876	<i>Brecciated</i>	5,48	Bifase (L-V)	Primer	328	- 13	14,49
			7,53	Bifase (L-V)	Primer	341	- 13	14,42
			10,28	Bifase (L-V)	Primer	288	- 12	14,01
			10,06	Bifase (L-V)	Primer	317	- 12	13,91
			7,76	Bifase (L-V)	Primer	336	- 13	14,42
			5,34	Bifase (L-V)	Primer	369	- 14	14,71
			3,61	Bifase (L-V)	Primer	376	- 13	14,49
			3,82	Bifase (L-V)	Primer	377	- 15	14,85
			3,32	Bifase (L-V)	Primer	373	- 15	14,87
			3,61	Bifase (L-V)	Primer	398	- 15	14,87
	D.3183702	<i>Brecciated</i>	2,88	Bifase (L-V)	Primer	373	- 15	14,87
			4,04	Bifase (L-V)	Primer	355	- 14	14,80
			5,86	Bifase (L-V)	Primer	389	- 15	14,85
			4,55	Bifase (L-V)	Primer	368	- 14	14,66
			3,41	Bifase (L-V)	Primer	356	- 13	14,42
			8,1	Bifase (L-V)	Primer	336	- 15	14,89
			6,71	Bifase (L-V)	Primer	336	- 15	14,87
			8,05	Bifase (L-V)	Primer	365	- 15	14,89
			11,62	Bifase (L-V)	Primer	331	- 15	14,85
			3,82	Bifase (L-V)	Primer	345	- 15	14,87
D.1146645	<i>Silica Vuggy</i>	7,04	Bifase (L-V)	Primer	394	- 15	14,87	
		2,61	Bifase (L-V)	Primer	336	- 15	14,85	
		5,09	Bifase (L-V)	Primer	341	- 13	14,42	
		4,75	Bifase (L-V)	Primer	369	- 15	14,89	
		3,49	Bifase (L-V)	Primer	345	- 15	14,87	



Gambar 2. Batuan tekstur *vuggy silica* (A1-A2) dan analisis inklusi fluida (B1-B2)



Gambar 3. Batuan tekstur *brecciated* (A1-A2) dan analisis inklusi fluida (B1-B2)

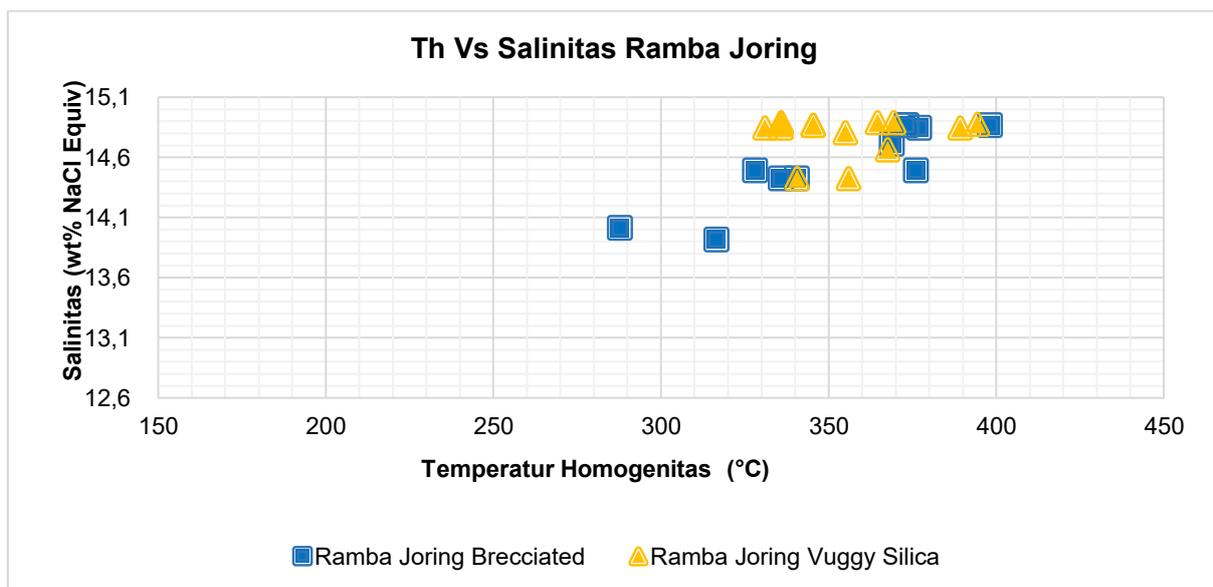
Pembentukan mineralisasi dapat ditentukan dari temperatur homogenisasi serta salinitas kandungan fluida. Grafik korelasi antara temperatur homogenisasi dengan salinitas larutan pada Gambar 4 menunjukkan bahwa pembentukan mineralisasi pada tekstur *brecciated* terjadi pada kedalaman 630 meter ($Th= 287,8^{\circ}C$, salinitas 13,9 wt% NaCl equiv.) dan 1.320 meter dibawah permukaan ($Th= 398,2^{\circ}C$, salinitas 15 wt% NaCl equiv.), sedangkan kedalaman pembentukan mineralisasi pada tekstur *vuggy silica* berada pada kedalaman 920 meter ($Th=331^{\circ}C$, salinitas 14,4 wt% NaCl equiv.) dan 1.310 meter di bawah permukaan ($Th=394^{\circ}C$, salinitas 15 wt% NaCl equiv.) Temperatur homogenitas dan salinitas yang ditemukan pada sampel inklusi fluida yang berasal dari *Pit* Ramba Joring menandakan bahwa proses *leaching* yang membentuk rongga pada batuan terjadi pada *stage* awal alterasi hidrotermal melalui proses *leaching* yang ditandai dengan terbentuknya tekstur *vuggy silica* pada batuan, yang diikuti oleh proses silisifikasi dengan tekstur breksiasi (*brecciated*). Pada fase ini berlangsung proses pengendapan mineralisasi dengan rentang suhu yang panjang (Gambar 5).

Komposisi fluida dengan salinitas ini menyebabkan terbentuknya alterasi *acid-sulfate* dengan mineral kuarsa-alunit-dikit-kaolinit-pirofilit yang berbeda dengan larutan pembawa logam (White, 1989; Arribas, 1995; Hedenquist *et al.*, 1998; Simmons *et al.*, 2005).

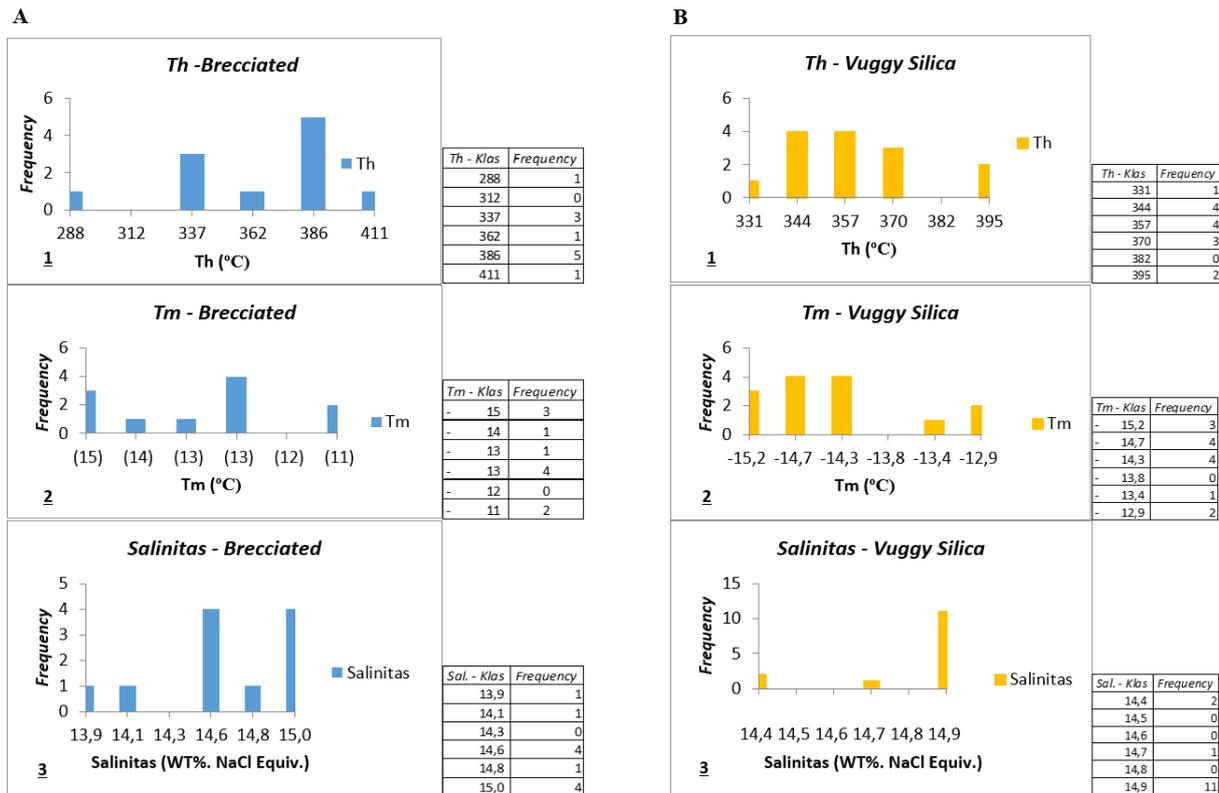
Tipe fluida yang terdapat dalam inklusi fluida *Pit* Ramba Joring menurut Nash, 1976 termasuk kedalam tipe *low-moderately salinity* yang terdiri dari 2 fase (*liquid-vapour*) dengan persentase antara 10% hingga >40%.

Kehadiran gelembung-gelembung udara mengindikasikan jebakan terjadi saat suhu tinggi dengan pembentukan gelembung pada saat pendinginan, sodium, potassium, kalsium dan klor ditemukan pada larutan dengan salinitas 0 wt% NaCl equivalent sampai dengan 23 wt% NaCl equivalent (Nash, 1976).

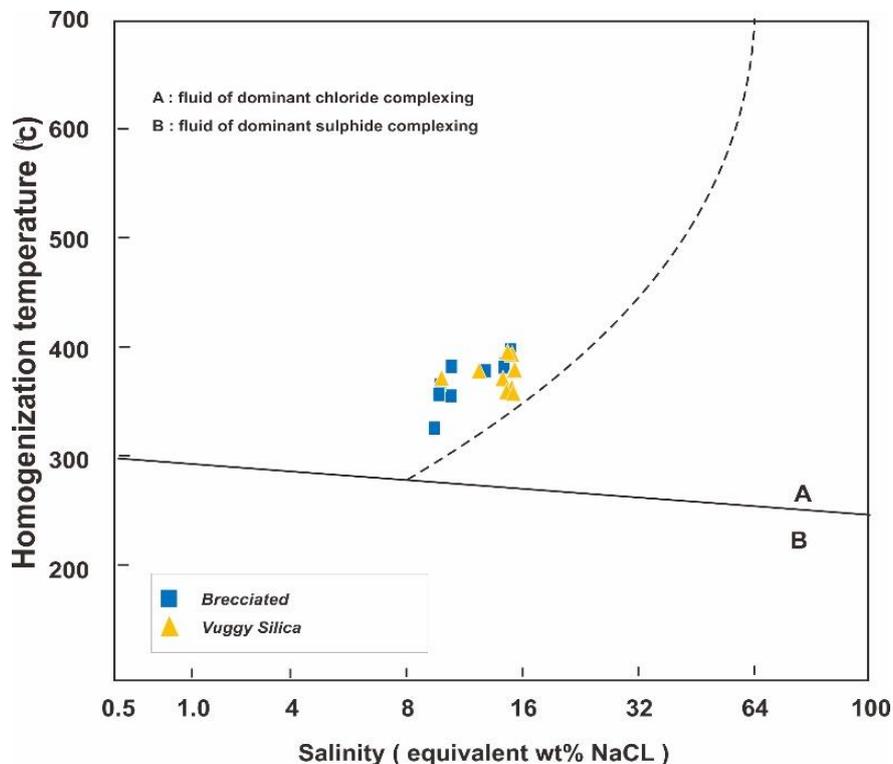
Penentuan kandungan fluida dalam inklusi dapat diidentifikasi dari temperatur homogenitas pembentukan mineralisasi terhadap salinitas fluida, yang kaya kandungan *chloride complexing* (Pirajno, 2009) (Gambar 6).



Gambar 4. Korelasi temperatur homogenitas ($Th^{\circ}C$) terhadap salinitas (wt% NaCl equivalent) pada keseluruhan fase/*stage* mineralisasi *Pit* Ramba Joring



Gambar 5. Diagram batang yang menunjukkan frekuensi Th (1), Tm (2) dan salinitas (3) pada fase brecciated dan vuggy silica



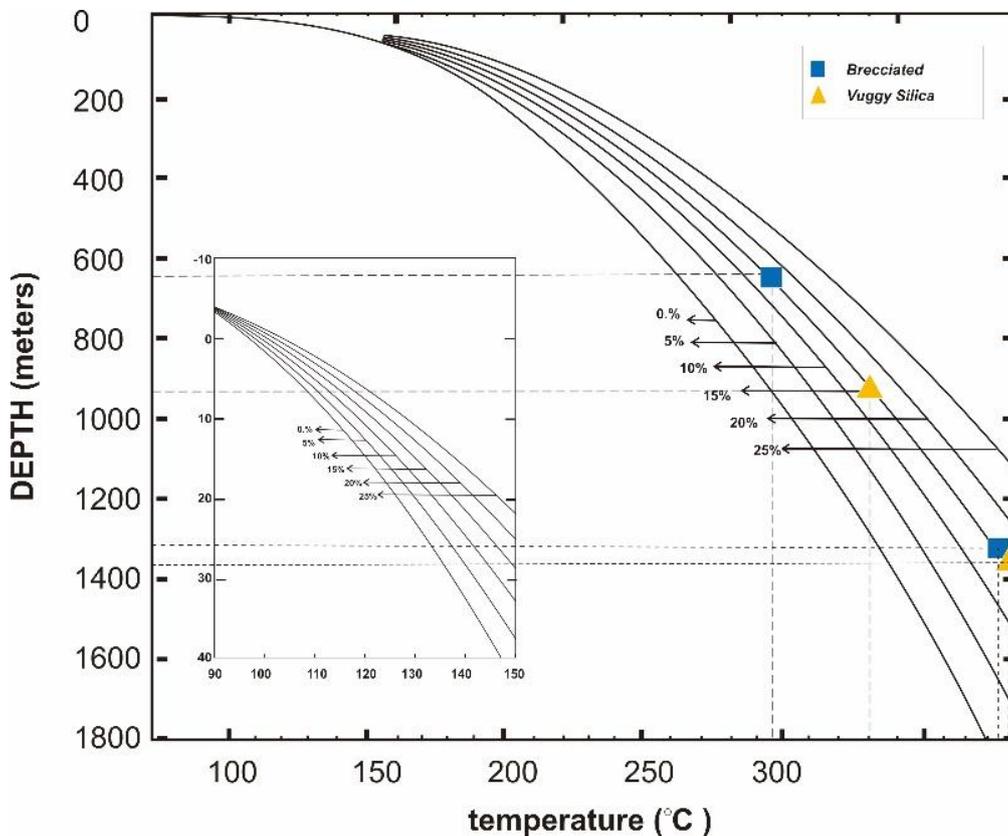
Gambar 6. Kurva temperatur homogenitas ($Th^{\circ}C$) terhadap salinitas ($wt\% NaCl$ equivalent) dalam penentuan batas larutan sulphide dan chloride sebagai ore bearing fluids, (Pirajno, 2009)

Identifikasi kedalaman saat fluida terjebak dalam proses mineralisasi menurut Haas (1971) (Gambar 7) menunjukkan bahwa fluida terbentuk pada rentang kedalaman 630 meter hingga 1.320 meter dibawah permukaan yang ditunjukkan dengan rentang temperatur homogenitas berkisar antara 287,8°C hingga 398,2°C serta rentang salinitas berkisar antara 13,91 wt% NaCl *equivalent* sampai dengan 14,89 wt% NaCl *equivalent*, dengan temperatur dan salinitas pembentukan fluida tersebut menunjukkan bahwa asal larutan yang menjadi larutan pembentuk endapan hidrotermal merupakan jenis larutan *basinal water-seawater* yang terjebak dalam bentuk *connate water* yang masih dipengaruhi oleh kehadiran air permukaan/*meteoric water* (Kesler, 2005) dan menunjukkan adanya hubungan dengan *magmatic water* (Gambar 8).

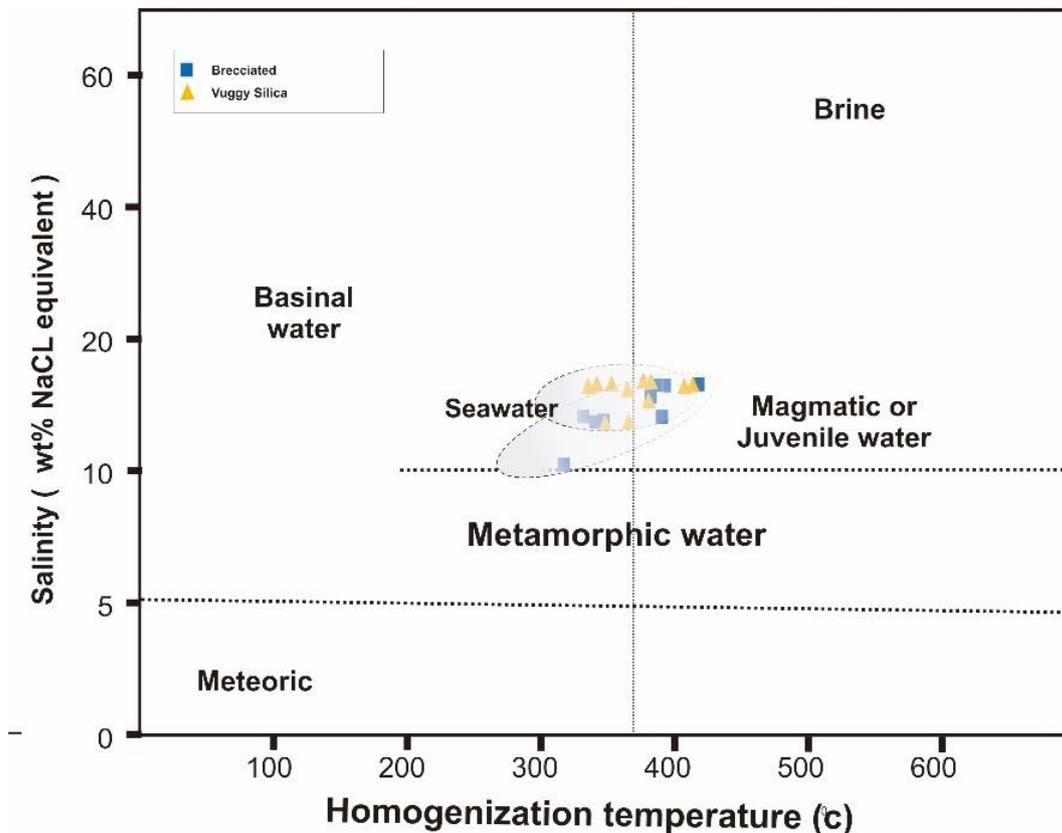
Proses evolusi fluida yang berlangsung dalam pembentukan bijih pada *Pit Ramba*

Joring secara dominan terbentuk melalui proses *isothermal mixing* dan sedikit pengaruh pemanasan/*boiling* dengan densitas fluida pembentukan bijih logam berkisar antara 0,8 gr/cm³ hingga 0,9 gr/cm³ (Gambar 9), dengan diketahuinya karakteristik fluida pembentuk alterasi dan mineralisasi, maka dapat pula diindikasikan jenis endapan yang terbentuk pada *Pit Ramba* Joring merupakan cebakan epitermal sulfidasi tinggi yang berhubungan dengan endapan porfiri (Sn-W),

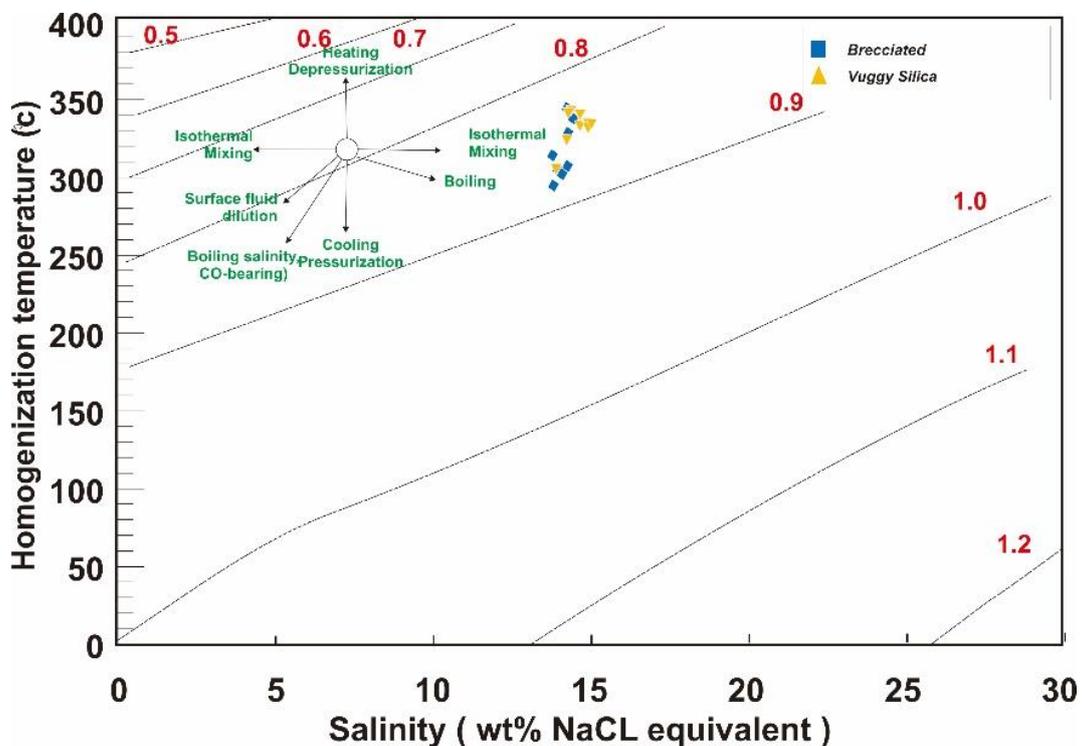
berdasarkan karakteristik temperatur homogenitas serta salinitas larutan mineralisasi, meskipun tidak dapat dijadikan sebagai acuan utama, namun dengan variabilitas natural parameter ini terdapat dalam sistem hidrotermal sehingga dapat dijadikan sebagai bahan perbandingan untuk penentuan tipe cebakan (Wilkinson, 2001) (Gambar 10).



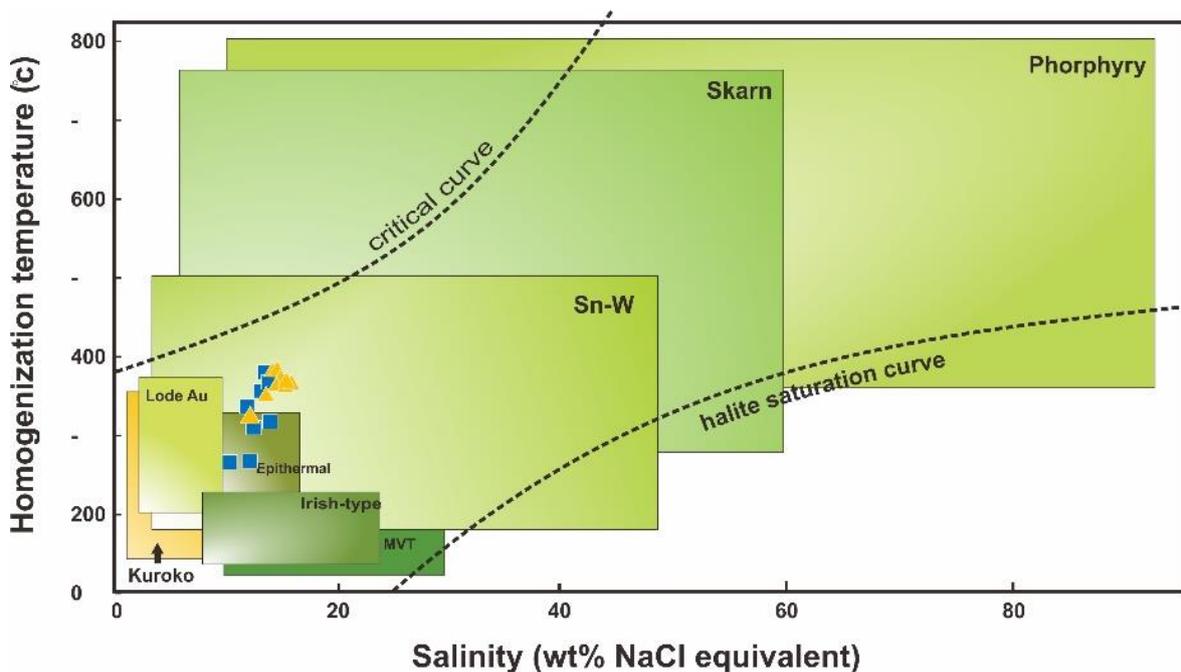
Gambar 7. Kurva penentuan kedalaman mineralisasi berdasarkan kurva Haas (1971)



Gambar 8. Kurva temperatur homogenitas ($Th^{\circ}C$) terhadap salinitas ($wt\% NaCl equivalent$) penentuan fluida pembawa ore/mineralisasi (*ore-bearing fluids*), (Kesler, 2005)



Gambar 9. Kurva penentuan densitas dan proses *ore bearing* berdasarkan kurva Bodnar, 1983



Gambar 10. Kurva penentuan sistem deposit alterasi dan mineralisasi berdasarkan temperatur homogenitas (T_h °C) dan salinitas (wt% NaCl equivalent), (Wilkinson, 2001)

KESIMPULAN

Saturasi fluida yang terdapat pada *Pit Ramba Joring* memiliki densitas sekitar 0,8 gr/cm³ hingga 0,9 gr/cm³ yang merupakan bagian dari sistem H₂O yang terbentuk pada kedalaman 630 meter hingga 1.320 meter dibawah permukaan. Pada kedalaman ini pembentukan larutan hidrotermal terjadi melalui proses *isothermal mixing* dengan sedikit pengaruh pemanasan/*boiling*. Temperatur pembentukan serta salinitas pada batuan dengan tekstur *brecciated* memiliki rentang yang panjang bila dibandingkan dengan temperatur serta salinitas batuan *vuggy silica*. Hal ini mengindikasikan bahwa terjadinya alterasi hidrotermal didahului dengan adanya letusan freatik yang membentuk batuan breksi *multiphase* kemudian dilanjutkan dengan proses *leaching* yang ditandai dengan pembentukan rongga/*vug* pada batuan. Komposisi fluida hidrotermal yang ditemukan pada deposit *Ramba Joring* menyebabkan terbentuknya alterasi *acid sulfate* dengan kehadiran mineral kuarsa-alunit-kaolinit-dikit-pirofilit dengan sejumlah

mineral bijih yang berbeda-beda dengan jenis larutan hidrotermal yang dominan klorida dengan lingkungan asal larutan hidrotermal pembawa mineralisasi berasal dari *basinal-sea water* yang berhubungan dengan *magmatic water*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim Mine Geology PT Agincourt Resource yang membantu dalam pengambilan sampel batuan serta Laboratorium Kimia Unit Geomin PT Antam Tbk yang membantu dalam analisis ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Pimpinan PT Agincourt Resource yang mengizinkan dalam penggunaan data dalam rangka penelitian dan publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arribas, Antonio Jr., 1995, Characteristic of High-Sulphidation Epithermal Deposits, and their Relation to Magmatic Fluid. Mineralogical Association of Canada short course. Vol. 23, hlm. 419-454.

- Bodnar, J Robert., 2003, *Fluid Inclusions – Analysis and Interpretation*. Samsons, A Anderson & D. Marshall (eds). Mineral Association Canada. Seri short course, vol. 32, hlm. 81-99.
- Haas, J. L., 1971, The effects on salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure. *Economic Geology* Vol. 66. Colorado: Society of Economic Geologist, Inc.
- Hedenquist, J. W., Arribas, Antonio Jr., Reynolds, T. J., 1998, Evolution of an Intrusion-Centered Hydrothermal System: Far Southeast Lepanto Porphyry and Epithermal Cu-Au Deposits, Philippines. *Economic Geology*. Vol. 93 (4), hlm. 373-404.
- Kesler, S. E., 2005, Ore-Forming Fluids. *Elements* 1. Hlm. 13-18.
- Lindgren, W., 1933, *Mineral deposits: New York*, McGraw-Hill, 930 hlm.
- Nash, J.T., 1976, Fluid Inclusion Petrology-Data from Porphyry Copper Deposit and Applications to Exploration. U.S. Geology Survey. Prof. Paper 907-D. 16 hlm.
- Pirajno, F., 2009, *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Perth: Springer.
- Randive, K., Hari, K. R., and Dora, M. L. 2014, Study of Fluid Inclusions: Methods, Techniques and Applications. *The Gondwana Geological Society: Gondwana Geological Magazine*. Vol. 29. No. 1 dan 2.
- Roedder, E., 1984, Fluid Inclusions. *Reviews in mineralogy*. Mineralogical Society of America, Washington. Vol.12, 644 hlm.
- Shepherd, T. J., A.H., Rankin & Alderton, D. M., 1985, *A Practical Guide to Fluid Inclusions Studies*. Blackie, Glasgow; Chapman and Hall, New York, 239 hlm.
- Simmons, S. F., N. C., White, and D. A., John, 2005, Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. In: Hedenquist JW, Thompson JFH, Goldfarb RJ, Richards JP (eds) *Economic Geology One Hundredth Anniversary Volume 1905–2005*. Society of Economic Geologists, Littleton. hlm.485–522.
- Sutopo, B, Brian K. Levet, and Gemmel Bruce J., 2013, Characteristics of Sub-Microscopic Gold and Trace Element Geochemistry of Enargite/Luzonite in the Martabe High Sulfidation Epithermal Deposits, North Sumatra, Indonesia.
- White, N. C., D. G., Wood. and Lee, M. C., 1989, Epithermal Sinters of Paleozoic Age in North Queensland, Australia. *Geology* 17, hlm.718–722.
- Wilkinson, J. J., 2001, Fluid Inclusion in Hydrothermal Ore Deposits. *Lithos* No. 55. Hlm. 229-272.

Diterima	: 4 Desember 2020
Direvisi	: 7 April 2021
Disetujui	: 25 Agustus 2021

**EVALUASI PENDAHULUAN POTENSI *UNDERGROUND COAL GASIFICATION*
DI CEKUNGAN SUMATRA SELATAN:
STUDI KASUS BATUBARA FORMASI MUARA ENIM**

***A PRELIMINARY EVALUATION OF UNDERGROUND COAL GASIFICATION POTENTIAL
IN THE SOUTH SUMATRA BASIN:
A CASE STUDY OF THE MUARA ENIM COAL FORMATION***

Eska P. Dwitama, M. Rizki Ramdhani dan R. Maria Ulfa
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
eska.dwitama@esdm.go.id

ABSTRAK

Salah satu cara memanfaatkan batubara bawah permukaan adalah dengan cara mengonversinya ke dalam bentuk gas yang lebih ramah lingkungan melalui metode *underground coal gasification* (UCG). Cekungan Sumatra Selatan adalah salah satu cekungan batubara produktif di Indonesia. Kegiatan evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui lokasi potensi batubara yang cocok untuk pengembangan UCG. Evaluasi potensi batubara Indonesia untuk pengembangan UCG di cekungan ini, dilakukan dengan cara mengarakterisasi lapisan batubaranya. Batubara cekungan Sumatra Selatan di Daerah Bayung Lencir, Muara Kilis, dan Srijaya Makmur dievaluasi karakteristiknya untuk melihat potensi UCG pada batubara tersebut. Parameter karakteristik yang dievaluasi meliputi peringkat, ketebalan, kemiringan dan kedalaman lapisan batubara, rasio kedalaman dan ketebalan lapisan batubara, batuan pengapit berikut ketebalannya, kondisi hidrogeologis (posisi batubara terhadap akuifer), struktur geologi serta sumber daya batubara. Hasil evaluasi menunjukkan, berdasarkan karakteristik batubaranya, daerah Bayung lencir merupakan daerah yang cocok untuk pengembangan UCG.

Kata kunci: karakteristik batubara, *underground coal gasification* (UCG), Cekungan Sumatra Selatan, Formasi Muaraenim

ABSTRACT

The Underground coal gasification (UCG) is one approach to make use of deep-seated coal by converting it to a more environmentally friendly gas. The South Sumatra Basin is one of Indonesia's productive coal basins. The objective of this study is to find a suitable coal deposit for the development of UCG. Characterizing the coal seams is used to evaluate the potential of Indonesian coal for UCG development in this area. Coal from the Bayung Lencir, Muara Kilis, and Srijaya Makmur areas were evaluated to see if there was any possibility for UCG in these coals. Coal rank, coal thickness, slope and depth of coal seams, the ratio of depth and thickness of coal seam, type of floor and roof rocks and their thickness, hydrogeological conditions (position of coal against aquifers), geological structure, and coal resources were among the parameters evaluated. Based on the parameters of the coal, the evaluation results reveal that Bayung Lencir is suitable area for UCG development.

Keywords: coal characteristics, *underground coal gasification* (UCG), South Sumatra Basin, Muaraenim Formation

PENDAHULUAN

Batubara di Indonesia sebagian besar merupakan batubara peringkat rendah hingga sedang, baik yang dapat ditambang secara terbuka maupun tambang dalam. Berdasarkan data neraca batubara tahun 2020 sumber daya batubara bawah permukaan, yaitu yang berada pada kedalaman 100-500 meter adalah sebesar 43,533 miliar ton dengan total cadangan 173,51 juta ton (PSDMBP, 2020). Batubara-batubara yang berada pada kedalaman lebih dari 100 meter dan tidak dapat ditambang secara terbuka tersebut dapat dimanfaatkan, salah satunya dengan metode *underground coal gasification* (UCG).

UCG merupakan teknologi pemanfaatan batubara yang dilakukan melalui konversi batubara secara *in-situ* dengan cara menyuntikkan udara atau oksigen melalui sumur injeksi untuk membakar lapisan batubara, yang kemudian dihasilkan gas untuk dialirkan melalui sumur produksi, selanjutnya diolah menjadi bahan bakar gas dan bahan penggunaan industri kimia lainnya (Burton *et al.*, 2006). Sampai saat ini penelitian dan pengembangan UCG telah dilakukan di berbagai negara seperti Tiongkok, Uzbekistan, Amerika Serikat, Australia, Polandia, Afrika Selatan dan negara lainnya termasuk Indonesia (Yang *et al.* 2014), seperti terlihat pada Gambar 1. Dari sekian banyak lapangan uji coba UCG di dunia, baru satu lokasi yang terbukti dapat dikembangkan secara komersial dan bertahan hingga saat ini, yaitu di Angren, Uzbekistan.

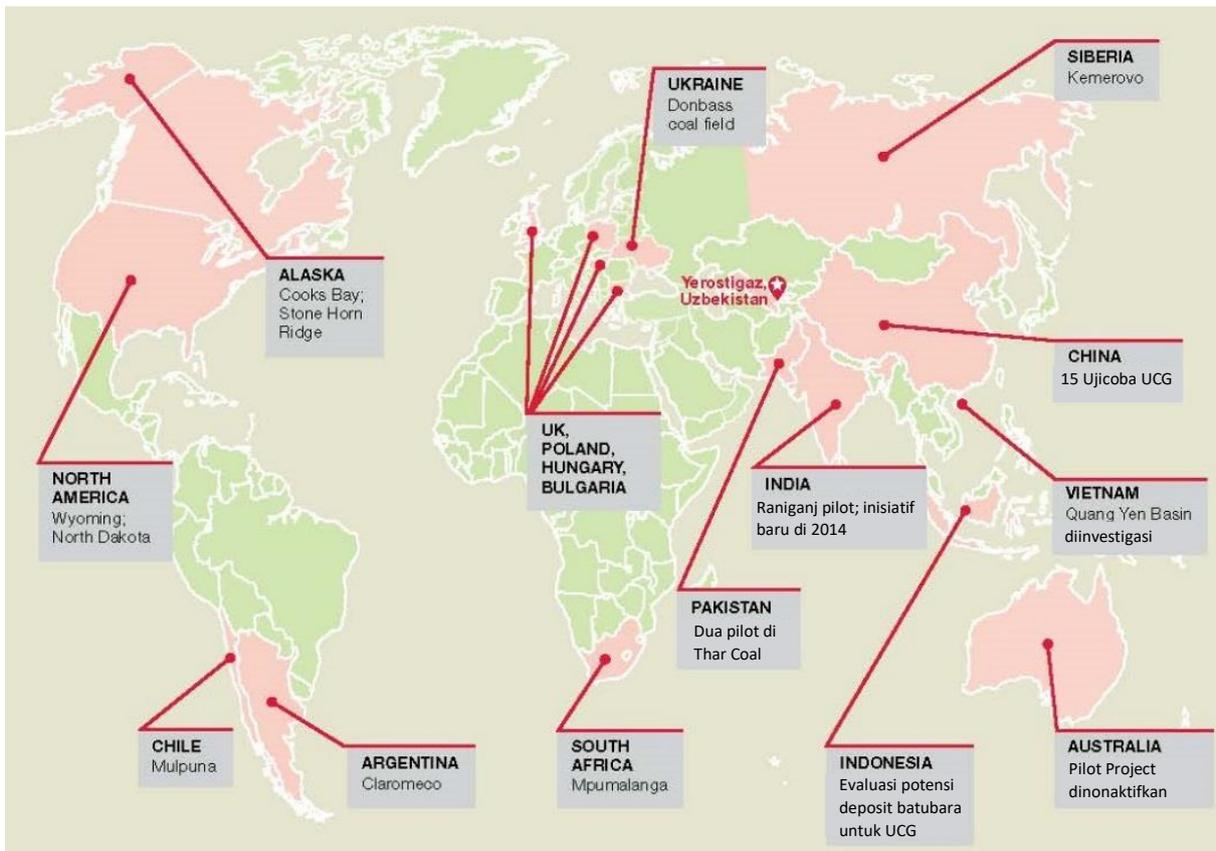
Di Indonesia, UCG merupakan salah satu metoda pengembangan dan pemanfaatan batubara yang tercantum dalam UU no 3 2020. Hingga saat ini, kajian yang berhubungan dengan potensi batubara Indonesia untuk pengembangan UCG masih sangat terbatas. Evaluasi awal potensi UCG ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui lokasi potensi batubara yang

cocok untuk pengembangan UCG. Evaluasi dilakukan pada wilayah dengan potensi batubara bawah permukaan (100-500 meter) di beberapa lokasi pada Cekungan Sumatra Selatan. Cekungan Sumatra Selatan dipilih karena merupakan salah satu cekungan penghasil batubara terbesar di Indonesia dengan data batubara bawah permukaan cukup memadai.

Studi evaluasi UCG ini dilakukan dengan menggunakan data hasil eksplorasi batubara bawah permukaan Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP) di Cekungan Sumatra Selatan, yaitu: data eksplorasi Bayung Lencir, Kabupaten Musi Banyuasin, Provinsi Sumatra Selatan (Simatupang, dkk., 2012); Muara Kilis, Kabupaten Tebo, Provinsi Jambi (Simatupang, dkk., 2013); dan Srijaya Makmur, Kabupaten Musi Rawas, Provinsi Sumatra Selatan (Tobing, 2014). Kegiatan evaluasi difokuskan pada karakterisasi batubara di tiga daerah tersebut dan tidak mencakup teknologi UCG yang berkembang saat ini dan kemungkinan aplikasinya di Indonesia.

METODOLOGI

Metode yang dilakukan dalam evaluasi potensi batubara untuk pengembangan UCG adalah studi pustaka, pembuatan parameter evaluasi, serta evaluasi data sesuai parameter yang telah ditentukan. Studi pustaka mencakup pengumpulan data sekunder hasil pengeboran berupa data log bor, data hasil analisis laboratorium, peta sebaran batubara dan laporan hasil kegiatan eksplorasi. Selanjutnya, data-data tersebut diolah dan dihubungkan dengan kriteria dan parameter pemilihan lokasi untuk pengembangan UCG. Hasil akhir berupa karakteristik batubara daerah evaluasi dihubungkan dengan parameter evaluasi serta rekomendasi wilayah prospek untuk pengembangan UCG.



Gambar 1. Lokasi-lokasi penelitian dan pengembangan UCG di dunia. Tanda bintang merupakan lokasi UCG yang komersial (dimodifikasi dari Yang *et al.*, 2014)

GEOLOGI REGIONAL

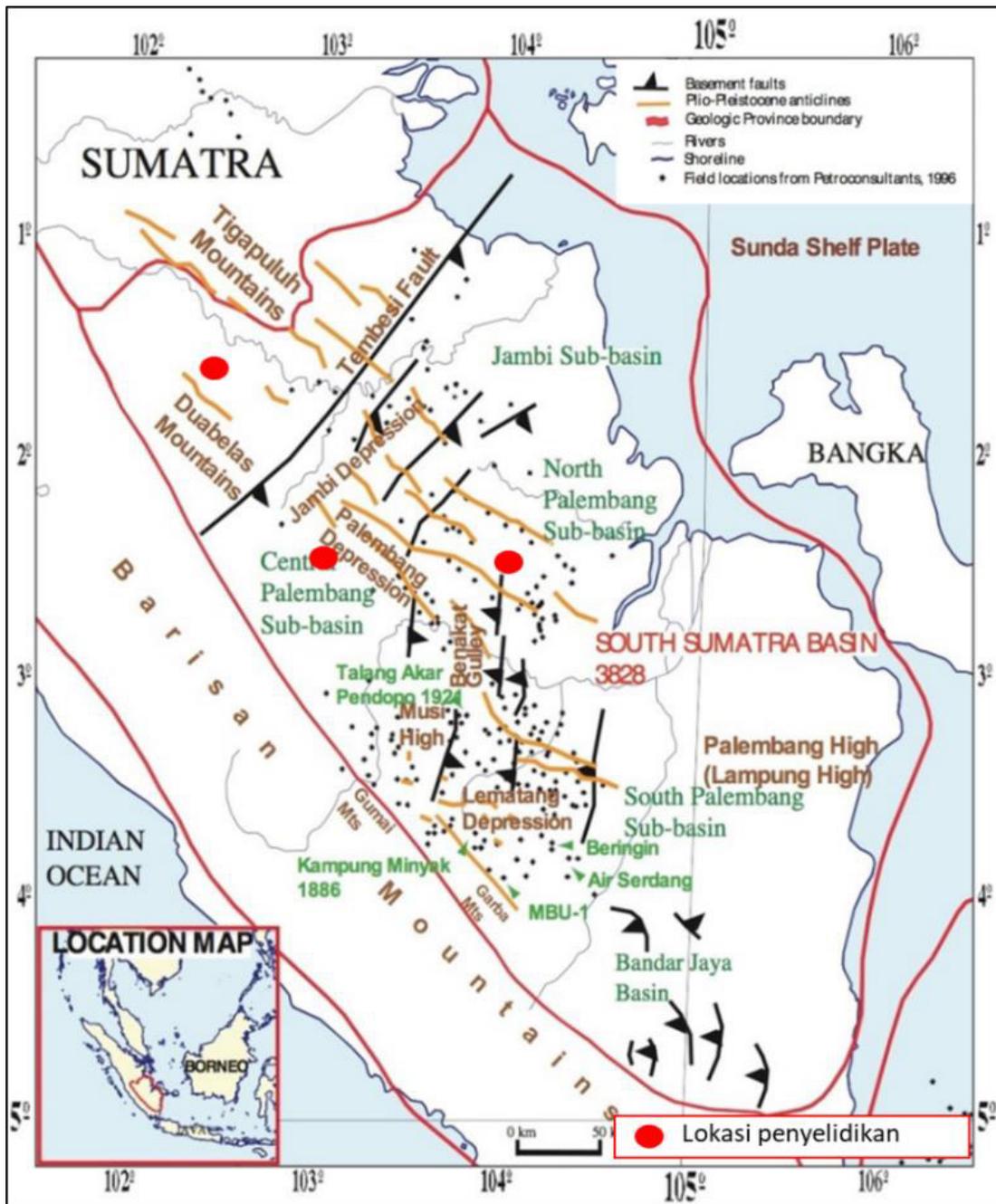
Pulau Sumatra terletak di sebelah barat daya Kontinen *Sundaland* dan merupakan jalur konvergensi antara Lempeng Hindia-Australia yang menyusup di sebelah barat Lempeng *Sundaland* atau Lempeng Eurasia. Konvergensi lempeng menghasilkan subduksi sepanjang Palung Sunda dan pergerakan lateral manganan dari Sistem Sesar Sumatra (Darman dan Sidi, 2000). Secara regional, daerah evaluasi termasuk dalam Cekungan Sumatra Selatan (Gambar 2). Cekungan ini terletak di sebelah timur Bukit Barisan dan menerus hingga ke timur laut hingga bagian lepas pantai. Cekungan ini merupakan cekungan belakang busur (Darman dan Sidi, 2000). Cekungan ini dibatasi oleh Tinggian Palembang dan Lampung di sebelah selatan. Tinggian ini juga memisahkan cekungan ini dengan Cekungan Sunda dan membatasi penyebaran batuan sedimen dari sumbernya pada saat Mesozoikum hingga

Tersier. Pada bagian utara, cekungan ini dibatasi oleh Pegunungan Tigapuluh yang juga memisahkannya dari Cekungan Sumatra Tengah. Pada bagian barat, cekungan ini dibatasi oleh Pegunungan Barisan berumur Plio- Plistosen (Bishop, 2001).

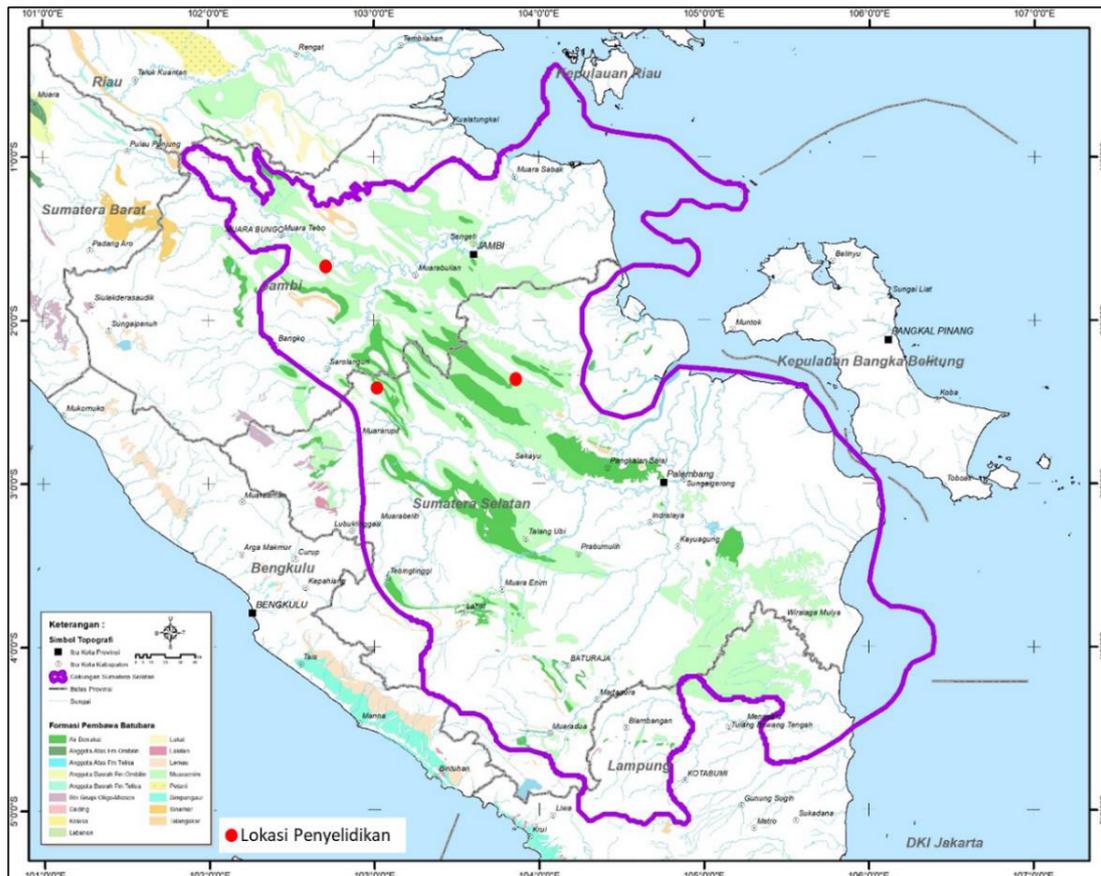
Stratigrafi daerah evaluasi merujuk pada Bishop (2001), peta geologi skala 1:250.000 Lembar Palembang oleh Gafoer dkk. (1995), Lembar Sarolangun oleh Suwarna dkk. (1994) dan Lembar Muarabungo oleh (Simanjuntak dkk., 1994). Kegiatan evaluasi difokuskan pada Formasi Muaraenim. Formasi ini merupakan formasi pembawa batubara utama di Cekungan Sumatra Selatan. Penyebaran Formasi Muaraenim (berwarna hijau muda pada Gambar 3) cukup luas pada Cekungan Sumatra Selatan, mencakup Provinsi Jambi di utara, hingga Provinsi Sumatra Selatan dan Provinsi Lampung di Selatan. Shell Mijnbouw (1978) membagi Formasi

Muaraenim atas empat anggota, yaitu: M1, M2, M3 dan M4. Pembagian tersebut didasarkan atas keberadaan lapisan-lapisan batubara tertentu pada masing-masing anggota tersebut. Menurut Shell Mijnbouw (1978), Merapi dan Keladi merupakan lapisan batubara utama pada

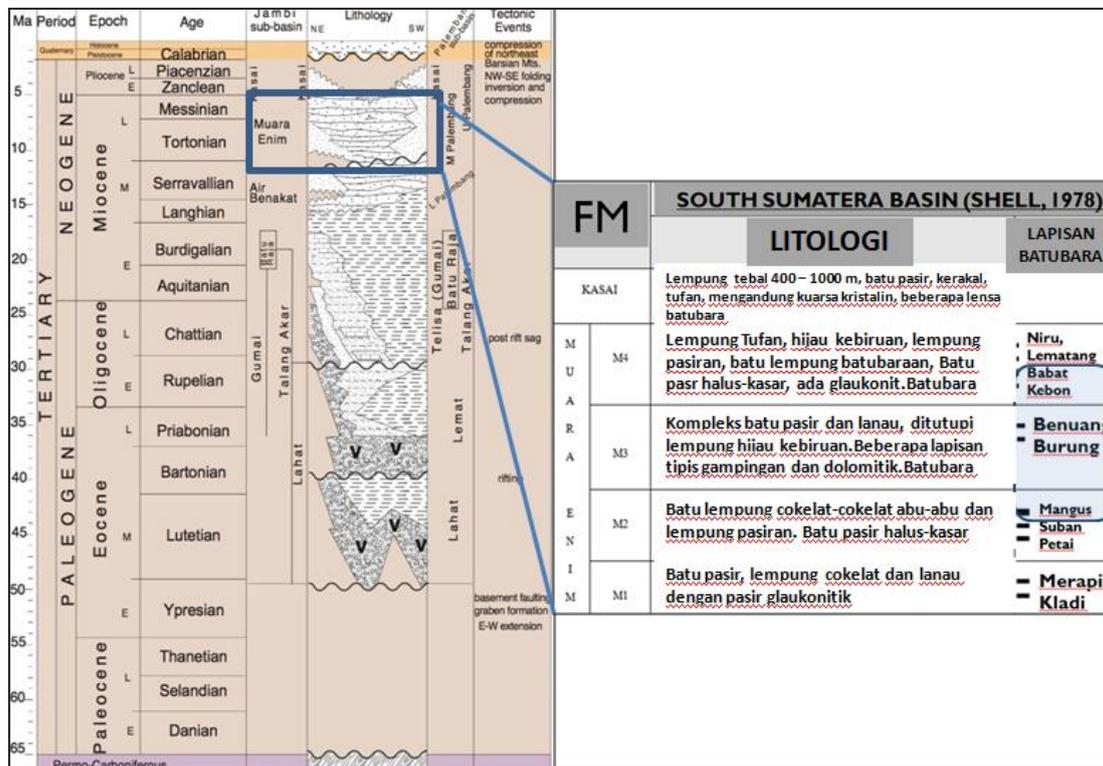
Anggota M1. Anggota M2 memiliki tiga lapisan utama batubara, yaitu Mangus, Suban dan Petai. Sementara lapisan batubara utama anggota M3 adalah Benuang dan Burung serta lapisan batubara anggota M4 adalah Niru, Lematang, Babat dan Kebon (Gambar 4).



Gambar 2. Tektonik Cekungan Sumatra Selatan (Bishop, 2001)



Gambar 3. Peta Sebaran Formasi Pembawa Batubara Cekungan Sumatra Selatan



Gambar 4. Kolom stratigrafi Cekungan Sumatra Selatan (Bishop, 2001) dan Anggota Formasi Muara Enim (Shell Mijnbouw, 1978)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter kriteria Evaluasi UCG

Untuk penyediaan data awal dan pemilihan lokasi untuk pengembangan UCG terdapat beberapa kriteria atau parameter yang perlu diperhatikan (Tabel 1).

Berikut penjelasan untuk masing-masing parameter:

Peringkat Batubara

Berdasarkan karakteristik struktur organik, batubara peringkat rendah lebih reaktif dibandingkan batubara peringkat tinggi, sehingga menjadi material yang baik bagi konversi kimia, seperti gasifikasi (Odeh, 2017). Berdasarkan hal tersebut peringkat batubara yang dianggap baik untuk UCG adalah batubara peringkat rendah, lignit

hingga subbituminus. Batubara peringkat tinggi seperti bituminus dapat dimanfaatkan untuk UCG, asalkan tidak memiliki sifat *coking/caking*. Dengan demikian peringkat batubara yang dapat dimanfaatkan untuk UCG adalah batubara lignit-bituminus *non-coking*. Dalam klasifikasi batubara Indonesia berdasarkan nilai kalori (Tabel 1), jenis batubara tersebut termasuk pada kategori batubara kalori rendah-tinggi. Untuk memilih jenis batubara dengan peringkat tersebut diatas, pemilahan awal dilakukan dengan cara mendata batubara dengan nilai kalori kurang dari 6.100 kal/gr (<6.100 kal/gr, adb). Untuk batubara dengan kalori lebih dari 6.100 kal/gr (>6.100 kal/gr, adb) perlu dilakukan analisis tambahan untuk melihat apakah batubara tersebut bersifat *coking/caking* atau tidak.

Tabel 1. Kriteria batubara untuk UCG (disarikan dari berbagai sumber: Sury *et al.* (2004), Shafirovich *et al.* (2008), Shafirovich dan Varma (2009), Couch (2009), Imran *et al.* (2012), Zulfahmi (2014), Madiutomo (2014), Huda (2014), Bielowicz dan Kasinski, (2015) dan komunikasi personal dengan Huda dan Andrey Chernisov (2019))

No.	Kriteria	Kondisi Minimum
1.	Peringkat batubara dan parameternya	Lignit-bituminus <i>non-coking</i>
	Nilai kalori	<6.100 kal/gr (kalori rendah-sedang) dan jika >6.100 kal/gr perlu dilakukan analisis <i>coking</i>
2.	Ketebalan batubara	>2 meter, untuk lignit (nilai kalori <5.100 kal/gr) tebalnya >3,5 meter
3.	Posisi kedalaman	>120 meter
4.	Rasio kedalaman dan ketebalan batubara	Kedalaman 120-200 meter rasio 22, kedalaman 200-300 meter rasio 18, kedalaman 300-400 meter rasio 15, kedalaman >400 rasio 15.
5.	Kemiringan lapisan	Baiknya <20°, batasnya <65°
6.	Batuan pengapit (<i>roof</i> dan <i>underburden</i>)	Impermeabel (batulempung dan batulanau)
7.	Ketebalan batuan pengapit	<i>Roof</i> 2 kali tebal batubaranya, <i>floor</i> 1 kali tebal batubaranya
8.	Kondisi hidrogeologis (posisi batubara terhadap akuifer)	>30 meter/25 kali tebal batubaranya (tergantung tebal <i>roof</i> yang impermeabel)
9.	Struktur geologi	Kondisi struktur sederhana, tidak ada rekahan atau sesar yang memengaruhi. Direkomendasikan terletak pada lipatan sinklin
10.	Sumber batubara daya	Minimum 2,5 juta ton pada area 1 km ²
11.	Jarak dari bukaan tambang	300 meter mengikuti arah kemiringan lapisan

Ketebalan Batubara

Beberapa ahli memiliki pendapat yang berbeda mengenai ketebalan minimum batubara untuk pengembangan UCG. Gastech (dalam Shafirovich dan Varma, 2009), mengindikasikan bahwa ketebalan optimal untuk UCG adalah lebih dari 10 meter, Ergo Exergy (dalam Shafirovich dan Varma, 2009) berpendapat bahwa UCG dapat diaplikasikan pada batubara berketebalan minimum 0,50 meter. Sementara *Former Soviet Union Project* memperlihatkan terjadi penurunan nilai panas yang menghasilkan gas pada ketebalan batubara di bawah 2 meter (Shafirovich dan Varma, 2009). Beberapa pendapat lain, mensyaratkan ketebalan batubara minimum 2 meter (diutamakan 5-10 m, Couch, 2009; Sury *et al.*, 2004), dengan ketebalan optimal dinilai sekitar 2-4 meter (Bielowicz dan Kasinski, 2015). Dalam menentukan ketebalan lapisan, hal lain yang perlu diperhatikan adalah peringkat batubaranya. Jika menggunakan batubara peringkat lignit (diasumsikan memiliki nilai kalori kurang dari 5.100 kal/gr) ketebalan minimum batubara yang dinilai baik untuk pengembangan UCG adalah 3,5 meter (komunikasi personal dengan Huda dan Andrey Chernisov, 2019).

Posisi Kedalaman Batubara

Kedalaman lapisan batubara beberapa proyek UCG dunia cukup bervariasi, mulai dari 12 meter hingga 1.200 meter (Burton *et al.*, 2006; Shafirovich & Varma, 2009). Di Indonesia, saat ini batubara mulai permukaan hingga kedalaman 100 meter dimanfaatkan untuk tambang terbuka. Untuk mengurangi resiko terjadinya amblesan, Burton *et al.* (2006) merekomendasikan, kedalaman yang baik untuk pengembangan UCG adalah lebih

dalam dari 200 meter. Terkait dengan aspek keekonomian dan tingkat kesulitannya, kedalaman sebaiknya tidak lebih dari 800 meter. Berdasarkan hasil komunikasi personal dengan pakar UCG disimpulkan bahwa kedalaman minimum lapisan batubara yang dapat dikembangkan untuk UCG adalah 120 meter tetapi dengan memperhatikan nilai minimum rasio antara kedalaman batubara dan ketebalannya (komunikasi personal dengan Andrey Chernisov, 2019).

Rasio Kedalaman dan Ketebalan Batubara

Minimum rasio kedalaman dan ketebalan batubara berguna untuk menghindari terjadinya amblesan karena hilangnya sebagian lapisan batubara akibat proses gasifikasi. Nilai rasio minimum secara umum dapat digambarkan berbanding terbalik dengan kedalamannya. Semakin dalam posisi kedalaman batubaranya, semakin kecil nilai rasio yang disyaratkan (Tabel 2). Akan lebih baik bila nilai rasionya lebih besar dari yang disyaratkan, namun nilai minimum ketebalan yang disyaratkannya pun perlu diperhatikan.

Kemiringan Lapisan Batubara

Menurut Bielowicz dan Kasinski (2014) dan Sury *et al.* (2004) kemiringan lapisan batubara yang landai baik untuk pengembangan UCG. GasTech (2007) dalam laporannya merekomendasikan kemiringan lapisan batubara 0°-20° untuk UCG sedangkan proyek UCG yang telah berhasil melakukan gasifikasi di Rusia merekomendasikan kemiringan lapisan <65°. Dalam kegiatan evaluasi ini persyaratan karakteristik kemiringan lapisan yang dipilih untuk menentukan wilayah prospek UCG adalah <65°.

Tabel 2. Nilai rasio kedalaman batubara dan ketebalan batubara yang direkomendasikan untuk UCG*

Kedalaman Lapisan Batubara	Nilai Rasio Minimum, Kedalaman dan Ketebalan Batubara	Ketebalan Batubara
120-200	22	5
200-300	18	11
300-400	15	20
>400	15	27

*komunikasi personal dengan Andrey Chernisov dalam acara *knowledge sharing UCG* di Tekmira tahun 2019)

Batuan Pengapit (*roof* dan *floor rock*) dan Ketebalannya

Jenis batuan pengapit yang direkomendasikan untuk UCG adalah batuan yang memiliki permeabilitas yang rendah, atau lebih disarankan yang *impermeabel* gunanya adalah untuk mencegah kebocoran gas dan kontaminasi terhadap airtanah (Huda, 2014 dan Madiutomo, 2014). Dalam hal ini, jenis batuan yang memiliki permeabilitas rendah antara lain adalah batulempung dan batulanau. Untuk UCG batuan pengapit jenis batulempung lebih direkomendasikan. Ketebalan batuan pengapit yang direkomendasikan untuk pengembangan UCG cukup beragam, Oliver dan Covell (1989) dalam Bielowicz dan Kasinski (2015) mengestimasi minimum ketebalan bagian *roof* yang *impermeable* adalah 15 meter. Dalam kegiatan evaluasi ini, ketebalan minimum lapisan batuan pengapit yang digunakan untuk menentukan wilayah prospek diperoleh berdasarkan komunikasi personal penulis dengan Huda dan Andrey Chernisov (2019), yaitu dua kali tebal batubaranya untuk *roof* dan satu kali tebal batubaranya untuk *floor*-nya.

Kondisi Hidrogeologis (posisi batubara terhadap akuifer)

Jarak antara batubara target dengan lapisan akuifer aktif, direkomendasikan berjarak vertikal ≥ 30 meter (25 kali) tebal batubaranya (tergantung tebal *roof*-nya yang *impermeabel*) (Mastalerz *et al.*, 2011 dan Nowak *et al.*, 2010 dalam Bielowicz and Kasinski, 2015). Diperlukan kajian ulang mengenai keterhubungan akuifer dengan sumber air masyarakat pada daerah yang berada di wilayah bekas tambang. Apabila akuifer tidak terhubung, maka jarak minimumnya bisa dikatakan dapat diabaikan.

Struktur Geologi

Kondisi lokasi yang disarankan adalah lokasi yang memiliki pengaruh struktur geologi sederhana (Bielowicz dan Kasinski, 2015; Zulfahmi, 2014). Struktur geologi sederhana memperlihatkan ketiadaan rekahan atau sesar yang memengaruhi batubara secara langsung, apabila ada

besar pergeseran sesarnya tidak lebih dari setengah tebal batubaranya. Akan lebih baik apabila struktur pada batubara tersebut berupa lipatan sinklin (komunikasi personal dengan Huda dan Andrey Chernisov, 2019).

Sumber Daya Batubara

Total sumber daya batubara yang ekonomis untuk pengembangan UCG masih bersifat tentatif. Total minimum sumber daya batubara disesuaikan dengan pemanfaatan gas untuk industri ataupun kapasitas *power plant* serta lamanya waktu pengoperasian. Total batubara yang banyak direkomendasikan adalah lebih 2,5-3,5 juta ton per 1 km² (Bielowicz dan Kasinski, 2015 dan komunikasi personal dengan Huda dan Andrey Chernisov, 2019).

Jarak dari Bukaan Tambang

Jika lokasi yang dievaluasi berada dekat area penambangan atau area bekas tambang, jarak minimum yang direkomendasikan untuk menghindari keluarnya gas ke areal tersebut adalah 300 meter mengikuti arah kemiringan lapisan, dalam evaluasi kali ini hali ini tidak diperhitungkan karena penulis tidak mengetahui kondisi terkini lokasi-lokasi yang dievaluasi.

Penentuan wilayah prospek

Setelah parameter evaluasi ditentukan, kegiatan evaluasi dilakukan pada data hasil eksplorasi batubara di daerah Bayung Lencir, Muara Kilis, dan Srijaya Makmur, Provinsi Sumatera Selatan.

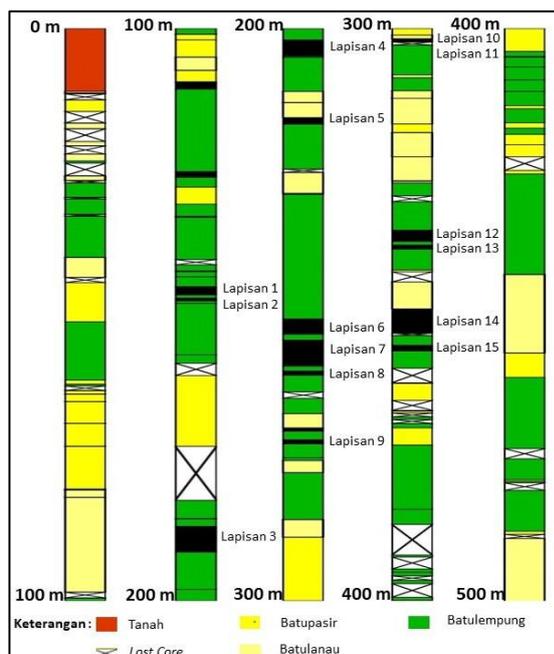
Data masing-masing lokasi selanjutnya dikumpulkan dan dipilah sesuai parameter evaluasi yang tertera pada Tabel 1. Hal tersebut dilakukan untuk menentukan wilayah prospek atau memilih lokasi yang cocok untuk pengembangan UCG. Hasil evaluasi terhadap karakteristik batubara untuk setiap lokasi terdapat pada tabel 3.

Sebagai catatan, pada daerah dengan multi lapisan batubara, disarankan hanya memilih satu lapisan yang paling prospek untuk dikonversi menjadi gas melalui

metode UCG (komunikasi personal dengan Andrey Chernisov dan Huda, 2019), sehingga dalam evaluasi ini dari setiap area dipilih satu lapisan batubara yang dinilai paling cocok untuk pengembangan UCG. Berikut adalah hasil evaluasi untuk setiap daerah:

Bayung Lencir

Ketersediaan batubara di daerah Bayung Lencir dibuktikan dengan pengeboran pada titik bor PNG-01 dengan total kedalaman 515,55 meter. Penampang stratigrafi titik bor PNG-01 ditunjukkan oleh Gambar 5. Jumlah lapisan batubara yang terdapat pada titik bor ini adalah 15 buah. Lapisan batubara tersebut merupakan bagian dari lapisan M3 dan M2 Formasi Muara Enim, dengan ketebalan bervariasi antara 0,5 meter hingga 4,55 meter. Lapisan batubara M3 diperkirakan diwakili oleh lapisan batubara 1 sampai 5. Lapisan batubara utama diwakili oleh lapisan 3, 4 dan 5. Sementara lapisan batubara yang lainnya diperkirakan sebagai lapisan batubara gantung yang lapisannya tidak menerus. Sementara lapisan batubara 6 hingga 15 diperkirakan merupakan bagian dari lapisan M2, dengan lapisan batubara 7 merupakan lapisan batubara paling tebal.



Gambar 5. Penampang stratigrafi PNG-01 kedalaman 0 sampai 500 meter

Evaluasi dan karakterisasi batubara untuk pengembangan UCG dilakukan pada 15 lapisan batubara tersebut. Berdasarkan hasil evaluasi, dari 15 lapisan batubara tersebut hanya terdapat 3 lapisan batubara yang memiliki tingkat kecocokan paling banyak terhadap kriteria yang telah dibuat, yaitu lapisan batubara 4, 6 dan 7. Untuk pengembangan UCG, lapisan batubara 7 paling tebal dibandingkan dengan lapisan batubara lainnya, sehingga pada luas area yang sama akan memiliki jumlah sumber daya lebih besar. Semakin besar sumber daya batubaranya, maka akan semakin ekonomis proses UCG yang akan dijalankan karena memperpanjang umur operasi.

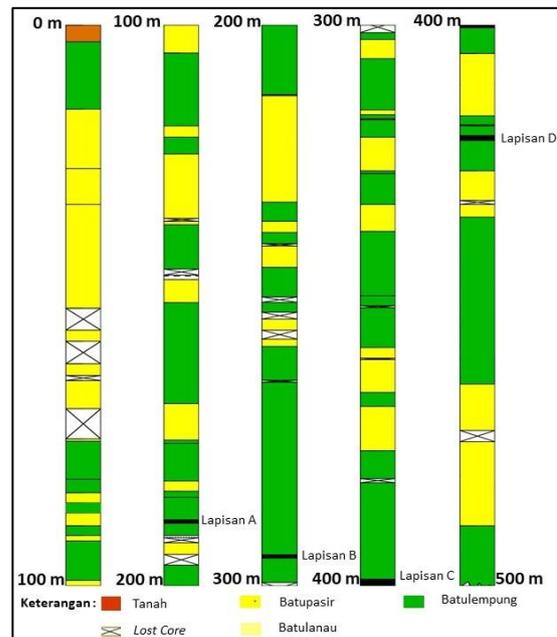
Seperti telah diuraikan sebelumnya disamping ketebalan, parameter lain yang juga harus diperhatikan adalah tebal dan rasio batuan pengapit bagian atas (*roof*). Tebal batuan pengapit atas pada lapisan batubara 7 hanya 1,03 meter, sehingga jika dibandingkan dengan tebal batubaranya, memiliki rasio 0,23 (rasio tebal batubara dan *roof*-nya di bawah 0,5). Nilai rasio tersebut dinilai cukup berbahaya untuk pengembangan UCG (Madiutomo, 2014 dan Shafirovich and Varma, 2009). Walaupun demikian, evaluasi lebih lanjut menunjukkan bahwa antara lapisan batubara 6 dan 7 hanya dibatasi oleh *interburden* dengan tebal sekitar 1,03 meter. Hal tersebut mengindikasikan kemungkinan lapisan batubara 6 dan 7 merupakan satu lapisan batubara yang sama, tapi mengalami *splitting* pada titik pengeboran tersebut. Jika kedua lapisan batubara tersebut diasumsikan sebagai satu lapisan batubara, maka jumlah sumber daya yang dapat digunakan untuk UCG dapat dihitung lebih besar atau menjadi lebih kecil. Jumlah sumber daya bernilai lebih besar, jika lapisan batubara target tersebut *interburden*-nya tidak dianggap mengganggu untuk dapat digasifikasi. Bernilai lebih kecil, bila *interburden*-nya tebal dan dianggap mengganggu proses gasifikasi. Pada proses UCG, apabila ditemukan *splitting* pada lapisan batubara target dan *interburden*-nya dianggap mengganggu,

maka batubara yang dipilih untuk dilakukan gasifikasi adalah batubara pada lapisan atas saja, sehingga jumlah sumber daya yang dapat dimanfaatkan menjadi lebih kecil (komunikasi personal dengan Huda dan Andrey Chernisov, 2019).

Data menunjukkan, pada luas area 1km², lapisan batubara 6 memiliki jumlah sumber daya sebesar 3,497 juta ton, sementara lapisan batubara 7 sebesar 5,915 juta ton. Berdasarkan hasil evaluasi, dianggap bahwa lapisan batubara 6 dan 7 merupakan satu lapisan batubara yang sama, sehingga rasio tebal batubara dan roof dari lapisan batubara 7 sebetulnya lebih tinggi dari 1,03 meter. Dengan demikian, lapisan batubara yang dianggap paling cocok untuk pengembangan UCG adalah lapisan batubara 6 dan 7 dengan total sumber daya 9,412 juta ton pada luas area 1 km² dan terdapat pada kedalaman 250,73 meter.

Muara Kilis

Pada daerah Muara Kilis, keterdapatn potensi batubara bawah permukaan dibuktikan dengan pengeboran pada titik bor PTS-01 dengan total kedalaman 500,30 meter. Penampang stratigrafi titik bor PTS-01 ditunjukkan oleh Gambar 6. Jumlah lapisan batubara yang ditembus berjumlah 4 buah, merupakan Formasi Muara Enim dengan ketebalan bervariasi dari 0,6 meter hingga 1,7 meter (lapisan batubara A, B, C dan D). Lapisan batubara C merupakan lapisan batubara paling tebal pada daerah ini, dengan ketebalan 1,7 meter. Namun hasil evaluasi menunjukkan (Tabel 3), ketebalan lapisan batubara C tidak memenuhi parameter ketebalan batubara yang cocok untuk UCG. Karakteristik lapisan batubara C lainnya, secara umum juga tidak memenuhi parameter yang dipersyaratkan, seperti posisi batubara terhadap akuifer dan besar sumber dayanya. Berdasarkan hasil evaluasi di atas, batubara Muara Kilis pada wilayah pengeboran PSDMBP dianggap tidak memiliki lapisan batubara yang cocok untuk dikembangkan melalui kegiatan UCG.



Gambar 6. Penampang stratigrafi PTS-01 kedalaman 0 sampai 500 meter

Srijaya Makmur

Daerah Srijaya Makmur memiliki potensi batubara yang dibuktikan dengan pengeboran pada titik bor MRU-01 dengan total kedalaman 503,40 meter. Penampang stratigrafi titik bor MRU-01 ditunjukkan oleh Gambar 7. Jumlah lapisan batubara yang ditembus oleh pengeboran adalah 10 buah yang merupakan Formasi Muara Enim dengan ketebalan batubara bervariasi dari 0,3 meter hingga 1,9 meter. Lapisan-lapisan tersebut diberi nama lapisan batubara 1 sampai 10.

Evaluasi batubara Srijaya Makmur difokuskan pada dua lapisan batubara, yaitu lapisan batubara 2 dengan ketebalan 1,5 meter dan lapisan batubara 3 dengan ketebalan 1,9 meter. Seperti dapat dilihat pada Tabel 3, lapisan batubara 2 tidak memenuhi tiga kriteria parameter, sedangkan lapisan batubara 3 tidak memenuhi empat kriteria parameter. Hasil evaluasi menunjukkan pada daerah Srijaya Makmur tidak ditemukan lapisan batubara yang cocok untuk pengembangan UCG.

Tabel 3. Hasil Evaluasi Karakteristik Batubara Cekungan Sumatra Selatan (Bagian 1)

No.	Kriteria	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		Bayung Lencir lapisan batubara																			
1	Peringkat batubara dan parameternya	4915		5370	5534	5493	5645	5913													
2	Nilai kalori (kall/gr. adb)	1,45	0,5	4,5	2,85	1,05	2,69	4,55	0,95	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
3	Ketebalan batubara (meter)	144,75	146,7	187	202	215,4	250,73	254,45	259,65	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8	269,8
4	Posisi kedalaman (meter)	99,83	293,40	41,56	70,88	205,14	93,21	55,92	273,32	490,55	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73	548,73
5	Rasio kedalaman dan ketebalan batubara (120-200m rasio 22, 200-300m rasio 18, 300-400m rasio 15, >400m rasio 15)																				
6	Kemiringan lapisan (°)																				
7	Batuan pengapit (roof dan floor)																				
8	a. Jenis roof*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	b. Tebal roof (meter)	14,4	0,55	4,55	10,5	2,62	21,73	1,03	0,85	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
10	c. Rasio roof dengan batubara	9,93	1,10	1,01	3,68	2,50	8,08	0,23	0,89	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55
11	d. Jenis floor	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	e. Tebal floor (meter)	0,55	9,4	10,5	10,72	7,82	1,03	8,3	2,9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
13	f. Rasio floordengan batubara	0,38	18,80	2,33	3,76	7,45	0,38	1,82	3,05	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73	2,73
14	7 Kondisi hidrogeologis/jarak batubara terhadap akuifer (meter)	14,4	16,4	4,55	19,55	32,95	68,28	72	77,4	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35	87,35
15	8 Struktur geologi**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	9 Sumber daya batubara (juta ton)	1,885	0,65	5,85	3,705	1,365	3,497	5,915	1,235	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715	0,715
17	10 Jarak dengan bukaan tambang (meter)																				
18	Tidak cocok/tidak memenuhi kriteria																				
19	Cocok/memenuhi kriteria																				
20	Tidak ada data atau tidak dijadikan acuan																				

* angka 1 = batulempung dan batulanau, angka 2 = batuan lain

** angka 1 = geologi sederhana, 2 = moderat, dan 3 = kompleks

Tabel 3. Hasil Evaluasi Karakteristik Batubara Cekungan Sumatra Selatan (Bagian 2)

No.	Kriteria	Bayung Lencir seam 11	Bayung Lencir seam 12	Bayung Lencir seam 13	Bayung Lencir seam 14	Bayung Lencir seam 15	Muara Kilis seam A	Muara Kilis seam B	Muara Kilis seam C	Muara Kilis seam D	Murata seam 1
1	Peringkat batubara dan parameternya		5669	6001			3972	5684	5402	5795	
2	Nilai kalori (kal/gr. adb)	0,5	1,95	0,7	4,25	1	0,65	0,6	1,7	1	1,25
3	Ketebalan batubara (meter)	308,1	335,25	337,85	349	355,35	188,2	294,45	398,8	419,6	319,4
4	Posisi kedalaman (meter)	616,20	171,92	482,64	82,12	355,35	289,54	490,75	234,59	419,60	255,52
5	Rasio kedalaman dan ketebalan batubara (120-200m rasio 22, 200-300m rasio 18, 300-400m rasio 15, >400m rasio 15)										
5	Kemiringan lapisan (°)						10	10	10	10	10
6	Batuan pengapit (roof dan underburden)										
	a. Jenis roof*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	b. Tebal roof (meter)	5,2	8,25	0,65	4,7	2,1	5,1	37,15	22,9	3,5	3
	c. Ratio roof dengan batubara	10,40	4,23	0,93	1,11	2,10	7,85	61,92	13,47	3,50	2,40
	d. Jenis underburden	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	e. Tebal floor(meter)	2,28	5	3,65	2,1	3	2,15	4,35	4,6	5,4	11,7
	f. Ratio floordengan batubara	4,56	2,56	5,21	0,49	3,00	3,31	7,25	2,71	5,40	9,36
7	Kondisi hidrogeologi /jarak batubara terhadap akuifer (meter)	6,95	17,05	19,65	4,7	11,05	5,1	37,15	22,9	3,5	11,9
8	Struktur geologi	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	Sumber daya batubara (juta ton)	0,65	2.535	0,91	5.525	1,3	0,845	0,78	2,21	1,3	1.625
10	Jarak dengan bukaan tambang (meter)										
	Tidak cocok/tidak memenuhi kriteria										
	Cocok/memenuhi kriteria										
	Tidak ada data atau tidak dijadikan acuan										

* pada jenis roof dan floor angka 1 = batulempung dan batulanau, sedangkan angka 2 = selain keterangan angka 1

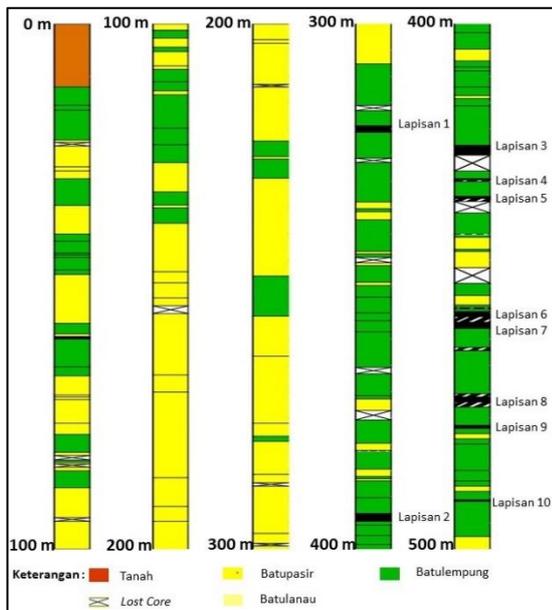
* pada struktur geologi: angka 1 = geologi sederhana, 2 = moderat, dan 3 = kompleks

Tabel 3. Hasil Evaluasi Karakteristik Batubara Cekungan Sumatra Selatan (Bagian 3)

No.	Kriteria	Muratara seam 2	Muratara seam 3	Muratara seam 4	Muratara seam 5	Muratara seam 6	Muratara seam 7	Muratara seam 8	Muratara seam 9	Muratara seam 10
1	Peringkat batubara dan parameternya	5446	5653	1091	4019	6010	1796	1555	5524	5900
2	Nilai kalori (kal/gr. adb)	1,5	1,9	0,25	0,33	1	1,2	0,9	0,5	0,3
3	Ketebalan batubara (meter)	393,2	423,1	429,45	432,9	454,75	456,8	471	476,4	490,55
4	Posisi kedalaman (meter)	262,13	222,68	1717,80	1311,82	454,75	380,67	523,33	952,80	1635,17
5	Ratio kedalaman dan ketebalan batubara (120-200m rasio 22, 200-300m rasio 18, 300-400m rasio 15, >400m rasio 15)									
6	Kemiringan lapisan (°)									
7	Batuan pengapit (roof dan underburden)									
8	a. Jenis roof	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	b. Tebal roof (meter)	6,2	8,9	1,45	3	1,5	1,05	8,8	4,3	1,6
10	c. Ratio roof dengan batubara	4,13	4,68	5,80	9,09	1,50	0,88	9,78	8,60	5,33
11	d. Jenis floor	1	2	1	1	1	1	1	1	1
12	e. Tebal floor (meter)	10,1	3	3,1	7,37	1,05	4,3	4,3	1	7
13	f. Ratio floor dengan batubara	6,73	1,58	12,40	22,33	1,05	3,58	4,78	2,00	23,33
14	7 Kondisi hidrogeologis/jarak batubara terhadap akuifer (meter)	7,15	16,05	1,45	4,55	1,5	2,55	17,5	21,8	1,6
15	8 Struktur geologi	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	9 Sumber daya batubara (juta ton)	1,95	2,47	0,325	0,429	1,3	1,56	1,17	0,65	0,39
17	10 Jarak dengan bukaan tambang (meter)									
18	Tidak cocok/tidak memenuhi kriteria									
19	Cocok/memenuhi kriteria									
20	Tidak ada data atau tidak dijadikan acuan									

* pada jenis roof dan floorangka 1 = batulempung dan batulanau, sedangkan angka 2 = selain keterangan angka 1

* pada struktur geologi, angka 1 = geologi sederhana, 2 = moderat, dan 3 = kompleks



Gambar 7. Penampang stratigrafi MRU-01 kedalaman 0 sampai 500 meter

Berdasarkan hasil evaluasi, hanya satu dari tiga lokasi yang memenuhi hampir seluruh kriteria parameter yang dibutuhkan untuk pengembangan UCG, yaitu Daerah Bayung Lencir. Oleh karena itu, fokus kegiatan eksplorasi batubara untuk pengembangan UCG dapat dilakukan pada wilayah sekitar daerah tersebut seperti ditampilkan pada peta Gambar 1.

KESIMPULAN

Kegiatan evaluasi pendahuluan potensi UCG pada batubara Indonesia dilakukan pada tiga daerah di Cekungan Sumatra Selatan, yaitu Bayung Lencir, Muara Kilis dan Srijaya Makmur. Berdasarkan hasil evaluasi, hanya ada satu daerah, yaitu Bayung Lencir, yang memiliki lapisan batubara dengan karakteristik yang cocok dan memenuhi kriteria parameter untuk persyaratan pengembangan UCG. Potensi batubara yang dapat dikembangkan menjadi UCG pada daerah ini memiliki total sumber daya sebesar 9,412 juta ton pada area 1 km² dengan kedalaman 250,73 meter.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada rekan-rekan di Kelompok Kerja Batubara, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral yang telah membantu dalam meluangkan waktunya untuk berdiskusi dalam penyelesaian makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

Bielowicz, B., Kasinski, J.R., 2015. The possibility of underground gasification of lignite from Polish deposits. *Int. J. Coal Geol.* 139, 191–205.
<https://doi.org/10.1016/j.coal.2014.10.010>

Bishop, M.G., 2001. South Sumatra Basin Province, Indonesia: The Lahat/Talang Akar-Cenozoic Total Petroleum System. USGS Open File Rep. 99-50-S 22.

Burton, E., Friedmann, J., Upadhye, R., 2006. Best Practices in Underground Coal Gasification. Contract No. W-7405-Eng-48, Lawrence Livermore Natl. Lab. Livermore, CA.

Couch, G., 2009. Underground coal gasification. *IEA Clean Coal Cent.* 9–10.

Darman, H., Sidi, F.H. (Eds.), 2000. An Outline of the Geology of Indonesia. Indonesian Association of Geologists, Jakarta.

Gafoer, S., Burhan, G., Purnomo, J., 1995. Peta Geologi Lembar Palembang, Sumatra Selatan. Bandung.

GasTech, I., 2007. Viability of Underground Coal Gasification in the “Deep Coals” of the Powder River Basin, Wyoming; Prepared for the Wyoming Business Council Business and Industry Division State Energy Office. Casper, WY.

Huda, M., 2014. Isu-isu Teknis Gasifikasi Batubara Konvensional dan Gasifikasi Bawah Tanah. *Miner. dan Energi* 12, 60–71.

- Imran, M., Torino, P., Saleem, M., Shabbir, M., 2012. Underground Coal Gasification and Power Generation ; Health Safety and 45th IEP C, 1–20. <https://doi.org/10.13140/2.1.4864.6720>
- Madiutomo, N., 2014. Potensi Resiko Lingkungan Teknologi Gasifikasi Batubara Bawah Tanah (Underground Coal Gasification - UCG). *Miner. dan Energi* 12, 97–105.
- Odeh, A.O., 2017. Pyrolysis: Pathway to Coal Clean Technologies. *Pyrolysis*. <https://doi.org/10.5772/67287>
- Shafirovich, E., Varma, A., 2009. Underground Coal Gasification: A Brief Review of Current Status. *Ind. Eng. Chem. Res.* 48, 7865–7875. <https://doi.org/10.1021/ie801569r>
- Shafirovich, E., Varma, A., Mastalerz, M., Rupp, J., 2008. The Potential for Underground Coal Gasification in Indiana. *CCTR Advis. Panel Meet.* June 5, 2008 14.
- Shell Mijnbouw N. V., 1978. Explanatory Notes To The Geological Map of The South Sumatran Coal Province.
- Simanjuntak, T.O., Budhitrina, T, Surono, Gofeer, S., Amin, T.C., 1994. Peta Geologi Lembar Muarabungo, Sumatra. Bandung.
- Simatupang, David P., Purnomo, Wawang S., Mulyadi, A., 2013. Laporan Penelitian dan Evaluasi CBM Daerah Muara Kilis, Kabupaten Tebo, Provinsi Jambi. Bandung.
- Simatupang, David P., Rahmat, Soleh B., M.A., 2012. Laporan Akhir Penelitian dan Evaluasi Pemboran CBM di Bayung Lencir, Musi Banyuasin, Sumatra Selatan. Bandung.
- Sury, M., White, M., Kirton, J., Carr, P., Woodbridge, R., 2004. Review of Environmental Issues of Underground Coal Gasification 144.
- Tobing, R.L., 2014. Laporan Akhir Penelitian Sumur Geologi untuk Tambang Dalam dan CBM Daerah Srijaya Makmur dan Sekitarnya, Kab. Musi Rawas, Provinsi Sumatra Selatan. Bandung.
- Yang, D, Sheng, Y and Green, M., 2014. UCG Where in the world TCE The Chemical Engineer. *TCE Chem. Eng.* , Univ. Leeds, Leeds 872, 38–41.
- Zulfahmi, 2014. Review Teknologi Underground Coal Gasification dan Status Pengembangannya di Indonesia. *Miner. dan Energi* 12, 37–44.

Diterima	: 22 Juli 2021
Direvisi	: 10 Agustus 2021
Disetujui	: 31 Agustus 2021

ANALISIS PENGINDERAAN JAUH DAN PEMODELAN 3D FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) DALAM PENENTUAN ZONA PERMEABILITAS PERMUKAAN DI WILAYAH PANAS BUMI GUNUNG TAMPOMAS, JAWA BARAT

REMOTE SENSING ANALYSIS AND 3D FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) MODELING INTO DETERMINATION OF SURFACE PERMEABILITY ZONES IN MOUNT TAMPOMAS GEOTHERMAL AREA, WEST JAVA

Abizar Adi, Agus Didit Haryanto, Johannes Hutabarat, dan Dewi Gentana
Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran
abizar861@gmail.com

ABSTRAK

Wilayah Gunung Tampomas yang terletak di Kecamatan Buahdua, Kecamatan Conggeang, dan Kecamatan Tanjungkerta, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat dipilih sebagai daerah penelitian karena diperkirakan memiliki potensi panas bumi dengan hadirnya manifestasi panas bumi berupa mata air panas di sekitarnya. Kemunculan manifestasi berhubungan dengan zona permeabilitas yang dikontrol oleh struktur geologi. Kelurusan punggung dan lembah diamati dan dianalisis menggunakan citra penginderaan jauh ASTER GDEM dan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), skala 1:25.000. Tujuan penelitian untuk mengetahui hubungan antara permeabilitas dengan kemunculan manifestasi panas bumi di daerah penelitian. Metode penelitian dengan melakukan analisis penginderaan jauh dan *Fault Fracture Density* (FFD) menggunakan pemodelan *3D micromine software*. Hasil analisis penginderaan jauh dengan azimuth penyinaran dari 0°, 45°, 90°, 135° dan *altitude* 45° memperlihatkan pola utama kelurusan punggung–lembah yang diinterpretasikan sebagai patahan memiliki arah relatif barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya. Indikasi struktur geologi di lapangan diperlihatkan oleh morfologi bentuk punggung lembah, di beberapa tempat memiliki tebing curam membentuk gawir sesar dan faset segitiga. Hasil analisis FFD di daerah penelitian memiliki tingkat permeabilitas yang bervariasi dengan nilai FFD rendah (0,00–3,00 km⁻¹), sedang (3,00–6,00 km⁻¹) dan tinggi (6,00–9,33 km⁻¹). Manifestasi panas bumi muncul pada zona permeabilitas yang memiliki nilai FFD sedang hingga tinggi yang ditandai oleh warna jingga dan merah. Dari pemodelan *3D micromine software* terhadap zona permeabilitas dan plotting mata air panas di permukaan terlihat secara jelas kemunculan mata air panas ke permukaan difasilitasi oleh patahan yang berkembang di daerah penelitian.

Kata Kunci: ASTER GDEM, *Fault Fracture Density*, Manifestasi Panas Bumi, Permeabilitas

ABSTRACT

The area of Mount Tampomas which is located in Buahdua District, Conggeang District, and Tanjungkerta District, Sumedang Regency, West Java was chosen as the research area because it is predicted to have geothermal potential with the presence of geothermal manifestations such as hot springs. The presence of manifestations relates to permeable zones controlled by geological structures. The lineament of the ridge and valley was observed and analyzed using ASTER GDEM remote sensing imagery and Indonesia Earth Form map (RBI), scale 1:25.000. The purpose of the study is to find out the relationship between permeability and the presence of geothermal manifestations in the research area. Research method by conducting remote sensing and fault fracture Density (FFD) analysis using 3D micromine software modeling. Results of remote sensing analysis with irradiation angle of 0°, 45°, 90°, 135° and altitude 45° shows the main pattern of the ridge - valley lineament interpreted as a fault in the research area have a relatively northwest-southeast

and northeast-southwest direction. Indications of geological structures in the field are shown by the morphology of valley-ridges, in some places has a steep slope that form the fault escarpment and triangular facet. The FFD analysis results in the research area have varying permeability classes shown by low FFD values ($0.00-3.00 \text{ km}^{-1}$), medium ($3.00-6.00 \text{ km}^{-1}$) and high ($6.00-9.33 \text{ km}^{-1}$). The geothermal manifestations appear in the permeability zone that have medium to high FFD values marked by orange and red colors. From 3D micromine software modeling of the permeability zone and plotting of hot springs on the surface, it is clear that the appearance of hot springs to the surface is facilitated by faults that develop in the research area.

Keywords: ASTER GDEM, Fault Fracture Density, Geothermal Manifestations, Permeability

PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi terbesar kedua dunia setelah Amerika Serikat sekitar 23.765,5 MW dengan kapasitas terpasang 2.130,7 MWe atau sekitar 8,9% dari total potensi sumber daya (Ditjen EBTKE, 2020). Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panas bumi, dan dapat dikembangkan dan dimanfaatkan adalah di daerah Gunung Tampomas.

Syarat utama pembentuk sistem panas bumi adalah sumber panas, batuan reservoir yang harus memiliki permeabilitas yang tinggi dibentuk oleh struktur geologi dan karakteristik stratigrafi, dan lapisan penudung (Kasbani, 2009). Struktur geologi (patahan/rekahan) membentuk zona permeabel memfasilitasi fluida panas bumi dari suatu kedalaman di bawah permukaan (reservoir) bermigrasi menuju ke kedalaman yang lebih rendah (Suryantini dan Wibowo, 2010).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisis penginderaan jauh dan FFD yang diaplikasikan dengan pemodelan 3D serta pengamatan lapangan untuk menentukan zona permeabel dan hubungannya terhadap sebaran manifestasi panas bumi di daerah penelitian. Metode ini menjadi penting dalam penelitian pendahuluan untuk mengetahui gambaran umum mengenai hubungan struktur geologi dan sebaran manifestasi sebelum dilakukan penelitian lapangan (Sasilani dan Haryanto *et al.*, 2019).

Metode FFD adalah metode yang sederhana namun telah terbukti untuk menentukan zona permeabel sebagai indikator reservoir panas bumi. Hal ini dibuktikan oleh hasil penelitian pada lapangan panas bumi Tanggamus (Gentana dan Sukiyah *et al.*, 2017), Candi Umbul-Telomoyo (Hermawan dan Rezky, 2011), dan Gunung Lawu (Siagian dan Maryudi *et al.*, 2018) yang menunjukkan area dengan nilai FFD tinggi sesuai dengan area resistivitas nilai rendah menggambarkan batuan yang didemagnetisasi hidrotermal, sehingga dapat menjadi indikator reservoir panas bumi.

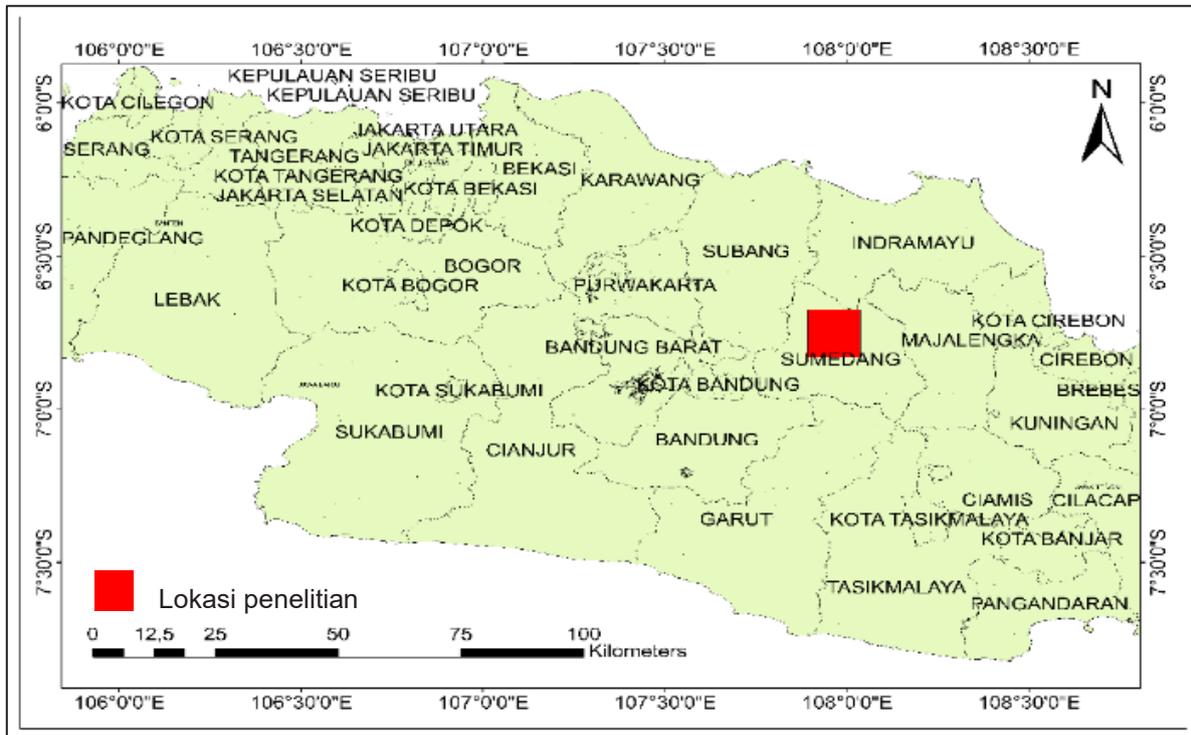
Secara administratif Gunung Tampomas dan sekitarnya terletak pada lima wilayah kecamatan, yaitu; Kecamatan Buahdua, Kecamatan Conggeang, Kecamatan Tanjungkerta, Kecamatan Paseh dan Kecamatan Cimalaka Kabupaten Sumedang, Jawa Barat. Secara geografis daerah penelitian terletak pada koordinat antara $6^{\circ} 40' 31'' - 6^{\circ} 49' 42'' \text{ LS}$ dan $107^{\circ} 53' 27'' - 108^{\circ} 2' 9'' \text{ BT}$ (Gambar 1).

METODOLOGI

Objek yang diamati dalam penelitian ini adalah sifat fisik manifestasi panas bumi di daerah penelitian dan citra ASTER GDEM untuk menentukan orientasi pola kelurusan melalui interpretasi penginderaan jauh (*remote sensing*) dan menghitung zona permeabilitas batuan menggunakan metode *Fault Fracture Density* (FFD) yaitu dengan cara menarik seluruh kelurusan punggung-lembah menggunakan aplikasi *ArcMap*.

Penarikan kelurusan dari punggung–lembah dengan alasan karena *fault* dan *fracture* yang banyak terdapat pada lembah diasumsikan sebagai zona lemah yang menjadi jalur pergerakan dari fluida

panas bumi, sehingga dapat menjadi petunjuk lokasi zona permeabel (Suryantini dan Wibowo, 2010). Tahapan penelitian yang dilakukan dijelaskan sebagai berikut (Gambar 2):



Gambar 1. Lokasi penelitian (Sumber: Indonesia Geospasial Portal)



Gambar 2. Bagan menampilkan alur penelitian

Analisis Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*)

Metoda penyinaran semu dengan sudut ketinggian sumber cahaya mulai dari 0°, 45°, 90°, dan 135° dengan penyinaran konstan 45° digunakan untuk menyinari relief yang dibentuk dari data ASTER GDEM, akan memperlihatkan topografi yang relatif menunjukkan kelurusan. Data topografi RBI diperoleh dari portal geospasial Indonesia dengan cara mengunduh peta per wilayah Jawa Barat, dan data ASTER GDEM diperoleh melalui aplikasi *Global Mapper 20* dengan cara menghubungkan sumber data online dan memilih sumbernya ASTER GDEM. Data yang didapatkan berupa peta DEM dan topografi Kabupaten Sumedang yang dipusatkan pada pada objek lokasi penelitian yaitu Gunung Tampomas. Kemudian dilakukan penarikan kelurusan secara visual pada aplikasi *ArcGIS* dengan *tools polyline* berupa data *shapefile*. Kelurusan-kelurusan (punggungan-lembah) dari hasil analisis penginderaan jauh kemudian diplot ke dalam diagram roset. Hasil plot pada diagram roset akan menunjukkan arah tegasan struktur geologi (patahan) di daerah penelitian.

Analisis FFD

Menurut Thanoun (2013) metode FFD adalah suatu metode sederhana yang didasarkan pada perhitungan pola kerapatan garis kelurusan pada foto udara, sehingga dapat diketahui zona-zona lemah (zona permeabel) yang dibentuk oleh sesar dan rekahan saling berhubungan. Struktur geologi seperti patahan dan rekahan mempunyai ciri khas yang dapat diamati di permukaan, yaitu berupa kelurusan (Massinai, 2015).

Tingkat permeabilitas pada batuan dapat diperoleh melalui analisis indeks geomorfik kuantitatif antar lain; kerapatan pengaliran sungai (*drainage density/D_d*) bernilai rendah hingga tinggi ditunjukkan dengan nilai; 1,73-4,58 km⁻¹ (Gentana, 2018; klasifikasi Sukiyah, 2003), dan kerapatan kelurusan geologi (*lineament*

density/L_d) bernilai rendah hingga tinggi ditunjukkan dengan nilai; 1,00-3,00 km⁻¹ (Gentana, 2018; klasifikasi Soengkono, 1999).

Kerapatan dari patahan dan rekahan didefinisikan sebagai total panjang sebenarnya dari kelurusan yang telah ditarik dibagi dengan luas dari *grid* yang telah dibuat berukuran 1 km x 1 km. Nilai kerapatan pada setiap *grid* kemudian dibuat kontur yang menunjukkan nilai kerapatan yang sama. Hasilnya berupa peta kontur *Fault Fracture Density* (FFD) yang memberikan gambaran umum wilayah yang memiliki kerapatan patahan dan rekahan dengan nilai tertinggi mengindikasikan zona lemah/zona rekahan yang berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan dari fluida panas bumi dari bawah permukaan (reservoir).

Pemodelan 3D

Pemodelan 3D dilakukan untuk menggambarkan hubungan tingkat permeabilitas secara tiga dimensi berdasarkan hasil perhitungan FFD yang dikorelasikan dengan kelurusan-kelurusan hasil interpretasi penginderaan jauh dari citra satelit ASTER GDEM terhadap kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan.

Data hasil analisis FFD, interpretasi kelurusan, lokasi kemunculan manifestasi dan data kontur topografi RBI kemudian diolah dengan menggunakan fitur *digital terrain model* (DTM) pada aplikasi Micromine sehingga menghasilkan model topografi 3D dengan korelasi kelurusan (patahan), data FFD dan kemunculan manifestasi di permukaan.

GEOLOGI

Stratigrafi Regional

Berdasarkan peta geologi regional Lembar Bandung, Jawa Barat, skala 1:100.000 (P.H. Silitonga, 1973), tipe batuan di daerah Gunung Tampomas dikelompokkan dalam 6 satuan batuan (Gambar 3), dengan urutan stratigrafi dari

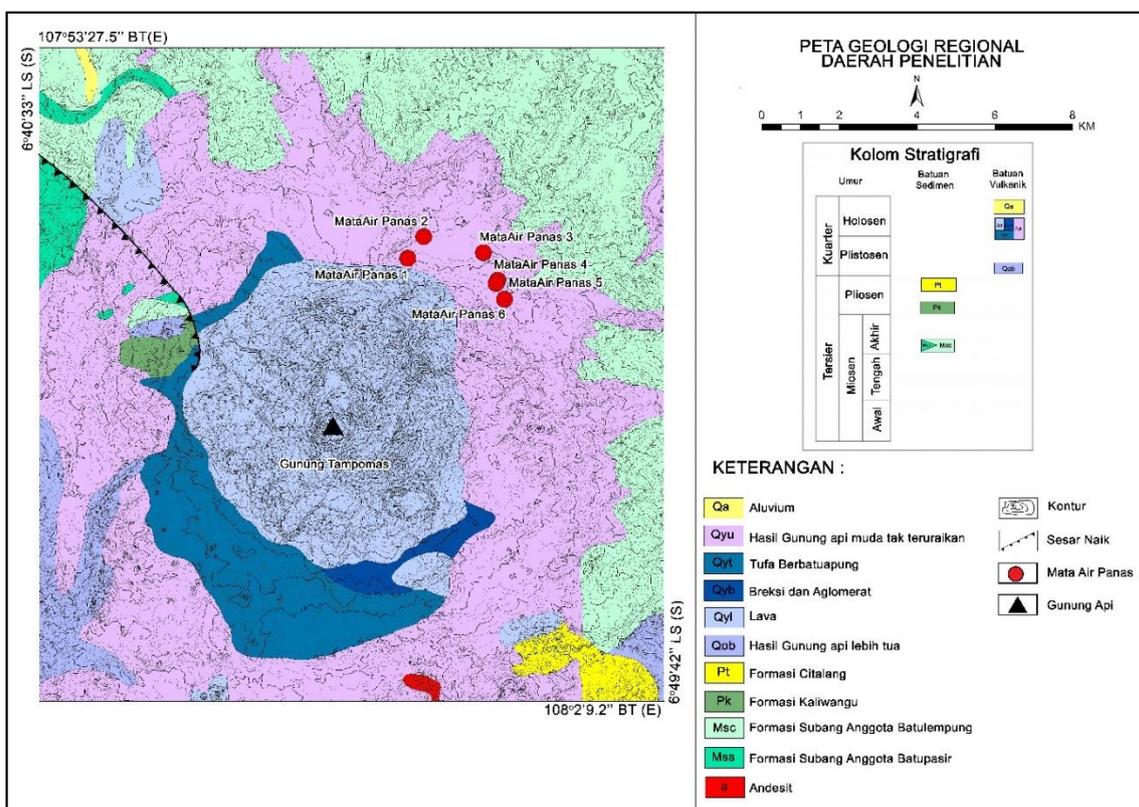
yang berumur tua ke muda sebagai berikut:

- a. Formasi Subang; Formasi Subang terdiri dari dua subdivisi: yaitu anggota batulempung (Msc) dan anggota batupasir (Mss) yang saling membaji dan berumur Miosen, tersebar tidak luas di tengah peta bagian utara.
- b. Formasi Kaliwangu (Pk); Formasi Kaliwangu terdiri dari batupasir tufaan, konglomerat dan, jarang terdapat batugamping dan batulempung dan berumur Miosen - Pliosen.
- c. Formasi Citalang (Pt); Formasi Citalang yang berumur Pliosen, terdiri dari batunapal tufaan diselingi oleh batupasir tufaan, breksi dan konglomerat.
- d. Hasil Gunung Api lebih tua (Qob); Terdiri atas breksi, lahar, dan pasir tufa berlapis – lapis dengan kemiringan yang kecil berumur Plistosen.
- e. Hasil Gunung Api muda; produk vulkanik berupa tuf batuapung (Qyt)

dan breksi dan aglomerat (Qyb), lapili, lava, berumur Kuartar tersebar mengelilingi Gunung Tampomas dari sisi barat laut-barat-barat daya-selatan-tenggara.

- f. Hasil Gunung Api muda tak teruraikan (Qyl); pasir tufaan, lapili, breksi, aglomerat dan aliran lava muda bersifat basaltik yang berumur Kuartar. Intrusi (terobosan) lava andesit (A) diendapkan di sungai berumur Holosen juga tersebar di bagian selatan dan barat laut (Djuri, 1995; Silitonga, 1973).

Kemunculan manifestasi panas bumi di daerah penelitian berada di daerah yang tersusun oleh batuan hasil gunung api muda tak teruraikan (Qyu) berumur Kuartar dengan litologi pasir tufaan, lapili, breksi, aglomerat dan aliran lava muda bersifat basaltik tersebar di bagian barat daya dan bagian tengah peta dari utara sampai selatan dan bersambung mengelilingi tubuh Gunung Tampomas (Silitonga, 2003 dalam Dirk, 2008).



Gambar 3. Geologi regional daerah penelitian, modifikasi peta geologi lembar Bandung (Silitonga, 1973)

Struktur Geologi Regional

Terdapat 4 kelompok utama arah jalur sesar yang berkembang di Pulau Jawa bagian barat (Haryanto dan Hilmi, 2008) yaitu:

- a. Sesar berarah utara-selatan (Pola Sunda), terbentuk pada kala Paleogen dan bersifat *transtensional*, terdapat di wilayah Bogor dan Sukabumi menerus hingga Rangkasbitung dan Lebak. Aktivitas tektonik ini menghasilkan *horst* dan *graben* yang dikontrol oleh sesar mendatar normal.
- b. Sesar berarah barat laut-tenggara (Pola Sumatra), teramati pada daerah kelurusan lembah Sungai Citanduy menerus ke arah barat melalui Kuningan dan Majalengka dan Jampang Kulon. Sesar ini diwakili oleh Sesar Citanduy yang bersifat mendatar dekstral dan Sesar Naik Baribis.
- c. Sesar berarah timur laut-barat daya (Pola Meratus), diwakili oleh Sesar Cimandiri, Sesar Pelabuhanratu dan Sesar Jampang Kulon, yang merupakan sesar mendatar sinistral.
- d. Sesar berarah barat-timur (Pola Jawa), diwakili oleh Sesar Naik Baribis, dijumpai pada daerah Subang menerus hingga Majalengka.

Secara regional daerah penelitian memiliki tegasan yang searah dengan pola Sumatra yang diwakili sesar-sesar naik seperti Sesar Baribis dan Sesar Citanduy. Di bagian barat laut daerah penelitian terdapat sesar naik dengan arah relatif barat laut-tenggara, sedangkan di bagian timur laut terdapat sesar naik dengan arah relatif timur laut - barat daya. Anjakan dan pelipatan relatif berarah barat laut-tenggara hadir pada Formasi Subang dan sedimen Tersier lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian diuraikan berdasarkan pengolahan data dan analisis terhadap data geologi khususnya aspek morfologi, struktur geologi dan manifestasi panas bumi baik dari hasil interpretasi atau

analisis di studio (laboratorium) serta hasil pengamatan di lapangan.

HASIL PENGAMATAN LAPANGAN

Geomorfologi

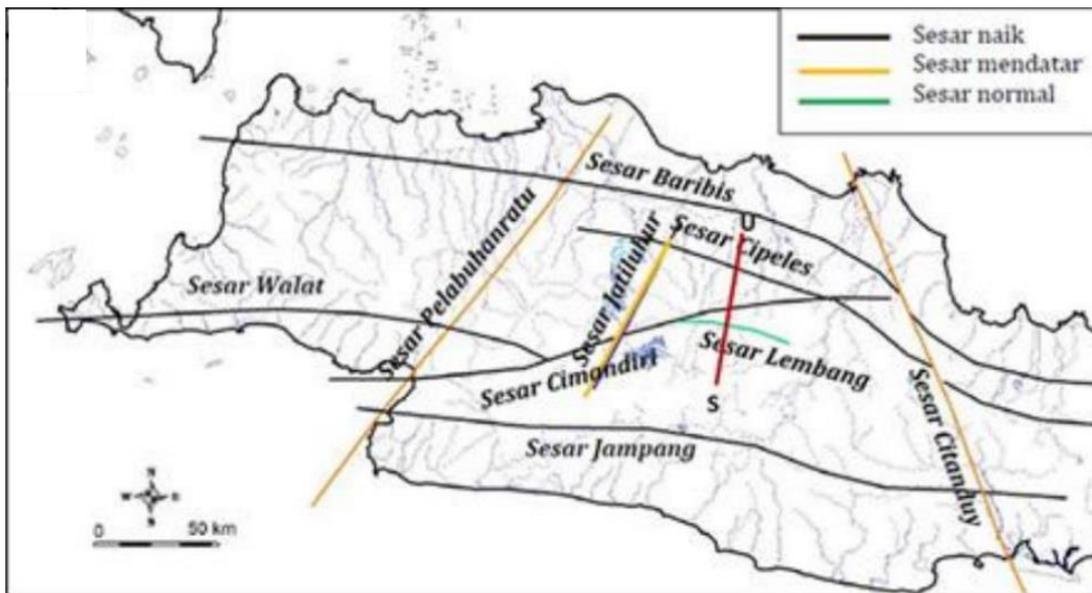
Daerah penelitian secara umum menggambarkan bentang alam puncak gunung api Gunung Tampomas membentuk pegunungan dengan lereng dinding yang curam. Kelurusan punggung pada kaki Gunung Tampomas mencerminkan suatu aktivitas tektonik berupa pengangkatan atau pensesaran seperti pada Gambar 4. Berdasarkan klasifikasi pola pengaliran sungai (Twidale, 2004), pola aliran sungai di daerah penelitian terbagi menjadi tiga jenis yaitu; pola aliran sungai radial, sub-paralel dan dendritik. Di lapangan, pada daerah yang memiliki pola aliran sungai sub-paralel terdapat kelokan sungai yang tajam, hal ini merupakan salah satu indikasi daerah tersebut terganggu oleh struktur geologi sehingga membentuk rekahan pada batuan dan berperan sebagai media munculnya mata air panas ke permukaan dari sistem panas bumi di bawah permukaan (reservoir).

Struktur Geologi

Di lapangan, struktur geologi diindikasikan oleh fenomena morfologi atau bentang alam yang membentuk faset segitiga (*triangular facet*), kelurusan punggung dan lembah yang memiliki tebing punggung yang curam atau tajam membentuk gawir sesar (*escarpment*) (Gambar 6). Terbentuknya fenomena bentang alam tersebut menandakan di daerah penelitian telah terganggu oleh adanya aktivitas tektonik berupa pengangkatan (*uplift*), deformasi atau pensesaran. Kemunculan mata air panas pada daerah tepi punggung memperkuat bahwa kemunculan manifestasi panas bumi berupa mata air panas tersebut dikontrol oleh struktur geologi (patahan) yang berkembang di daerah penelitian. Daerah patahan merupakan daerah rentan yang membentuk rekahan-rekahan pada batuan atau membentuk zona lemah merupakan

zona permeabilitas tinggi yang berperan sebagai media meloloskan fluida dari batuan yang awalnya bersifat tidak dapat meloloskan (*impermeable*) menjadi dapat meloloskan fluida (*permeable*). Pada daerah ini umumnya batuan bersifat rentan sehingga cenderung mudah mengalami pelapukan dan erosi. Pada daerah panas bumi yang memiliki pola kelurusan semakin banyak dan saling

berpotongan dapat menjadi indikasi bahwa daerah tersebut rentan terhadap proses deformasi dan berpengaruh terhadap kemunculan manifestasi panas bumi permukaan. Hasil uji arah kelurusan punggungan dan arah segmen sungai memperlihatkan pola pengaliran dikontrol oleh tektonik atau struktur geologi (Gentana, 2018).



Gambar 4. Peta pola struktur regional Jawa Barat (Haryanto, 2014 dalam Febyani dan Pradhana *et al.*, 2020)



Gambar 5. (a) Bentang alam Gunung Tampomas, (b) Punggungan pada kaki Gunung Tampomas



Gambar 6. (a) Fenomena morfologi kelurusan punggung di kaki Gunung Tampomas
(b) Morfologi faset segitiga dengan tebing punggung yang curam

Sebaran Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi di daerah penelitian berupa mata air panas (Gambar 7) yang disebut sebagai mata air panas:

- a. Cikeresek 1 terletak di tengah sawah dengan elevasi 309 mdpl di Dusun Cikeresek Desa Sekarwangi, karakteristik fisik berwarna keruh, berasa, berbau, bersuhu 44°C dan pH 5,6.
- b. Cikeresek 2 terletak di tengah sawah dengan elevasi 309 mdpl di Dusun Cikeresek Desa Sekarwangi, karakteristik fisik berwarna jernih, berasa, berbau, bersuhu 44°C dan pH 5,7.
- c. Cipanas Sekarwangi yang merupakan tempat wisata pemandian air panas dengan elevasi 342 mdpl Dusun Conggeang Desa Sekarwangi, karakteristik sifat fisiknya berwarna jernih, berbau belerang, tidak berasa, memiliki temperatur 49°C dan pH 6,36.
- d. Bojong yang merupakan tempat wisata pemandian air panas tepatnya di samping jalan raya dengan elevasi 308 mdpl di Dusun Bojong Desa Cibubuan. karakteristik fisiknya berwarna jernih, berbau, berasa, memiliki suhu 37°C dan pH 7,54.

- e. Cipanas Cileungsing 1 terletak di tengah persawahan dengan elevasi 308 mdpl di Desa Cileungsing, karakteristik fisiknya berwarna jernih, berbau, berasa, memiliki suhu 45°C dan pH 6,33.
- f. Cipanas Cileungsing 2 berada di Desa Cileungsing, merupakan tempat wisata pemandian air panas dengan elevasi 308 mdpl, karakteristik fisiknya berwarna jernih, tidak berbau, berasa, memiliki suhu 47°C dan pH 6,41.

Masing-masing sifat fisik dari enam lokasi mata air panas memiliki sifat fisik yang berbeda-beda, yaitu memiliki pH air panas yang bervariasi dari sedikit asam hingga mendekati basa, berbau dan tidak berbau, berasa dan tidak berasa dengan suhu air panas berkisar dari 37°C hingga 49°C. Mata air panas terbentuk karena adanya aliran panas dari bawah permukaan melalui rekahan-rekahan batuan.

Berdasarkan data hasil perhitungan geotermometer dengan rumus Giggenbach (1988) menggunakan rasio kimia seperti Na/K pada lokasi manifestasi yang sama (Prasetio dan Laksminingpuri *et al.*, 2018), menghasilkan temperatur bawah permukaan yang relatif tinggi antara 183°C hingga 221°C (Tabel 1).



Gambar 7. (a) Mata air panas Cikeresek, (b) Mata air panas Cikeresek 2 (c) Mata air panas Cipanas Sekarwangi, (d) Mata air panas Bojong, (e) Mata air panas Cileungsing 1, (f) Mata air panas Cileungsing 2

Tabel 1. Koordinat lokasi manifestasi, jenis manifestasi dan temperatur bawah permukaan.

No.	Kode	Lokasi	Koordinat	Jenis Manifestasi	Temperatur Bawah Permukaan (C°)
1	Mata Air Panas 1	Cileungsing	107°58'35,7" E 6°43'29,6" S	Mata Air Panas	189
2	Mata Air Panas 2	Cileungsing	107°58'49" E 6°43'11,4" S	Mata Air Panas	183
3	Mata Air Panas 3	Bojong	107°59'39" E 6°43'25" S	Mata Air Panas	220
4	Mata Air Panas 4	Cikeresek	107°59'51" E 6°43'48" S	Mata Air Panas	-
5	Mata Air Panas 5	Cikeresek	107°59'49,5" E 6°43'51" S	Mata Air Panas	-
6	Mata Air Panas 6	Sekarwangi	107°59'56,5" E 6°43'4,0" S	Mata Air Panas	221

HASIL ANALISIS STUDIO

Analisis Penginderaan jauh

Interpretasi penginderaan jauh dilakukan dengan penyinaran 4 (empat) sudut berbeda yaitu pada azimuth: 0°, 45°, 90°, 135°, dan penyinaran konstan 45°. Kemudian diplot pada diagram roset untuk mengetahui orientasi pola utama kelurusan punggungan dari masing-masing sudut penyinaran sebagai berikut:

a. Kelurusan ASTER GDEM azimuth penyinaran 0°, memiliki pola utama kelurusan punggungan-lembah memiliki arah relatif barat-timur (Gambar 8).

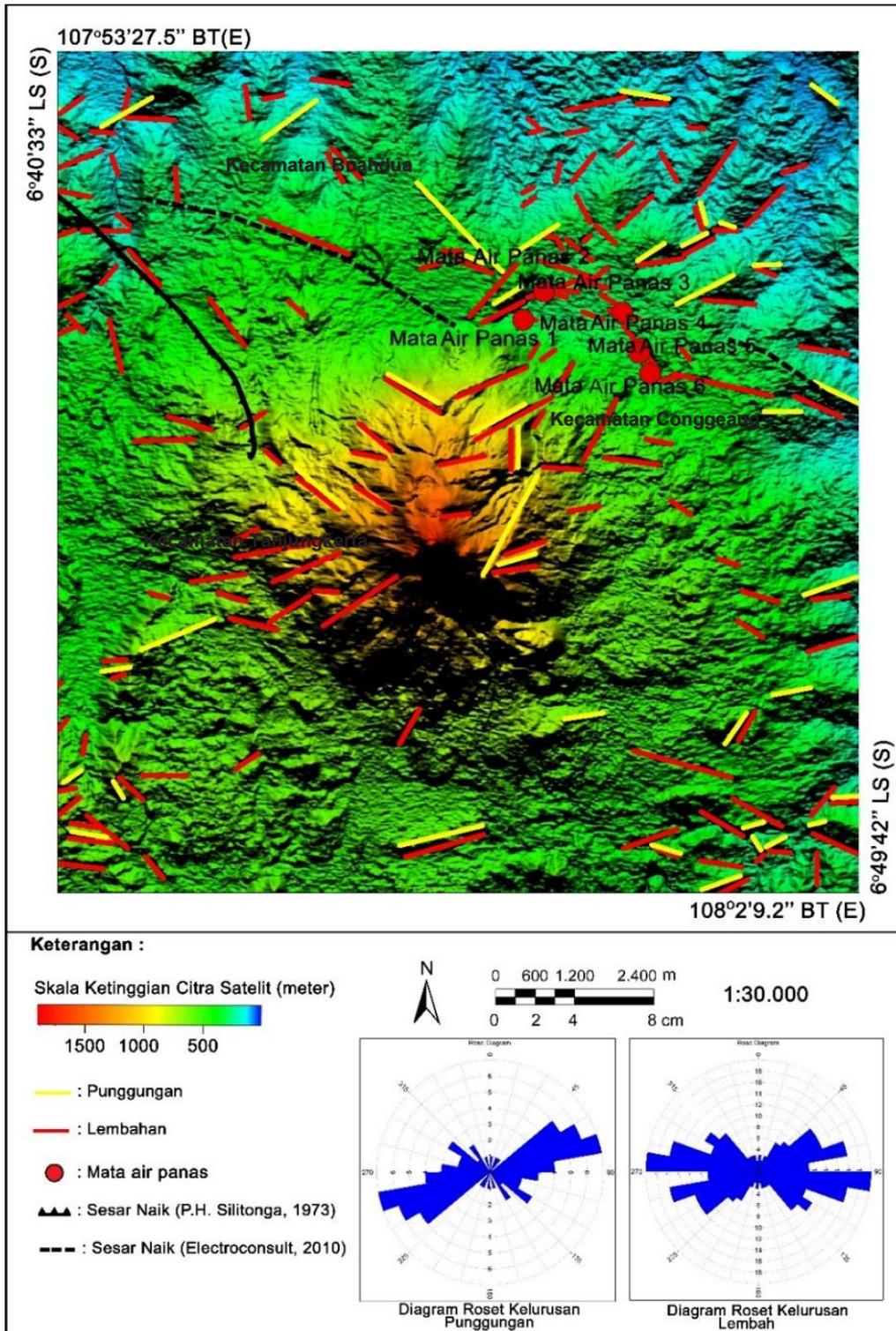
b. Kelurusan ASTER GDEM azimuth penyinaran 45°, memiliki pola utama kelurusan punggungan-lembah memiliki arah relatif barat laut-tenggara (Gambar 9).

c. Kelurusan ASTER GDEM azimuth penyinaran 90°, memiliki pola utama kelurusan punggungan memiliki arah utara-selatan dan timur laut-barat daya. Kelurusan lembah memiliki arah barat laut-tenggara (Gambar 10).

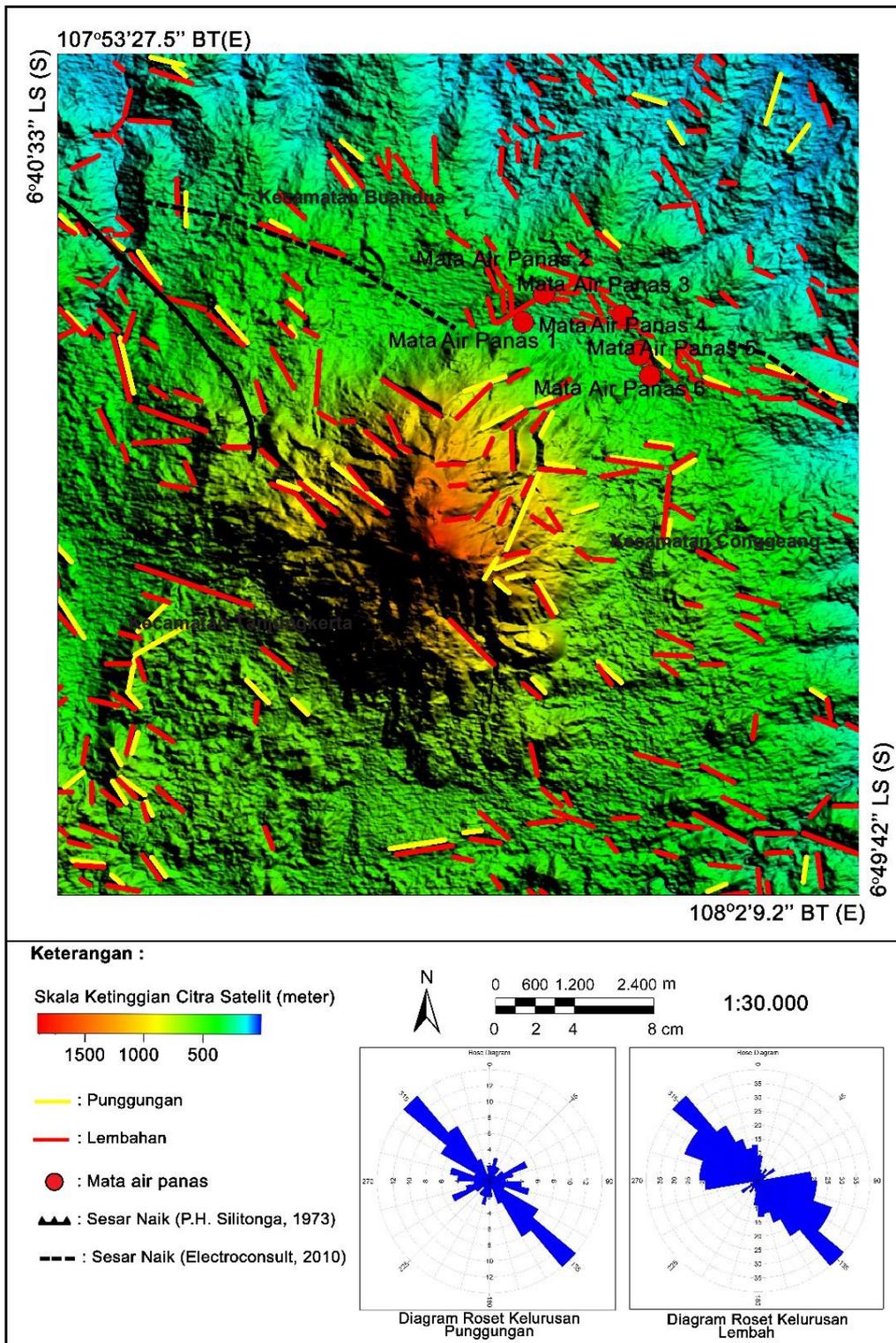
d. Kelurusan ASTER GDEM azimuth penyinaran 135°, memiliki pola utama kelurusan punggungan memiliki arah utara-selatan dan timur laut-barat daya. Kelurusan lembah memiliki arah barat laut-tenggara (Gambar 11).

e. Kelurusan ASTER GDEM azimuth penyinaran gabungan (*overlay*) antara $0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$, dan 135° memperlihatkan orientasi kelurusan secara menyeluruh dari masing-masing sudut penyinaran secara garis besar menunjukkan pola

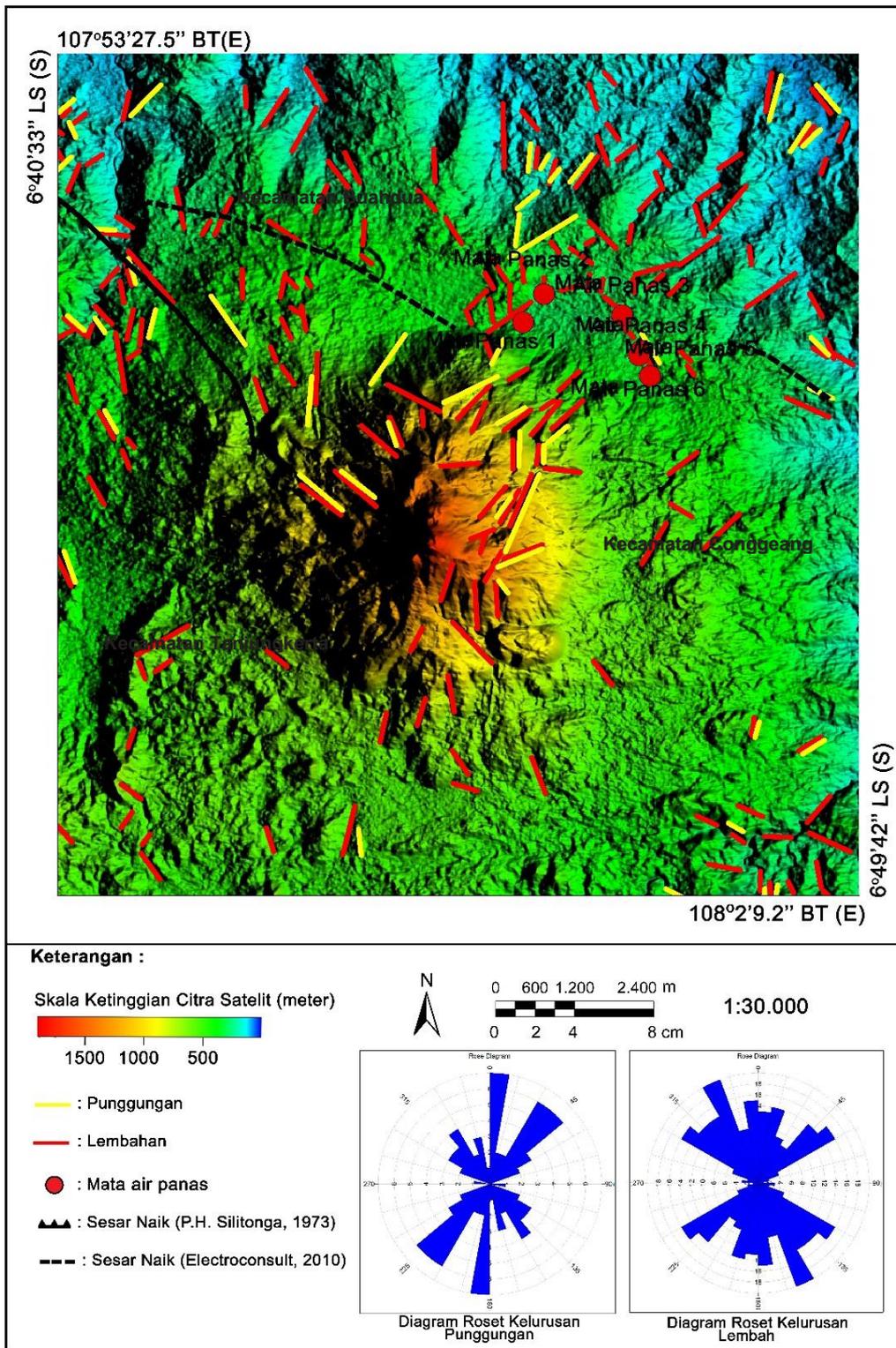
kelurusan utama di daerah penelitian memiliki arah relatif barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya yang diinterpretasikan sebagai patahan seperti ditampilkan pada Gambar 12.



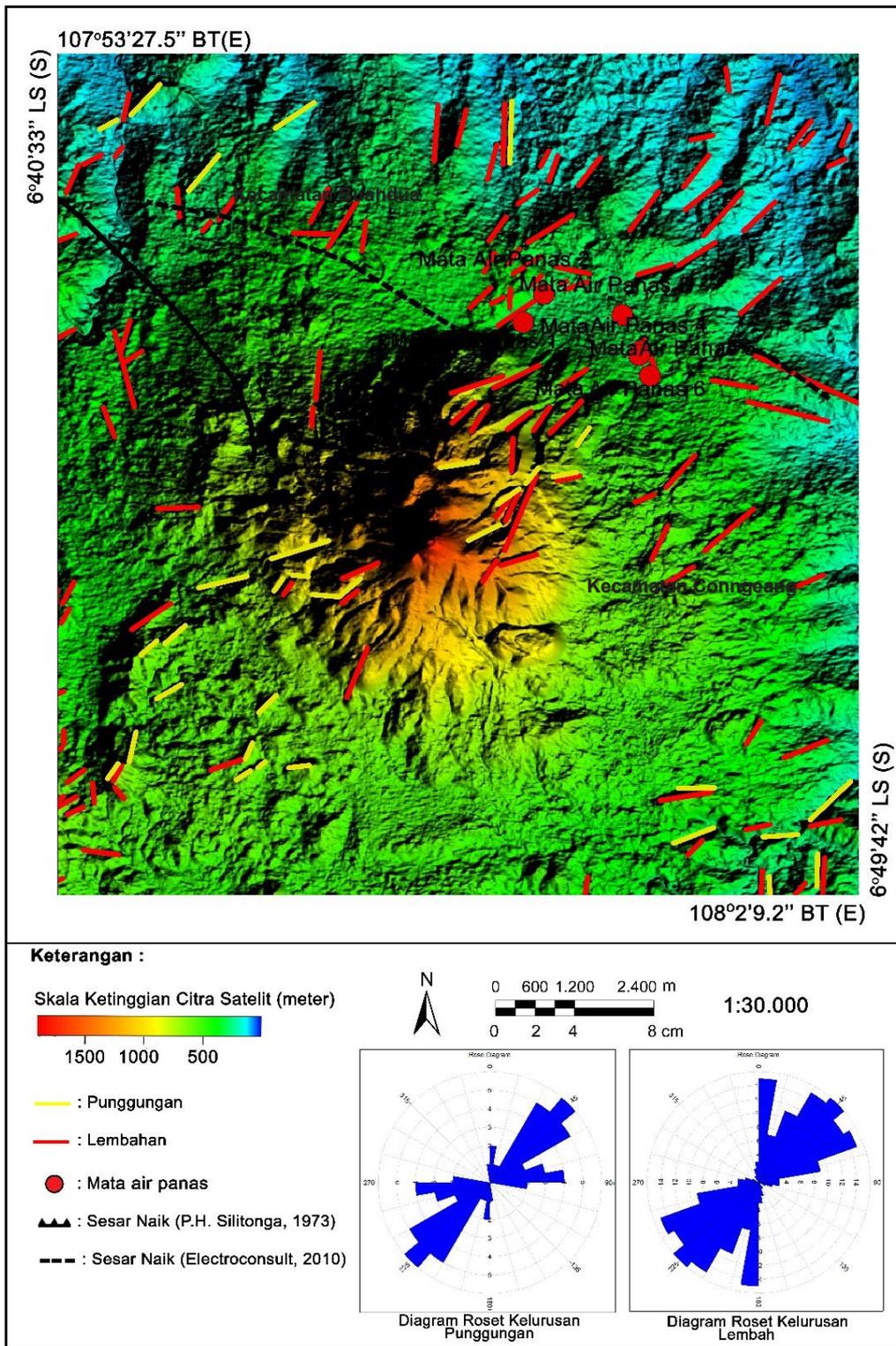
Gambar 8. Analisis kelurusan azimuth penyinaran 0° dan hasil plot pada diagram roset



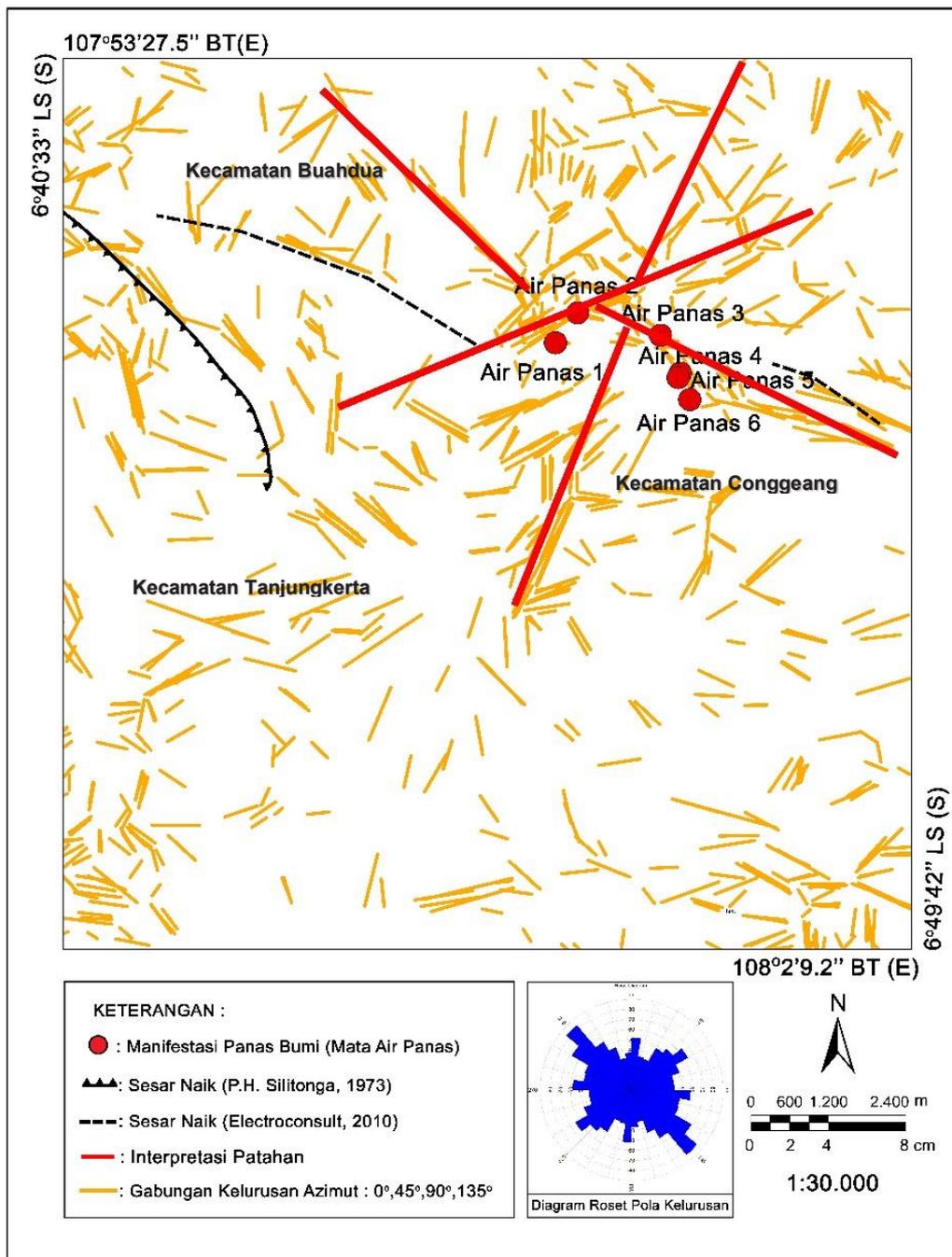
Gambar 9. Analisis kelurusan azimuth penyinaran 45° dan hasil plot pada diagram roset



Gambar 10. Analisis kelurusan azimuth penyinaran 90° dan hasil plot pada diagram roset



Gambar 11. Analisis kelurusan azimuth penyinaran 135° dan hasil plot pada diagram roset



Gambar 12. Peta overlay kelurusan azimuth penyinaran gabungan antara 0°, 45°, 90°, 135° dan hasil plot pada diagram roset

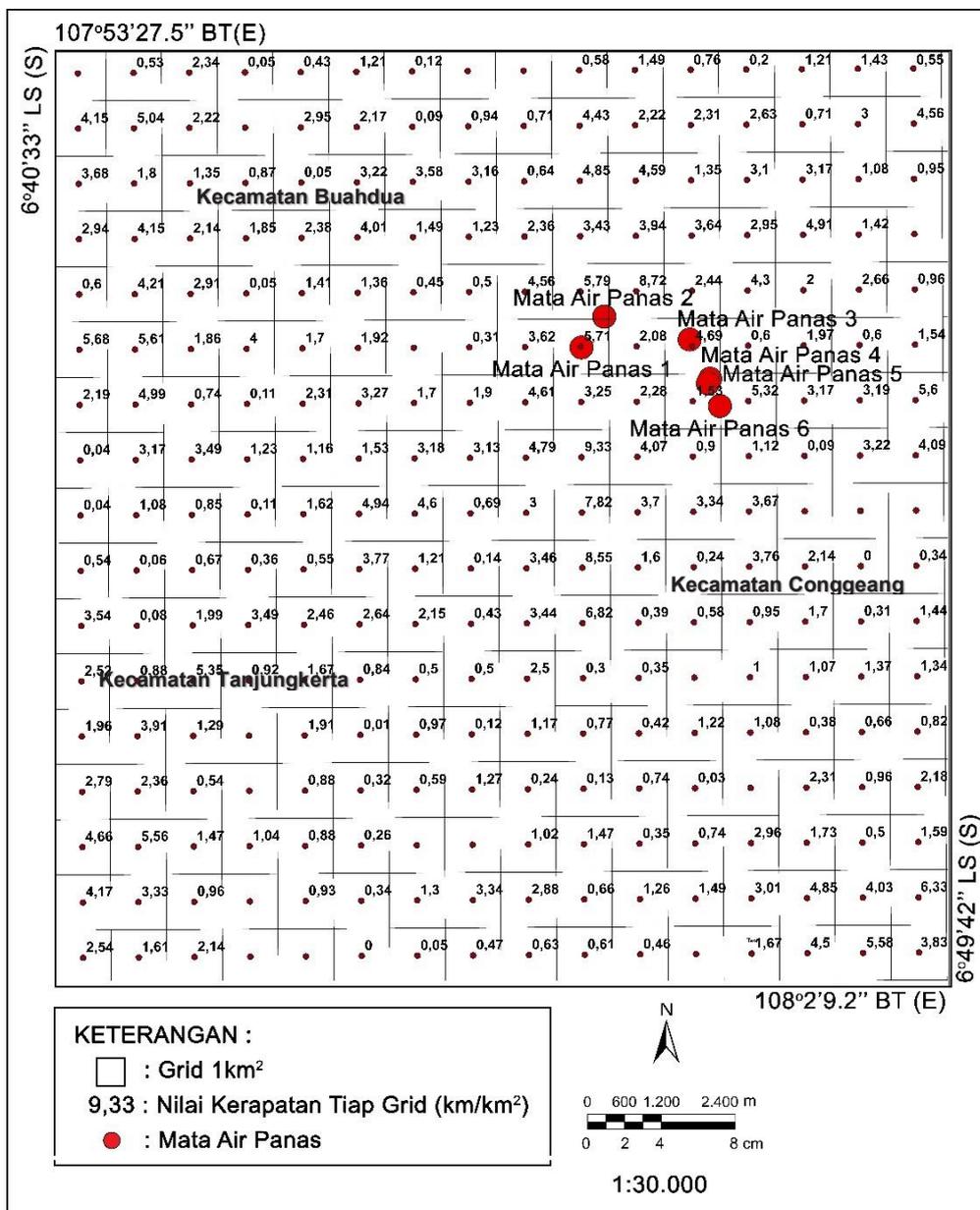
Analisis Fault Fracture Density (FFD)

Hasil analisis FFD memperlihatkan di daerah penelitian memiliki tingkat permeabilitas yang bervariasi dari rendah hingga ke tinggi berkisar; 0,00–9,33 km⁻¹, yang diplot dalam satuan area dalam km atau per-grid dengan ukuran 1 km x 1 km (Gambar 13). Daerah dengan nilai permeabilitas rendah memiliki nilai: 0,00–

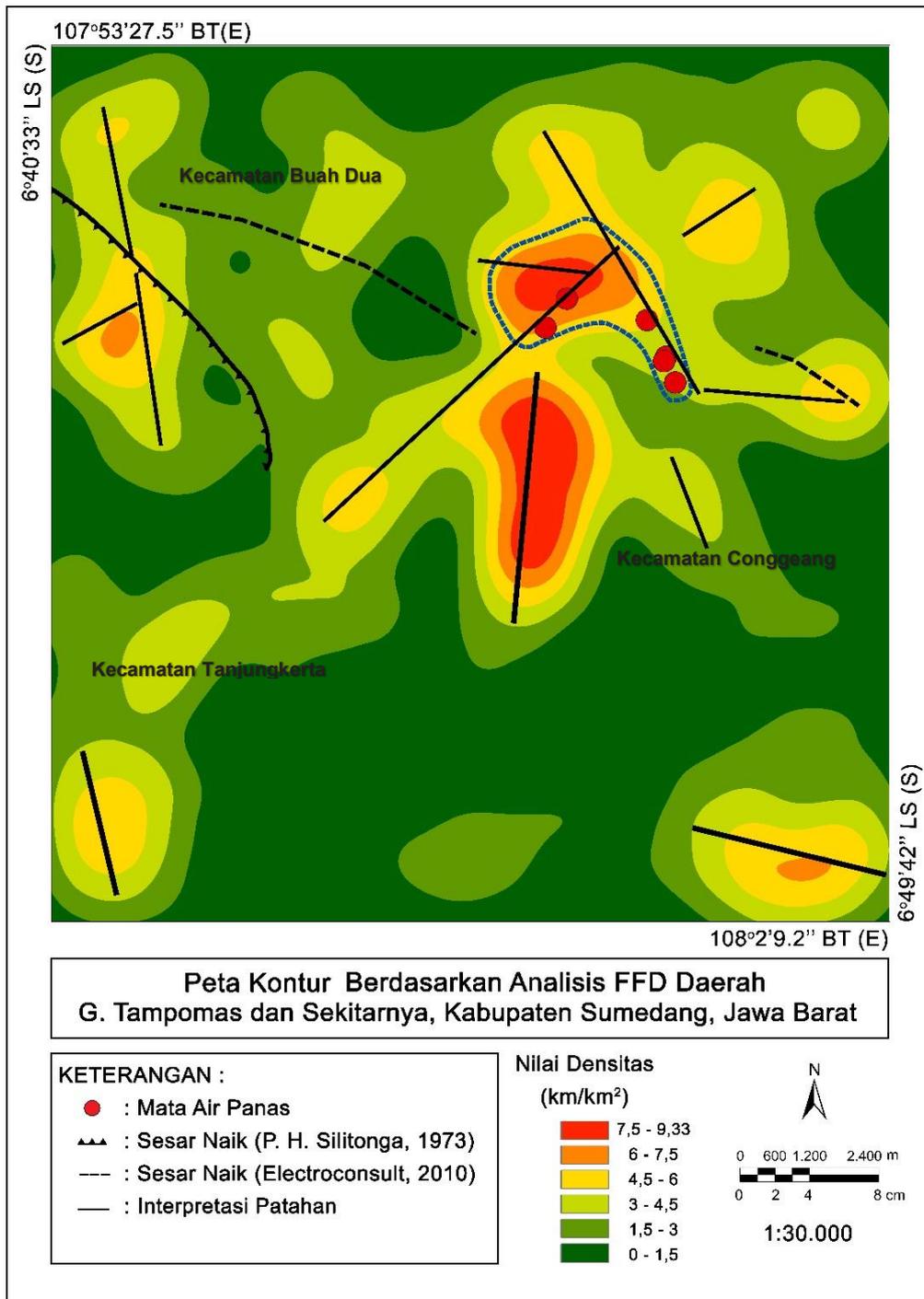
3,00 km⁻¹, sedang memiliki nilai: 3,00–6,00 km⁻¹, dan tinggi memiliki nilai: 6,00–9,33 km⁻¹. Nilai kerapatan patahan dan rekahan (permeabilitas) pada setiap grid kemudian dibuat kontur yang menunjukkan nilai kerapatan patahan dan rekahan yang sama, digambarkan dalam peta kontur FFD (Gambar 14). Peta kontur FFD ini yang menunjukkan tingkat nilai FFD atau

zona permeabilitas dari rendah hingga tinggi, sebagai berikut:

- 1) Zona permeabilitas rendah memiliki nilai FFD $0,00-3,00 \text{ km}^{-1}$, menempati bagian barat, timur, dan selatan daerah penelitian ditandai dengan warna hijau tua-hijau muda. Zona ini diinterpretasikan sebagai daerah yang sangat kecil dipengaruhi oleh struktur geologi.
- 2) Zona permeabilitas sedang memiliki nilai FFD $3,00-6,00 \text{ km}^{-1}$, menempati bagian timur laut dan tenggara daerah penelitian ditandai dengan warna kuning muda hingga kuning tua. Zona ini diinterpretasikan sebagai daerah yang dipengaruhi oleh struktur geologi sedang (tidak terlalu intensif).
- 3) Zona permeabilitas tinggi memiliki nilai FFD $6,00-9,33 \text{ km}^{-1}$, menempati bagian tengah dan timur laut daerah penelitian yang ditandai dengan warna jingga tua hingga merah. Zona ini diinterpretasikan sebagai daerah yang dipengaruhi oleh struktur geologi secara intensif.



Gambar 13. Nilai hasil perhitungan *Fault Fracture Density* (FFD) pada setiap grid

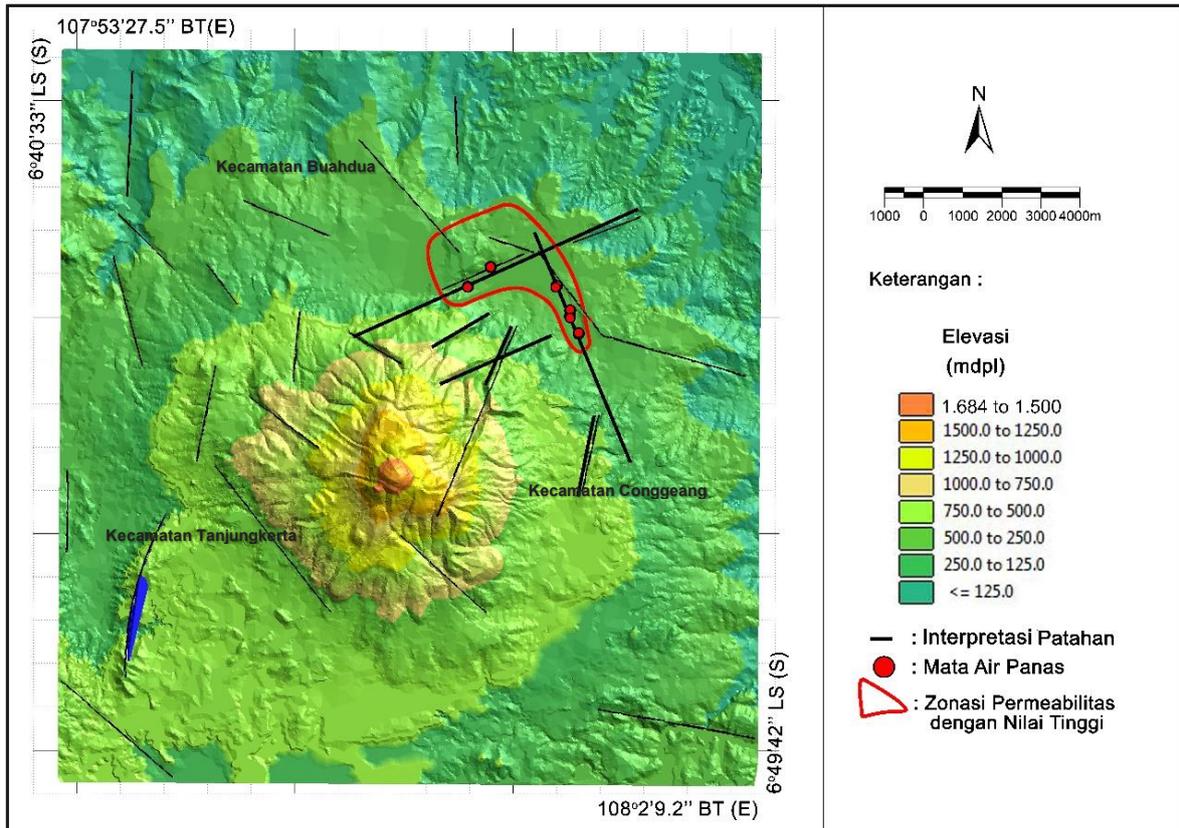


Gambar 14. Peta sebaran Densitas hasil penghitungan *Fault Fracture Density*

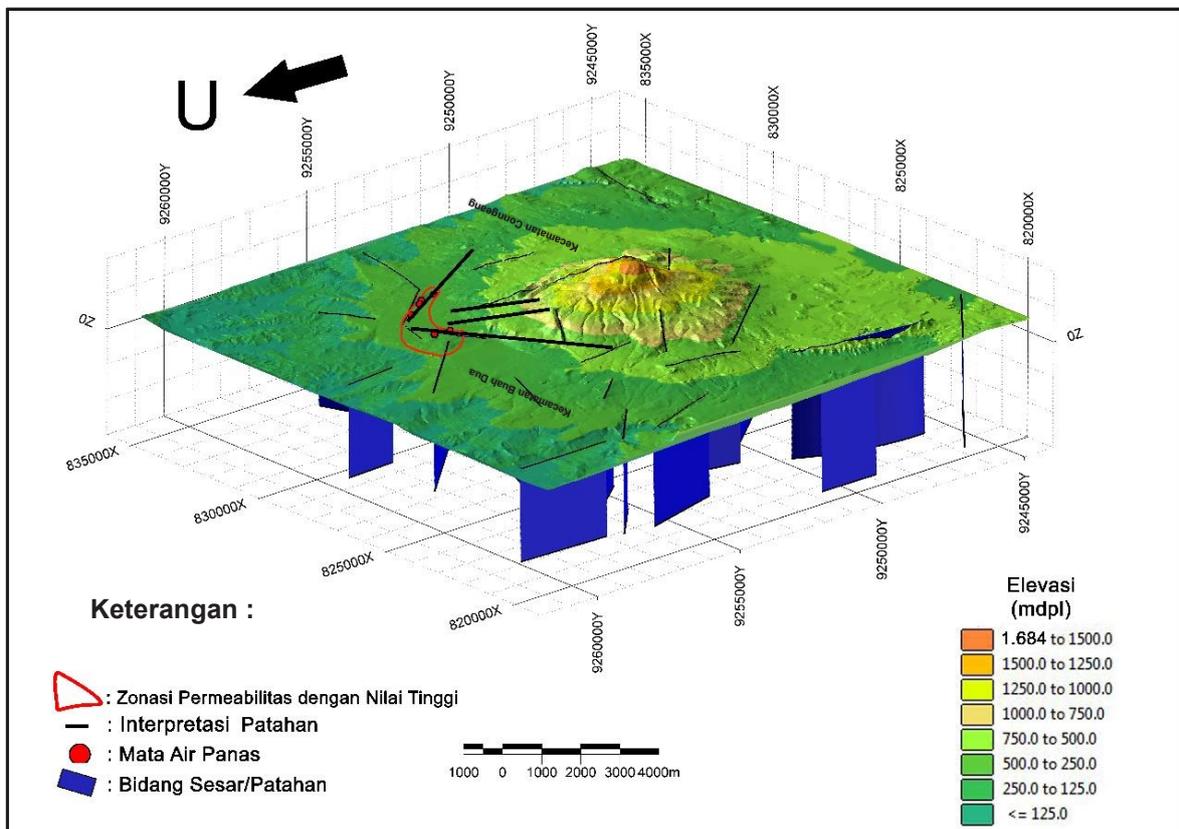
Pemodelan 3D

Penggambaran pola kelurusan punggungan-lembah yang diinterpretasikan sebagai patahan terhadap hasil plot keberadaan manifestasi panas bumi di permukaan dalam bentuk 2 dimensi (Gambar 15) dan 3 dimensi (Gambar 16) dengan

menggunakan *Micromine software* memperlihatkan secara jelas kemunculan manifestasi panas bumi berhubungan atau difasilitasi oleh adanya patahan-patahan yang berkembang di daerah penelitian dengan orientasi pola utama berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya.



Gambar 15. Hasil pemodelan 2D micromine software



Gambar 16. Hasil pemodelan 3D micromine software

PEMBAHASAN

Fenomena morfologi atau bentang alam di lapangan memperlihatkan bentang alam puncak gunung api yang memiliki kemiringan lereng curam. Pola pengaliran sungai sub-paralel mendominasi daerah penelitian yang diekspresikan oleh bentang alam kelurusan-kelurusan punggung dan lembah yang memanjang.

Indikasi struktur geologi di lapangan berupa faset segitiga (*triangular facet*), punggung dan lembah yang memiliki tebing curam/terjal membentuk gawir sesar (*escarpment*) yang diperkirakan sebagai jalur patahan yang memfasilitasi fluida dalam reservoir mengalir hingga permukaan.

Hasil penarikan kelurusan dari masing-masing 4 sudut penyinaran menunjukkan pola utama kelurusan punggung-lembah yang diinterpretasikan sebagai patahan secara menyeluruh memiliki arah dominan barat laut – tenggara dan timur laut-barat daya. Pola utama kelurusan punggung-lembah di daerah penelitian memiliki pola yang relatif sama dengan pola struktur regional Jawa Barat yaitu pola Sumatra yang memiliki arah relatif barat laut-tenggara (Haryanto dan Hilmi, 2008). Patahan-patahan tersebut berasosiasi dengan kemunculan mata air panas dengan temperatur bawah permukaan relatif tinggi yang membentuk sistem panas bumi di daerah Gunung Tampomas.

Penentuan zona permeabilitas dengan menggunakan metode *Fault Fracture Density* (FFD) dilakukan kemudian ditampilkan berupa peta kontur FFD (Gambar 14). Intensitas kerapatan patahan dan rekahan yang tinggi menunjukkan tingkat permeabilitas yang tinggi. Daerah panas bumi Gunung Tampomas dapat dikelompokkan menjadi 4 tingkat zona permeabilitas, yaitu permeabilitas rendah ($0,00-3,00 \text{ km}^{-1}$) ditandai dengan warna hijau tua hingga hijau muda, permeabilitas sedang ($3,00-$

$6,00 \text{ km}^{-1}$) ditandai dengan warna kuning muda hingga kuning tua dan permeabilitas tinggi ($6,00-9,33 \text{ km}^{-1}$) yang ditandai dengan warna jingga tua hingga merah. Daerah yang memiliki nilai permeabilitas yang tinggi berada pada bagian timur laut Gunung Tampomas (Gambar 14).

Selanjutnya, data hasil analisis FFD dikompilasi dengan lokasi kemunculan manifestasi mata air panas dan data struktur geologi berupa kelurusan punggung dan lembah dari hasil analisis penginderaan jauh. Menunjukkan korelasi yang baik, seperti yang ditampilkan pada pemodelan 3D (Gambar 16). Pemodelan 3D memperlihatkan secara jelas kemunculan mata air panas dengan temperatur bawah permukaan relatif tinggi berada pada zona permeabilitas dengan nilai tinggi dan tepi atau perpotongan garis-garis patahan beririsan dengan orientasi pola utama berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya.

Jika dibandingkan dengan hasil survei deteksi distribusi permeabilitas menggunakan konsentrasi Radon-222 dalam gas tanah (Prasetio dan Laksmingpuri *et al.*, 2020), menunjukkan lokasi pengukuran yang berada di dekat mata air panas memiliki konsentrasi ^{222}Rn terukur tinggi dan anomali atau diatas ambang nilai konsentrasi tinggi Radon-222. Hal ini menunjukkan bahwa daerah zona permeabilitas dengan nilai tertinggi dari peta kontur FFD mendukung hasil penelitian tersebut.

Penelitian ini menggunakan metode penginderaan jauh, FFD, dan pemodelan 3D menunjukkan kontrol struktur geologi berpengaruh terhadap pembentukan zona permeabilitas dan kemunculan manifestasi panas bumi. Data hasil perhitungan dengan metode ini dapat menjadi pertimbangan dalam kegiatan eksplorasi lebih lanjut.

KESIMPULAN

Morfologi daerah penelitian memperlihatkan bentang alam puncak

gunung api dengan dinding lereng curam dan kelurusan punggung lembah tebing curam yang dipengaruhi oleh struktur geologi berupa patahan atau sesar dengan arah dominan barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya.

Hasil analisis kerapatan patahan dan rekahan dengan metode FFD memperlihatkan daerah bagian timur laut Gunung Tampomas yaitu pada lokasi kemunculan manifestasi memiliki tingkat kerapatan dan rekahan yang tinggi. Hal ini mengekspresikan patahan membentuk zona permeabel memungkinkan sebagai tempat sirkulasi fluida masuk (*recharges area*) ke reservoir dan kemudian keluar (*discharges area*) sebagai fluida panas bumi ke permukaan berupa manifestasi mata air panas permukaan.

Daerah dengan zona permeabilitas tinggi dapat menjadi daerah prospek untuk diteliti lebih lanjut. Disarankan agar dilakukan penelitian lanjutan khususnya dengan melakukan pengukuran kekar atau cermin sesar sehingga diperoleh data arah dan jenis sesar, serta pola hidrologi (*hydrology flow*) pada daerah prospek tersebut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih penulis ucapkan kepada kepada Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim,. 2020. *Current Geothermal Landscape and Government Objective for Future Development* [Dokumen PDF]. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi Diperoleh dari Catatan Kuliah online.

----- Peta Per wilayah Provinsi Jawa Barat. Indonesia Geospatial Portal. Portal Geospasial Indonesia. Diakses pada 15 Oktober 2020.

- Dirk, H. J. M. 2008. 'Petrologi - geokimia Batuan Gunung Api Tampomas dan sekitarnya'. *Jurnal Geologi Indonesia*. Vol. 3, no. 1, hal. 23-35.
- Febyani, S., Pradhana K.M.F., Rivaldy, M., Syafri, I., Nur, A.A, Embara, P. & Nugroho, S.D. 2020. 'Analisis Kerentanan Gempa pada Jalur Sesar Baribis Menggunakan Metode Microearthquake (Meq)'. *Bulletin of Scientific Contribution Geology*. Vol. 18, no. 1, hal. 1-12.
- Gentana, D., Sukiyah, E., Sulaksana, N & Yuningsih, E.N 2017, 'Determination Tanggamus Geothermal Prospect Area, Lampung Province, South Sumatra Based on Remote Sensing and 3D Micromine Software', *FIG Working Week*, Helsinki, Finland, May 29–June 2, 2017.
- Gentana, D., 2018. Indeks Geomorfik Sebagai Dasar Karakterisasi Neotektonik Untuk Penentuan Prospek Panas bumi di Gunung Rendingan dan Sekitarnya, Lampung. *Disertasi*. Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung.
- Haryanto, I., & Hilmi, F. 2008. 'Pola Struktur Regional Jawa Barat'. *Bulletin of Scientific Contribution Geology*. vol. 5, no. 1, hal. 57-66.
- Haryanto, I. 2014. Evolusi Tektonik Pulau Jawa Bagian Barat Selama Kurun Waktu Kenozoikum. *Disertasi*. Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung.
- Hermawan, D., & Rezky, Y. 2011. 'Delineasi Daerah Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kelurusan Citra Landsat di Candi Umbul - Telomoyo, Provinsi Jawa Tengah'. *Buletin Sumber Daya Geologi*. Vol. 6, no. 1, hal. 1-10.
- Kasbani. 2009. 'Tipe Sistem Panas Bumi di Indonesia dan Estimasi Potensi Energinya'. *Buletin Sumber Daya Geologi*. vol. 4, no. 3, hal. 19-26.
- Massinai, M.A. 2015. *Geomorfologi Tektonik*. Pustaka Ilmu. Yogyakarta.

- Prasetio, R., Laksmningpuri, N. & Satrio. 2018. 'Karakteristik Kimia dan Isotop Fluida Panas Bumi Daerah Gunung Tampomas, Jawa Barat'. *Riset Geologi dan Pertambangan*. Vol. 28, no.1, hal. 1-11.
- Prasetio, R., Laksmningpuri, N. & Pujiindiyati, E.R. 2020. 'Konsentrasi Radon-222 dalam Gas Tanah untuk Deteksi Distribusi Permeabilitas di Daerah Panas Bumi Tampomas, Jawa Barat'. *Eksplorium*. Vol. 41, no. 1, hal. 53-60.
- Sasilani, R., Haryanto, A.D., Hutabarat, J., Hermawan, D & Widodo, S. 2019. 'Zone of Geothermal Prospects Based on Fault Fracture Density (Ffd) Method in Sumani Region, West Sumatera'. *Journal Of Geological Sciences and Applied Geology*. Vol. 3, no. 2, hal. 22-35.
- Siagian, R., Maryudi, M. & Purba, V. 2018. 'Integrated Research for Geothermal Prospect Zone of Lawu Mountain Based on Geothermal Manifestation, Rock Alteration, Geochemical Analysis of Fluid, Fault Fracture Density and Magnetotelluric Data'. *Proceedings of the 6th Asian Academic Society International Conference (AASIC)*. Hal. 595-604.
- Silitonga, P.H. 1973. Peta Geologi Lembar Bandung, Jawa. Skala 1:100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Suryantini, & Wibowo, H.H.,. 2010. 'Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System; a Case Study in Sulawesi-Indonesia'. *Jurnal Geoaplika*. Vol. 5, no. 1, hal. 027 – 037.
- Thanoun, R.G. 2013. 'Automatic Extraction and Geospatial Analysis of Lineaments and their Tectonic Significance in some areas of Northern Iraq using Remote Sensing Techniques and GIS'. *International Journal of Enhanced Research In Science Technology & Engineering*. Vol. 2, no. 2, hal. 1-11.
- Twidale, C.R., 2004. 'River Patterns and Their Meaning'. *Earth-Science Reviews*. Vol. 67, no. 3-4, hal. 159-218.

Diterima	: 21 Juli 2021
Direvisi	: 1 Agustus 2021
Disetujui	: 26 Agustus 2021

**IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS
FAULT FRACTURE DENSITY CITRA DIGITAL ELEVATION MODEL ALOS PALSAR
DI GUNUNG RAJABASA**

**IDENTIFICATION OF GEOTHERMAL RESERVOIR ZONE BASED ON FAULT FRACTURE
DENSITY ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODEL ALOS PALSAR IMAGE
IN MOUNT RAJABASA**

**I Gede Boy Darmawan^{1,2}, Dirga Ilham Fahlevi¹, Muhammad Farhan Yassar^{1,2},
dan Fachri Aldi Pramudya¹**

¹Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung

²Tim Riset Unila Geoscience, Teknik Geofisika, Universitas Lampung
igedeboy@staff.unila.ac.id

ABSTRAK

Gunung Rajabasa merupakan salah satu lapangan panas bumi di Sumatra yang belum dapat dieksploitasi hingga saat ini. Keberadaan manifestasi di daerah ini menjadi petunjuk keberadaan zona reservoir panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona permeabilitas tinggi berdasarkan analisis *Fault Fracture Density* (FFD) dan menganalisis keterkaitan antara karakteristik struktur jalur fluida panas bumi ke permukaan dengan lokasi zona reservoir panas bumi. Metode FFD dilakukan dengan menggunakan Citra *Digital Elevation Model* (DEM) ALOS PALSAR untuk memetakan kelurusan/*lineament* yang berasosiasi dengan zona patahan maupun rekahan khususnya di area manifestasi. Observasi struktur di lapangan dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil FFD. Arah dominan dari struktur yang teridentifikasi sebagian selaras dan searah dengan sistem sesar Sumatra yaitu arah Barat Laut – Tenggara dan sebagian menunjukkan respons yang memotong sistem sesar utama. Selanjutnya, hasil analisis FFD menunjukkan keterkaitan yang cukup signifikan antara zona lemah (*fracturing*) dengan zona reservoir panas bumi yang ditunjukkan oleh pola densitas struktur tinggi pada zona *upflow* di manifestasi Way Belerang, sedangkan pada zona *outflow* di manifestasi mata air panas Gunung Botak berada pada densitas struktur yang rendah.

Kata kunci: Kelurusan, Manifestasi, Panas Bumi, Rajabasa, Reservoir

ABSTRACT

Mount Rajabasa is one of the geothermal fields in Sumatra that has not been exploited until now. The existence of manifestations in this area is an indication of the potential existence of geothermal reservoirs. This study aims to identify high permeability zones based on Fault Fracture Density (FFD) analysis and to analyze the relationship between the characteristics of the geothermal fluid path structure to the surface and the potential location of the geothermal reservoir. The FFD method is carried out using the Digital Elevation Model (DEM) ALOS PALSAR image to map the lineaments associated with fault zones and fractures, especially in the manifestation area. Field observations were made to confirm the FFD results. The dominant direction of the identified structures is partially aligned and in line with the Sumatra fault system, namely the northwest-southeast direction and partly shows a response that intersects the main fault system. Furthermore, the results of the FFD analysis show a significant relationship between the weak zone (fracturing) and the geothermal reservoir zone as indicated by the high structural density pattern in the upflow zone in the Way Sulfur manifestation, while the outflow zone in the hot springs of Mount Botak is at a low structural density.

Keywords: Geothermal, Lineament, Manifestations, Rajabasa, Reservoir

PENDAHULUAN

Keberadaan manifestasi panas bumi di Gunung Rajabasa menandakan adanya potensi energi panas bumi di daerah ini. Manifestasi panas bumi berupa fumarol, kolam lumpur dan mata air panas muncul di bagian Utara dan Selatan kaki Gunung Rajabasa. Gunung Rajabasa saat ini, muncul di dalam cekungan kaldera Pra-Rajabasa. Proses ini bersamaan dengan erupsi lereng dan gunungapi monogenesis, sebagai tahap terbentuknya kedua kerucut komposit. Gunungapi Pra-Rajabasa dan Rajabasa tersusun atas batuan berupa aliran lava, breksi gunungapi, dan tuf dengan komposisi basal sampai andesit (Bronto dkk., 2012).

Metode-metode eksplorasi di lapangan panas bumi ditujukan untuk menentukan kedalaman dan batas-batas reservoir sebagai sumber energi panas bumi yang akan dieksploitasi. Gambaran reservoir bawah permukaan yang akurat sangat diperlukan untuk menentukan posisi reservoir panas bumi (Darmawan dkk., 2015).

Penelitian ini difokuskan pada pemanfaatan citra ALOS PALSAR khususnya DEM ALOS PALSAR untuk mendeteksi kelurusan-kelurusan di permukaan yang mencerminkan struktur. Citra ini adalah citra radar yang diperoleh dari hasil perekaman pantulan balik gelombang mikro oleh obyek. Hasil dari perekaman citra radar tahan terhadap kondisi cuaca atmosfer bumi serta waktu perekaman dapat dilakukan pada siang maupun malam hari (Rosenqvist dkk., 2014). Kelebihan ini diharapkan dapat diterapkan untuk mendeteksi struktur permukaan dengan baik.

Metode *Fault Fracture Density* (FFD) merupakan metode sederhana yang digunakan untuk mengidentifikasi daerah panas bumi berdasarkan densitas kelurusan. Kelurusan ini diasumsikan berasosiasi dengan *fault* atau *fracture* sebagai zona lemah yang menjadi jalur pergerakan fluida dari reservoir

ke permukaan dan muncul sebagai manifestasi seperti mata air panas atau fumarol.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menentukan zona permeabilitas tinggi di lokasi panas bumi Gunung Rajabasa berdasarkan analisis *Fault Fracture Density* (FFD) sebagai acuan dalam menganalisis keterkaitan antara karakteristik struktur sebagai zona lemah terhadap jalur fluida panas bumi ke permukaan. Analisis struktur ini ditujukan untuk mengidentifikasi lokasi zona reservoir panas bumi berdasarkan analisis zona lemah (*fracturing*). Diharapkan penelitian ini mampu memberikan informasi penting dalam program eksplorasi panas bumi di Gunung Rajabasa, sehingga dapat segera dieksploitasi menjadi sumber energi listrik yang baru dan terbarukan.

GEOLOGI

Geologi Gunung Rajabasa

Penelitian ini difokuskan pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa, yang terletak di Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Lokasi penelitian berjarak kurang lebih 31 km dari pelabuhan Bakauheni. Berdasarkan pada Peta Geologi Regional, Gunung Rajabasa berada pada Formasi Satuan Gunungapi Muda (Qhv) tersusun dari lava berkomposisi andesit-basal, breksi dan tuf. Formasi Lampung (QTI) dan Andesit Tersier (Tpv) berada di sekelilingnya (Gambar 1) (Mangga dkk., 1993).

Adapun produk vulkanisme berumur Tersier yang tersusun oleh lava andesitik, menyebar dari Barat sampai Tenggara. Satuan ini merupakan satuan paling tua di area penelitian. Karakteristik aliran lava yang tersingkap mengindikasikan bahwa perkembangan satuan andesit ini cukup dekat dengan pusat erupsi. (Bronto dkk., 2012). Tidak ada sejarah erupsi yang terekam di Gunung Rajabasa, hanya terjadi peningkatan aktivitas vulkanik di tahun 1863 dan 1892 tetapi tidak sampai terjadi erupsi (Budiardjo dkk., 1995). Satuan

Andesit (Tpv) terbentuk di lingkungan terestrial, memperlihatkan kekar lembar sangat kuat. Satuan ini berupa lava dengan komposisi andesit berwarna kelabu tersingkap segar, ditindih tidak selaras oleh Formasi Lampung serta terkekarkan kuat.

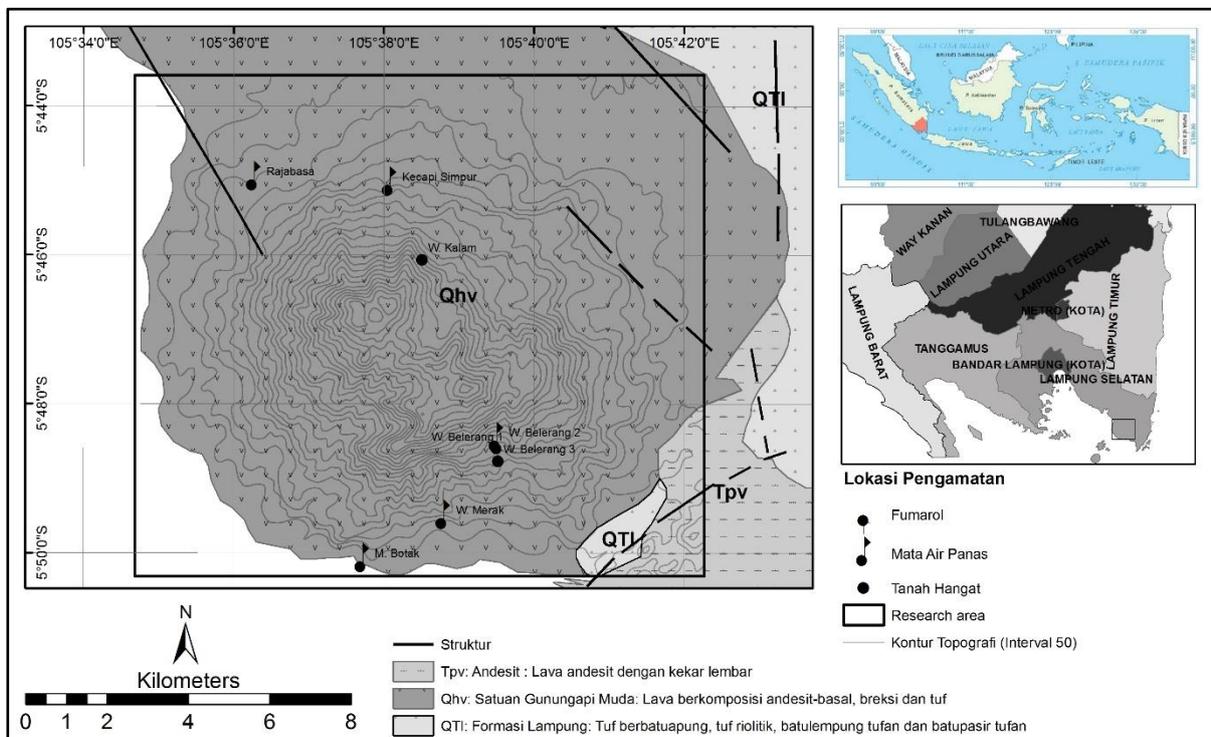
Formasi Lampung (QTI) diendapkan di lingkungan terestrial-fluvial, serta air payau yang menindih tak selaras satuan-satuan yang lebih tua dan ditindih tak selaras oleh endapan Kuartar. Sebarannya menjemari sampai lajur busur belakang. Batuan ini terdiri dari tuf berisi riolit dan dasit serta vulkanoklastika tuffan. Formasi batuan termuda dengan nama Satuan Gunungapi Muda (Qhv) mendominasi seluruh area Gunung Rajabasa. Formasi ini tersusun atas lava dengan komposisi andesit sampai basal, breksi dan tuf.

Struktur Regional Gunung Rajabasa

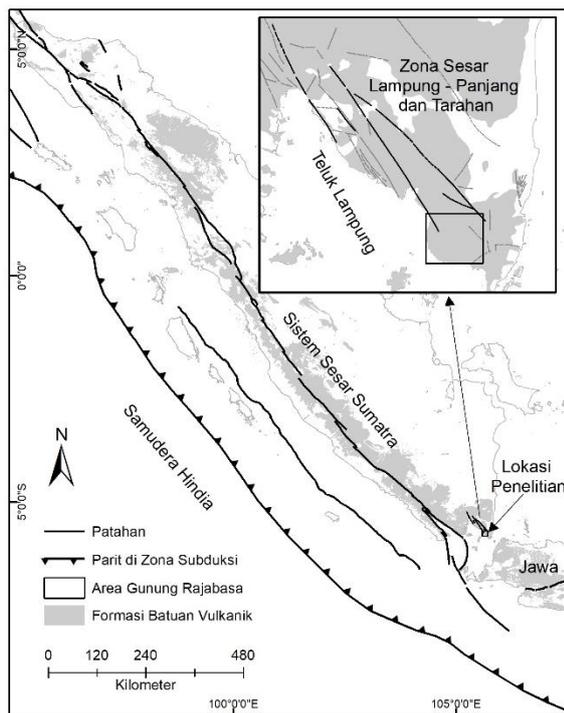
Secara tektonik dan topografi daerah penelitian ini sangat kompleks. Vulkanisme terkait subduksi yang terkenal di Indonesia salah satunya adalah keterjadian gunung api Kuartar yang berada di sepanjang

busur Sunda dan Banda (Gambar 2). Adanya transisi dari depan ke subduksi miring di Selat Sunda diperkirakan sebagai daerah perluasan yang merupakan hasil gerak berarah barat laut dari irisan busur di antara parit dan Sistem Sesar Sumatra (Barber dkk., 2005).

Sesar kompleks dan banyak dijumpai secara regional adalah sesar-sesar berarah Barat Laut – Tenggara. Sebarannya sangat luas dan panjang masing-masing sesar mencapai 25 – 35 km. Khususnya sesar banyak ditemukan di Lajur Barisan, di bagian Barat Daya, tetapi kemungkinan besar terdapat di bawah runtunan penutup endapan Kuartar. Sesar-sesar yang terpetakan di Lajur Barisan mempunyai sejarah yang kompleks, dibuktikan dengan gerakan-gerakan turun dan berbalik. Secara tak resmi, sesar-sesar utama ini disebut Sesar Lampung – Panjang dan Menanga (Gambar 2). Selain itu, sesar-sesar ini juga ditafsirkan sebagai bagian maupun gabungan dari Sistem Sesar Sumatra (Mangga dkk., 1993).



Sumber: dimodifikasi dari (Mangga dkk., 1993) oleh (Darmawan dkk., 2013)
Gambar 1. Peta Geologi Regional Gunung Rajabasa yang terdiri dari tiga formasi batuan yaitu Andesit Tersier (Tpv), Satuan Gunungapi Muda (Qhv) dan Formasi Lampung (QTI)



Sumber: dimodifikasi dari (Barber dkk., 2005; Mangga dkk., 1993)

Gambar 2. Peta struktur geologi regional Sumatra

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan kegiatan meliputi pengolahan dan analisis data serta interpretasi hasil penelitian. Laboratorium Eksplorasi Geofisika Jurusan Teknik Geofisika dan di Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa menjadi lokasi penelitian ini. Kegiatan pengolahan dan analisis data Citra DEM ALOS PALSAR menggunakan perangkat lunak berupa QGIS dan PCI Geomatics, sedangkan observasi langsung di lapangan menggunakan peralatan survei geologi.

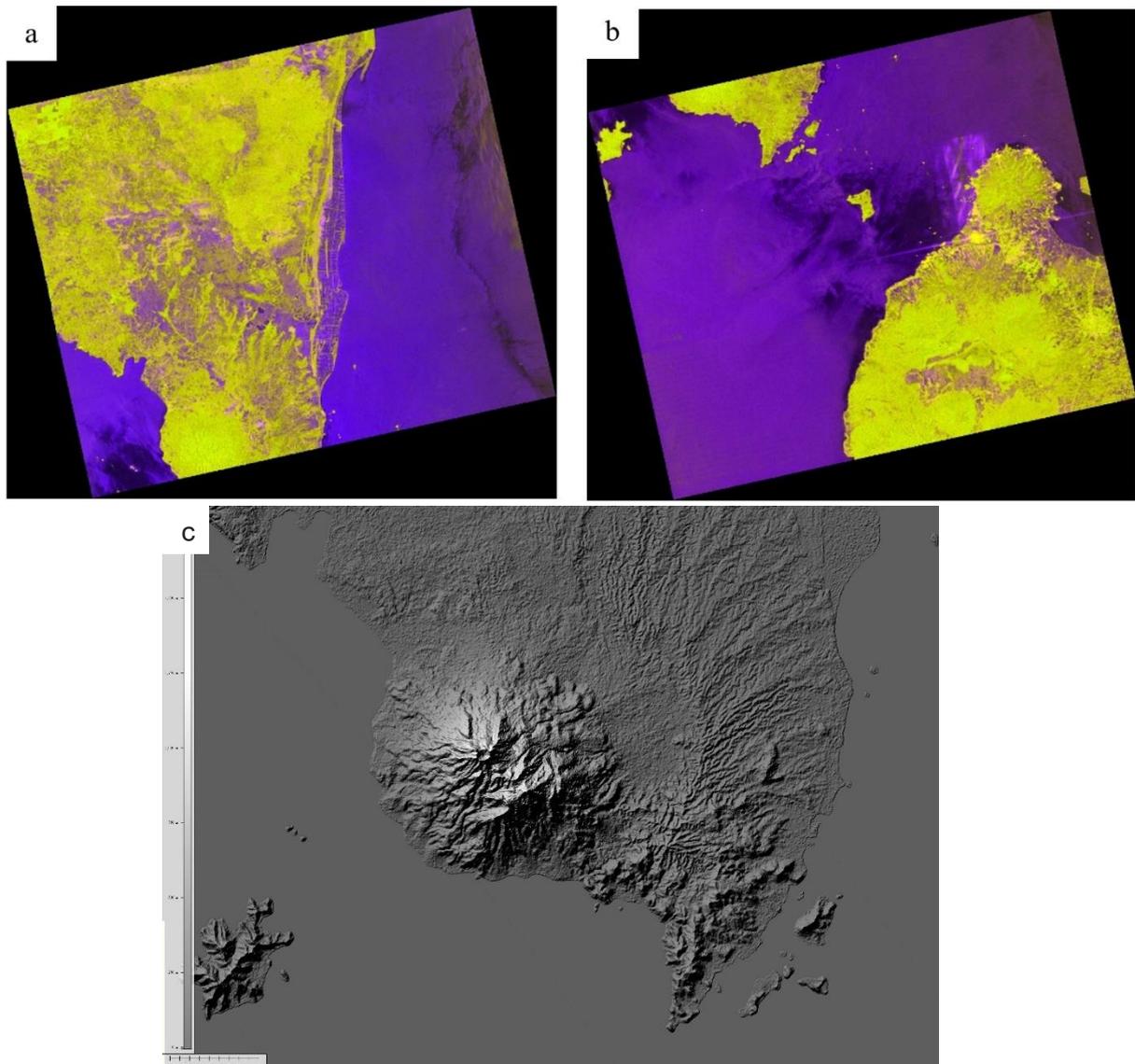
Citra ALOS PALSAR

Penelitian ini menggunakan dua citra ALOS PALSAR yaitu citra dengan nomor scene AP_13982_FBD_F7070_RT1 dan scene AP_13982_FBD_F7060_RT1 (Gambar 3) yang diunduh secara akses terbuka dari <https://search.asf.alaska.edu/>. Kedua citra tersebut dimosaik untuk mendapatkan data khusus di area Gunung Rajabasa. Hasil mosaik yang telah diekstrak pada daerah Gunung Rajabasa kemudian di proses menjadi data DEM ALOS dengan resolusi spasial 12,5 meter.

ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) merupakan satelit milik Jepang yang merupakan satelit generasi lanjutan dari JERS-1 (*Japanese Earth Resources Satellite-1*) dan ADEOS (*Advanced Earth Observing Satellite*). ALOS diluncurkan di tahun 2006 dari stasiun peluncuran Tanegasima Space Center. Satelit ALOS memiliki periode orbit selama 46 hari dan mengorbit pada ketinggian 691 Km (Rosenqvist dkk., 2014). Satelit ini juga memiliki tiga instrumen sensor berupa *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) dengan resolusi 2,5 meter (*along track*), *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type-2* (AVNIR-2) dengan resolusi 10 meter, serta *Phased-Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR).

Untuk dapat bekerja dengan ketiga jenis sensor di atas, ALOS dilengkapi dengan dua teknologi yang lebih maju. Pertama teknologi yang mampu mengerjakan data dalam kapasitas yang sangat besar dengan kecepatan tinggi, dan selanjutnya kapasitas untuk menentukan posisi satelit dengan ketinggian yang lebih tepat. Satelit ALOS diluncurkan dengan tujuan untuk berkontribusi pada pemanfaatan seperti kartografi, penelitian sumber daya alam, pemantauan bencana alam, maupun pengamatan regional (Das dkk., 2015; Samsonov, 2010).

Sensor PALSAR yang dimiliki oleh ALOS merupakan sensor gelombang mikro aktif yang bekerja pada frekuensi *L-Band*. Sensor ini mampu melakukan observasi baik siang maupun malam hari, mampu menembus awan dan tanpa terpengaruh kondisi cuaca, sehingga informasi permukaan bumi dapat diperoleh setiap saat. Sensor ini juga merupakan pengembangan dari sensor SAR dari satelit pendahulunya yaitu satelit JERS-1. Sensor PALSAR pada ALOS memiliki tiga mode polarimetri yaitu *single polarisation*, *dual polarisation*, dan *full polarimetry* (Rosenqvist dkk., 2014; Shimada dkk., 2014; Whittle dkk., 2012).



Gambar 3. (a) Citra ALOS PALSAR scene AP_13982_FBD_F7070_RT1 (b) dan AP_13982_FBD_F7060_RT1 (c) di area Gunung Rajabasa yang dimosaik dan *shaded relief* dengan menggunakan *azimuth* cahaya 315° , dan dengan ketinggian cahaya 45° di daerah penelitian

Metode *Fault Fracture Density* (FFD)

Munculnya manifestasi panas bumi di permukaan umumnya disebabkan oleh perambatan panas dari bawah permukaan atau diakibatkan adanya rekahan-rekahan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air panas) untuk mengalir ke permukaan (Bujung dkk., 2011). Struktur-struktur yang menjadi jalur aliran fluida panas ke permukaan diasumsikan sebagai bidang lemah yang dapat menjadi salah satu petunjuk keberadaan zona uap/reservoir panas bumi (Suryantini dan Wibowo, 2010).

Metode *Fault Fracture Density* dapat digunakan untuk mengetahui kondisi struktur makro di suatu daerah, merupakan pengembangan dari analisis geospasial. Melalui penerapan pola dan perhitungan kerapatan garis lineasi pada citra satelit, metode ini mampu mengidentifikasi zona-zona lemah. *Fracture* yang teridentifikasi dari hasil analisis FFD merupakan pola kelurusan, seperti pola kelurusan sungai maupun gawir yang diakibatkan oleh aktivitas sesar (Chemong dan Chenrai, 2013).

Pemetaan struktur berupa kelurusan/*lineament* berdasarkan pada analisis citra satelit, salah satunya dapat dimanfaatkan untuk mengetahui zona mineralisasi emas di kawasan Australia bagian barat (Tripp dan Vearncombe, 2004), juga menggunakan FFD untuk eksplorasi panas bumi (Bujung dkk., 2011; Suryantini dan Wibowo, 2010), serta dapat dimanfaatkan sebagai salah satu metode yang membantu penentuan daerah rawan bencana gerakan tanah terhadap aktivitas tektonik di sekitarnya (Liu dan Mason, 2013).

HASIL DAN PEMBAHASAN

HASIL

Berdasarkan hasil pengolahan data citra ALOS PALSAR yang telah menghasilkan data DEM, maka proses ekstraksi *lineament* dapat dilakukan dengan mentransformasikan data DEM tersebut menjadi mode *hillshade* berdasarkan arah sudut penyinaran (*azimuth*) dan ketinggian. Untuk mendapatkan hasil yang optimal, ketinggian penyinaran yang digunakan adalah 45° berlaku pada semua arah *azimuth* yang digunakan. Pada penelitian ini, telah digunakan empat arah sudut *azimuth* dalam ekstraksi *lineament* yaitu sudut 45°, 135°, 225° dan 315°.

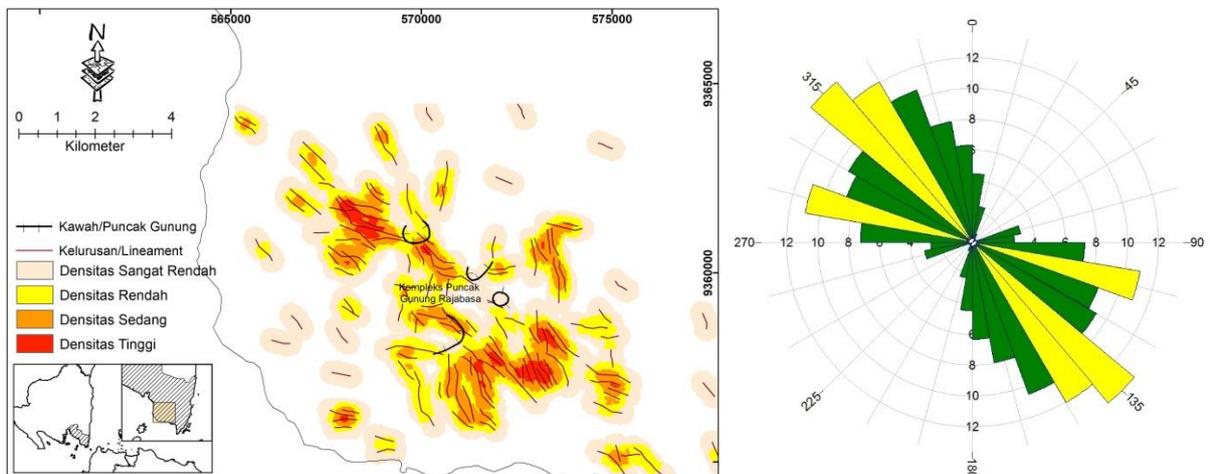
Densitas Struktur (FFD) Tiap Sudut Penyinaran

Pada sudut penyinaran dan *azimuth* 45°,

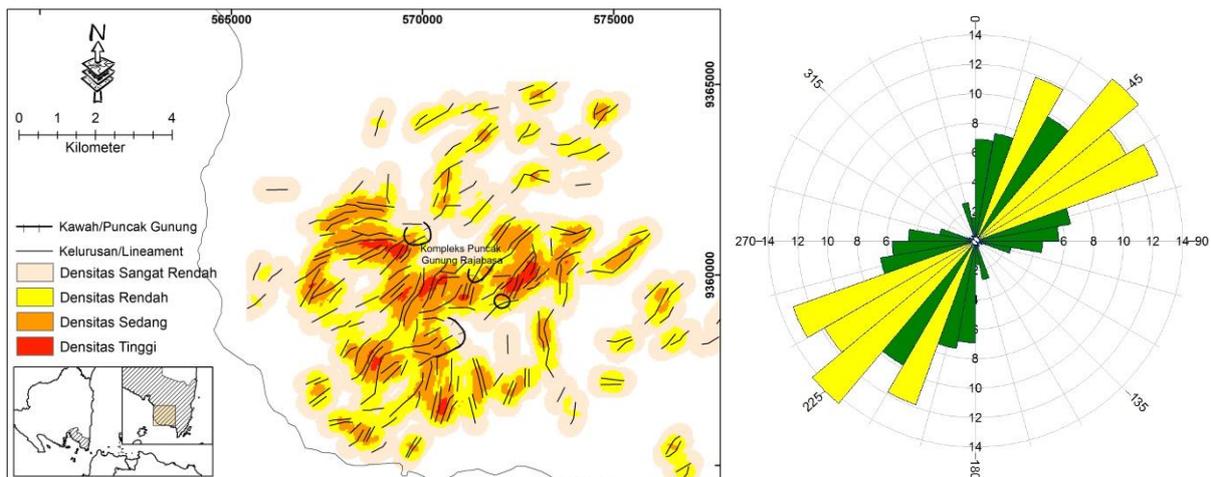
hasil ekstraksi *lineament* pada data DEM ALOS PALSAR di area Gunung Rajabasa didominasi oleh arah Barat Laut – Tenggara (Gambar 4). Secara kualitatif, densitas kelurusan hasil FFD yang mencirikan zona lemah di area Gunung Rajabasa bernilai tinggi di sekitar puncak gunung dan memiliki orientasi dominan pada arah Barat Laut sampai Tenggara dari puncak Gunung Rajabasa. Sementara untuk nilai densitas rendah tersebar di sekitar kaki Gunung Rajabasa khususnya di bagian Utara dan Barat dari puncak gunung.

Terdapat dua arah dominan pada 349 populasi kelurusan/*lineament* yaitu pada arah Barat Laut – Tenggara dan Barat Barat Laut – Timur Tenggara. Arah *fractures* dominan berdasarkan ekstraksi *lineament* ini selaras dengan arah struktur utama pada sistem sesar Sumatra yang berkembang di daerah ini. Sedangkan pada sudut penyinaran dan *azimuth* 135°, hasil ekstraksi *lineament* di area Gunung Rajabasa didominasi oleh arah Timur Laut – Barat Daya (Gambar 5).

Berdasarkan Gambar 5, densitas kelurusan tinggi dari hasil FFD masih berada di sekitar puncak gunung. Kelurusan ini memiliki orientasi dominan khususnya ke arah Timur Laut dan Barat Daya. Sementara itu, densitas kelurusan bernilai rendah tersebar di sekitar kaki Gunung Rajabasa khususnya di bagian Utara dan Selatan dari puncak gunung.



Gambar 4. Hasil ekstraksi *lineament* dan FFD pada data DEM ALOS PALSAR di area Gunung Rajabasa pada sudut *azimuth* 45°



Gambar 5. Hasil ekstraksi *lineament* dan FFD pada data DEM ALOS PALSAR di area Gunung Rajabasa pada sudut *azimuth* 135°

Berdasarkan analisis *lineament* dengan menggunakan diagram mawar (*rose diagram*), terdapat tiga arah dominan pada 428 populasi kelurusan/*lineament* yaitu pada arah Timur Laut – Barat Daya, Timur Laut – Barat Barat Daya dan Utaratimurlaut – Selatanbaratdaya. Arah *fractures* dominan berdasarkan ekstraksi *lineament* ini berlawanan dengan arah struktur utama pada sistem sesar Sumatra yang berkembang di daerah ini. Kondisi ini merupakan hal yang umum terjadi pada sistem sesar utama yang akan menimbulkan struktur yang memotong sistem sesar utama namun dengan radius yang lebih pendek.

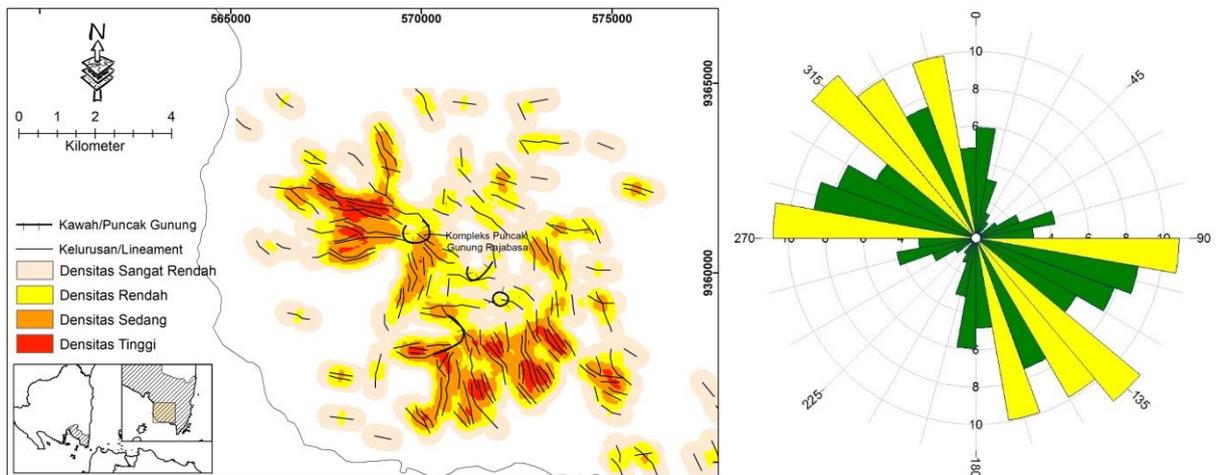
Pada sudut penyinaran dan *azimuth* 225°, area Gunung Rajabasa didominasi oleh arah Barat Laut – Tenggara (Gambar 6). Hasil ini menunjukkan bahwa densitas kelurusan tinggi/zona lemah dominan berada di area puncak gunung serta memiliki orientasi yang dominan dari puncak Gunung Rajabasa ke arah Barat Laut, Selatan dan Tenggara. Sementara untuk nilai densitas rendah tersebar di sekitar kaki Gunung Rajabasa khususnya di bagian Barat Laut – Tenggara dan Selatan dari puncak gunung.

Terdapat tiga arah dominan pada 428 populasi kelurusan/*lineament* yaitu pada arah Barat Laut – Tenggara, Barat-Timur

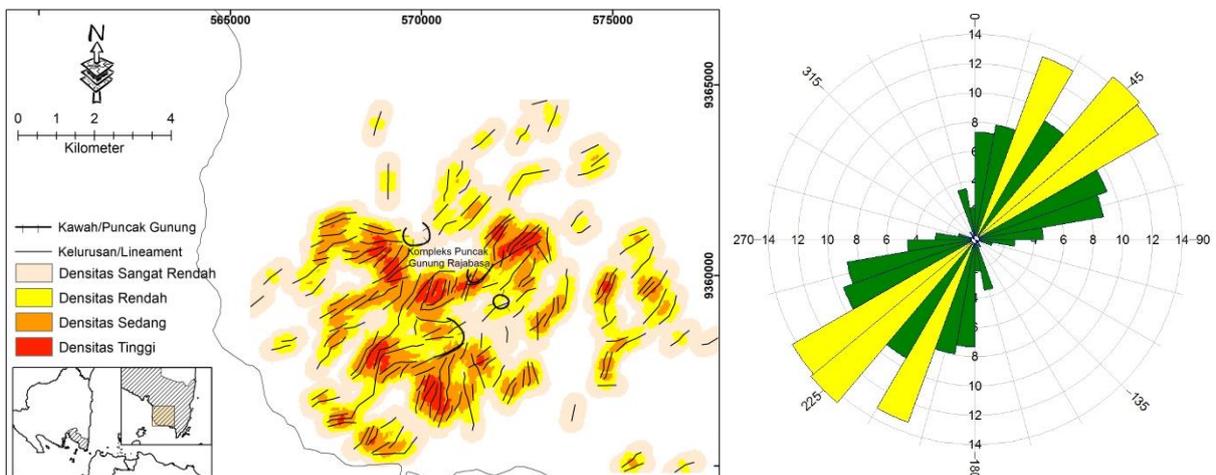
dan Utara Barat Laut – Selatan Tenggara. Arah *fractures* dominan berdasarkan ekstraksi *lineament* ini sebagian selaras dengan arah struktur utama pada sistem sesar Sumatra yang berkembang di daerah ini dan sebagian berlawanan. Kondisi ini umum terjadi pada sesar yang memotong sistem sesar utama dengan radius yang lebih pendek.

Kemudian pada sudut penyinaran dan *azimuth* 315°, hasil ekstraksi *lineament* didominasi oleh arah timur Laut – Barat Daya (Gambar 7). Secara kualitatif, densitas kelurusan hasil FFD yang mencirikan zona lemah di area Gunung Rajabasa bernilai tinggi di sekitar puncak gunung dan memiliki orientasi dominan pada puncak Gunung Rajabasa ke arah Timur, Barat dan Barat Daya. Sementara untuk nilai densitas rendah tersebar di sekitar kaki Gunung Rajabasa khususnya di bagian Timur ke Utara sampai Barat, dan Selatan sampai Tenggara dari puncak gunung.

Terdapat dua arah dominan pada 428 populasi kelurusan/*lineament* yaitu pada arah Timur Laut – Barat Daya dan Utara Timur Laut – Selatan Barat Daya. Arah *fractures* dominan berdasarkan ekstraksi *lineament* ini berlawanan dengan arah struktur utama pada sistem sesar Sumatra yang berkembang di daerah ini.



Gambar 6. Hasil ekstraksi *lineament* dan FFD pada data DEM ALOS PALSAR di area Gunung Rajabasa pada sudut azimuth 225°



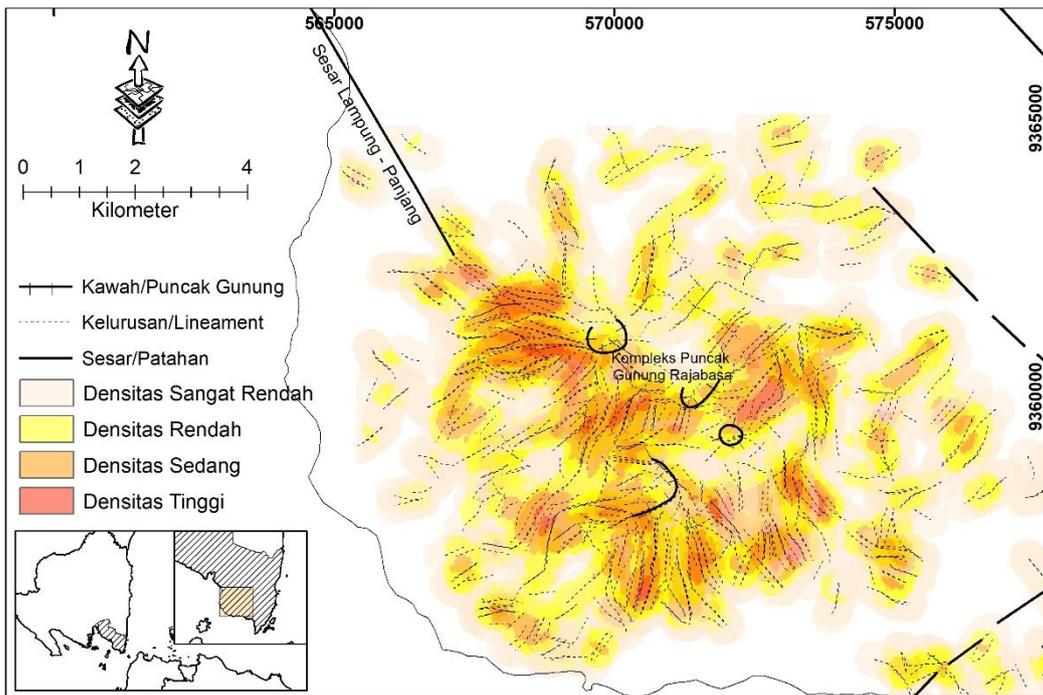
Gambar 7. Hasil ekstraksi *lineament* dan FFD pada data DEM ALOS PALSAR di area Gunung Rajabasa pada sudut azimuth 315°

Observasi di Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa

Untuk mengetahui hubungan arah kelurusan dengan arah struktur yang berkembang di daerah penelitian, maka dilakukan integrasi antara kelurusan/*lineament* hasil ekstraksi dari data DEM ALOS PALSAR yang dikorelasikan dengan pola struktur pada Peta Geologi Regional (Mangga dkk., 1993). Pola kelurusan yang berarah Barat Laut – Tenggara (NW-SE) merupakan pengaruh dari arah struktur sesar utama pada daerah penelitian. Sesar utama yang berarah Barat Laut – Tenggara tersebut merupakan sesar Lampung-

Panjang yang merupakan bagian dari Sistem Sesar Sumatra (Gambar 8).

Struktur geologi yang tampak di lapangan yaitu kekar di manifestasi air panas Gunung Botak yang berarah Timur Laut - Barat Daya dan Barat Laut - Tenggara. Kekar dengan arah Timur Laut - Barat Daya (NE-SW) tampak cukup jelas berada di manifestasi mata air panas Gunung Botak. Selain kekar dengan arah Timur Laut – Barat Daya juga terdapat kekar dengan arah Barat Laut – Tenggara (NW-SE). Kekar dengan arah Barat Laut – Tenggara (NW-SE) juga tampak cukup jelas dan manifestasi air panas tepat berada pada struktur tersebut.



Gambar 8. Peta hubungan arah kelurusan dengan struktur patahan utama



Gambar 9. Kekar berarah Timurlaut-Baratdaya (NE-SW) yang nampak di manifestasi mata air panas Gunung Botak (atas) dan Pola saling memotong antar kekar yang tersingkap pada batuan di area Gunung Rajabasa (bawah)

Keberadaan struktur dengan arah Timur Laut – Barat Daya (NE-SW) dan Barat Laut – Tenggara (NW-SE) memberikan petunjuk mengenai sumber air panas yang ada di Gunung Botak (Gambar 9). Petunjuk ini akan bermanfaat saat menganalisis hubungan antara manifestasi permukaan dengan lokasi reservoir panas bumi.

Struktur-struktur yang tampak di area Gunung Rajabasa mencerminkan adanya zona *fracture* yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona-zona lemah yang berkaitan dengan jalur naiknya fluida panas bumi ke permukaan sebagai manifestasi. Beberapa singkapan kekar di area Gunung Rajabasa menunjukkan pola yang saling memotong antara kekar utama dengan kekar lainnya yang lebih kecil. Pola ini mengkonfirmasi hasil ekstraksi *lineament* pada data DEM ALOS PALSAR yang menunjukkan adanya dominasi dua sampai tiga arah yang memotong atau berlawanan dengan arah Sistem Sesar Sumatra.

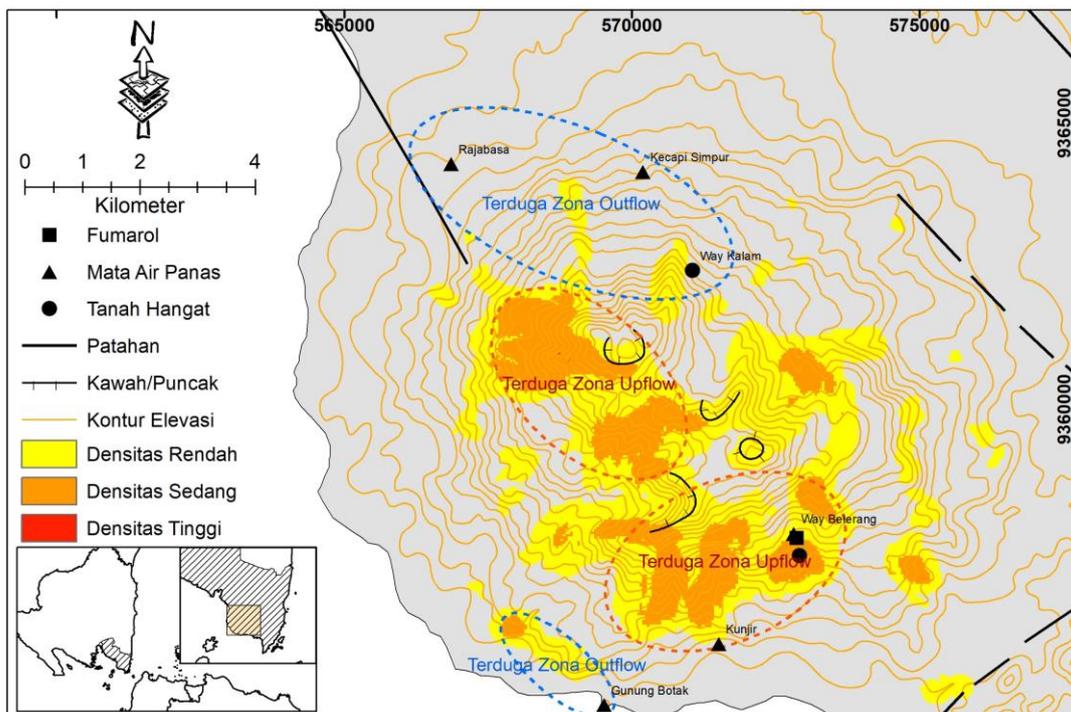
PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis pada ekstraksi *lineament* dan FFD terhadap 4 sudut *azimuth* yang diintegrasikan dengan hasil

pengamatan struktur kekar di lapangan Gunung Rajabasa diperoleh pola penyebaran zona lemah (*fracture zone*) yang kemungkinan berkaitan dengan zona reservoir panas bumi. Dengan memanfaatkan teknik *index overlay* pada seluruh hasil analisis tersebut diperoleh peta sebaran densitas struktur (*Fault Fracture Density*)/FFD (Gambar 10).

Wilayah yang berada pada zona densitas sedang sampai densitas tinggi didominasi pada area sekitar *crater* Gunung Rajabasa, sedikit ke Barat Laut, selatan dan Barat Daya. Zona dengan tingkat kerapatan struktur yang tinggi pada area Gunung Rajabasa mengindikasikan adanya zona lemah yang berkaitan dengan peristiwa dan aktivitas kegunungapian pada masa lalu.

Hal ini ditandai dengan dominasi zona lemah yang sebagian teridentifikasi di dekat area sisa/bekas kawah Gunung Rajabasa. Sementara itu untuk area manifestasi panas bumi yang ada di Gunung Rajabasa memiliki pola yang tidak sama antara manifestasi yang berada di utara dengan manifestasi di selatan terkait zona lemah hasil analisis FFD.



Gambar 10. Peta sebaran zona lemah (*fracture zone*) hasil analisis FFD di Gunung Rajabasa

Area manifestasi di bagian Selatan seperti manifestasi mata air panas Kunjir dan fumarol Way Belerang berada pada zona lemah dengan tingkat kerapatan struktur yang cukup tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa fluida panas bumi yang mengalir ke permukaan dan membentuk manifestasi panas bumi Kunjir dan Way Belerang berasal dari reservoir di sekitar manifestasi akibat zona lemah di wilayah tersebut. Bahkan posisi manifestasi Way Belerang yang berada tepat di atas zona lemah (*fracture zone*) yang diperkirakan sebagai zona reservoir selaras dengan tipe manifestasi asam berupa mata air panas, fumarol dan tanah hangat yang mencirikan manifestasi panas bumi pada zona *upflow*.

Pembentukan manifestasi panas bumi di zona *upflow* diakibatkan oleh adanya pemanasan air meteorik dangkal oleh fase uap fluida yang berasal dari reservoir panas bumi. Hasil pengamatan lapangan dan data sifat kimia fluida yang didominasi oleh unsur Sulfat (Kusumasari, 2011 dalam Darmawan dkk., 2015) menunjukkan ciri alterasi pada zona *upflow* di manifestasi Way Belerang. Sehingga, berdasarkan analisis tersebut, dapat diinterpretasikan bahwa zona lemah yang ditunjukkan dengan densitas struktur yang tinggi di area manifestasi Kunjir dan Way Belerang merupakan bagian dari zona reservoir panas bumi di Gunung Rajabasa.

Manifestasi lain yang teramati di lapangan adalah manifestasi air panas Gunung Botak yang terletak di pantai Wartawan, yaitu di kaki bagian Selatan Gunung Rajabasa tidak berada pada densitas struktur yang tinggi. Namun berdasarkan pengamatan data di lapangan menunjukkan bahwa mata air panas Gunung Botak bersifat netral dan terdapat siter silika. Kondisi ini menunjukkan bahwa manifestasi mata air panas Gunung Botak merupakan manifestasi panas bumi pada zona *outflow*. Interpretasi ini menunjukkan bahwa pada zona *outflow*, struktur yang terbentuk lebih dalam dan tidak intensif di permukaan. Hal ini dikarenakan fluida di zona *outflow* adalah fluida panas bumi yang berasal dari reservoir.

Oleh karena itu diperkirakan struktur yang membawa fluida ke manifestasi mata air panas Gunung Botak berasal dari reservoir melalui struktur bawah permukaan. Terkait posisi zona lemah di dekat Gunung Botak yang dapat diinterpretasikan sebagai zona reservoir atau berasal dari reservoir yang sama dengan manifestasi Kunjir dan Way Belerang masih dapat diperdebatkan sebagaimana konseptual model oleh Darmawan dkk., 2015 dan Kusumasari, 2011. Hasil ini menunjukkan bahwa metode FFD pada penelitian ini mampu mengidentifikasi zona lemah yang diinterpretasikan sebagai representasi zona reservoir panas bumi di permukaan. Meskipun pola struktur permukaan dan bawah permukaan dapat berbeda dan tidak terhubung/berkaitan pada kasus tertentu, pemanfaatan struktur kekar di permukaan masih dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona lemah akibat struktur yang tampak di permukaan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa hasil ekstraksi *lineament* dan FFD pada empat sudut *azimuth* menunjukkan bahwa arah dominan dari struktur yang teridentifikasi sebagian selaras dan searah dengan Sistem Sesar Sumatra dan sebagian menunjukkan respons yang memotong sistem sesar utama. Kenampakan struktur kekar di lapangan Gunung Rajabasa didominasi oleh arah Barat Laut – Tenggara dengan pola kekar tektonik yang saling memotong dari tiga arah.

Hasil analisis FFD juga menunjukkan keterkaitan yang cukup signifikan antara zona lemah (*fracturing*) dengan zona reservoir panas bumi, yang ditunjukkan oleh pola zona *upflow* pada densitas struktur tinggi di manifestasi Way Belerang, dan zona *outflow* di manifestasi mata air panas Gunung Botak. Penelitian ini perlu dilanjutkan dengan memanfaatkan analisis FFD pada data geofisika bawah permukaan seperti data *gravity* dan magnetik agar pola struktur bawah

permukaan dapat diidentifikasi dengan baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada *Alaska Satellite Facility (ASF) Distributed Active Archive Center (DAAC)* untuk akses terbuka seluruh data DEM ALOS PALSAR yang digunakan dalam penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Geofisika Eksplorasi Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan rekan-rekan yang telah membantu dalam penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Barber, A.J., Crow, M.J., Milsom, J.S., 2005. *SUMATRA: Geology, Resources and Tectonic Evolution*. The Geological Society, London.
- Bronto, S., Asmoro, P., Hartono, G., Sulistiyono, S., 2012. Evolution of Rajabasa Volcano in Kalianda Area and Its Vicinity, South Lampung Regency. *Indones. J. Geosci.* 7, 11–25. <https://doi.org/10.17014/ijog.v7i1.132>
- Budiardjo, B., Masdjuk, Leonardus, A.M.N., 1995. Detailed Geological report Rajabasa Mountain area, Lampung.
- Bujung, C.A.N., Singarimbun, A., Muslim, D., Hirnawan, F., Sudradjat, A., 2011. Identifikasi prospek panas bumi berdasarkan Fault and Fracture Density (FFD): Studi kasus Gunung Patuha , Jawa Barat. *J. Lingkung. dan Bencana Geol.* 2, 67–75.
- Chemong, C.A., Chenrai, P., 2013. Fracture density analysis in the sai yok fault, western thailand and its implications for hydrological exploration. *Res. J. Appl. Sci.* 8, 125–130. <https://doi.org/10.3923/rjasci.2013.125.130>.
- Darmawan, I.G.B., Setijadji, L.D., Wintolo, D., 2015. Geology and Geothermal System in Rajabasa Volcano South Lampung Regency, Indonesia (Approach to Field Observations, Water Geochemistry and Magnetic Method), in: *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Darmawan, I.G.B., Setijadji, L.D., Wintolo, D., 2013. Interpretasi Geologi Gunung Rajabasa Berdasarkan Integrasi Citra Aster, DEM dan Geologi Permukaan, in: *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-6*. hal. 285–298.
- Das, A., Agrawal, R., Mohan, S., 2015. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto Int.* 30, 145–153. <https://doi.org/10.1080/10106049.2014.883436>.
- Kusumasari, B.A., 2011. *Geology surrounding areas Waymuli geochemical geothermal fluid in Mountain Rajabasa, South Lampung Regency, Lampung Province*. Skripsi, Institut Teknologi Bandung.
- Liu, J.G., Mason, P.J., 2013. Essential image processing and GIS for remote sensing, *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118687963>.
- Mangga, S.A., Amirudin, Suwarti, T., Gafoer, S., Sidarto, 1993. *Geological Map of Tanjungkarang, Sumatra*. Geological Research and Development Centre, Bandung.
- Rosenqvist, A., Shimada, M., Suzuki, S., Ohgushi, F., Tadono, T., Watanabe, M., Tsuzuku, K., Watanabe, T., Kamijo, S., Aoki, E., 2014. Operational performance of the ALOS global systematic acquisition strategy and observation plans for ALOS-2 PALSAR-2. *Remote Sens. Environ.* 155, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.011>.
- Samsonov, S., 2010. Topographic correction for ALOS PALSAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 48, 3020–3027. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2043739>.
- Shimada, M., Itoh, T., Motooka, T., Watanabe, M., Shiraishi, T., Thapa, R., Lucas, R., 2014. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007-2010). *Remote Sens. Environ.* 155, 13–31. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.014>.

- Suryantini, Wibowo, H., 2010. Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System; a Case Study in Sulawesi-Indonesia, in: Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia. hal. 1–9.
- Tripp, G.I., Vearncombe, J.R., 2004. Fault/fracture density and mineralization: A contouring method for targeting in gold exploration. *J. Struct. Geol.* 26, 1087–1108. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.002>.
- Whittle, M., Quegan, S., Uryu, Y., Stüewe, M., Yulianto, K., 2012. Detection of tropical deforestation using ALOS-PALSAR: A Sumatran case study. *Remote Sens. Environ.* 124, 83–98. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.027>.

Diterima	: 11 Januari 2021
Direvisi	: 21 Juni 2021
Disetujui	: 27 Agustus 2021

**SISTEM PANAS BUMI TEMPERATUR RENDAH-SEDANG PADA CEKUNGAN KUTAI
DAN REKOMENDASI PEMANFAATANNYA****LOW-MEDIUM GEOTHERMAL SYSTEM IN KUTAI BASIN AND ITS UTILIZATION****Andri Eko Ari Wibowo, Mochamad Nur Hadi, dan Dikdik Risdianto**

Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

andri.wibowo@esdm.go.id

ABSTRAK

Pengembangan panas bumi di Indonesia masih didominasi pada sistem panas bumi vulkanik yang digunakan sebagai pemanfaatan tidak langsung (listrik), padahal sekitar 70% dari 357 lokasi panas bumi di Indonesia berasosiasi dengan sistem non vulkanik. Keterbatasan informasi bawah permukaan berupa data sumur dan fluida reservoir serta nilai keekonomian yang rendah, menyebabkan kurang berkembangnya pemanfaatan energi panas bumi di sistem non vulkanik. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang karakteristik kimia air panas seperti tipe, asal-usul, dan temperatur fluida di Kalimantan, khususnya Cekungan Kutai Timur, serta memberikan rekomendasi pemanfaatannya.

Terdapat lima manifestasi berupa air panas dengan temperatur mulai dari 42 s.d. 55°C, pH netral, bertipe bikarbonat, dan terletak pada zona *immature water*. Karakteristik fluida di daerah panas bumi ini berkorelasi dengan litologi daerah penyelidikan yang didominasi oleh batuan sedimen. Hasil plotting nilai isotop O¹⁸ dan D menunjukkan sumber fluida panas bumi berasal dari air meteorik. Air permukaan meresap ke bawah permukaan dan akan terpanaskan oleh batuan panas yang diperkirakan timbul akibat adanya pembebanan dalam waktu yang sangat lama (*geopressured*), yang kemudian membentuk fluida reservoir. Temperatur reservoir diperkirakan sebesar 70 s.d. 170°C, dengan pembentukan sistem panas buminya dipengaruhi oleh lingkungan sedimen dengan umur yang relatif sudah tua (*old hydrothermal system*).

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai memiliki reservoir dengan temperatur sedang-rendah, oleh karena itu pemanfaatannya lebih sesuai digunakan untuk pemanfaatan langsung. Rekomendasi pemanfaatan langsung seperti untuk akuakultur, agro industri, pariwisata, dan balneoterapi dapat diaplikasikan pada semua sistem panas bumi di Cekungan Kutai. Pada sistem panas bumi di daerah Santan Tengah, Samboja, dan Tamapole-Dondang sangat memungkinkan dimanfaatkan untuk balneoterapi terhadap penyakit peradangan tulang karena memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi (>500 ppm). Ada peluang untuk pemanfaatan tidak langsung menjadi energi listrik menggunakan siklus biner, pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang (170°C) dan Samboja (150°C).

Kata kunci: panas bumi, temperatur rendah-sedang, pemanfaatan langsung, Cekungan Kutai Timur, Kalimantan

ABSTRACT

Geothermal development in Indonesia still dominated in volcanic geothermal system which is used as indirect use utilization (electricity), whereas about 70% of 357 geothermal location in Indonesian associate with non-volcanic geothermal system. Lack of subsurface information such as well data and reservoir temperature as well as low economic value that cause geothermal utilization in non-volcanic systems are less develop. Therefore, the purpose of this research is to provide the information of geothermal fluid characteristic such as type, origin,

and fluid temperature in Kalimantan, especially in East Kutai Basin and also the recommendation of its utilization.

There are five hot spring manifestations with a temperature of 42 to 55 °C, neutral pH, bicarbonate type, and located in the immature water zone. This fluid characteristics correlate with the lithology of the area which is dominated by sedimentary rocks. The results of the O¹⁸ and D isotopes indicate that the source of the geothermal fluid comes from meteoric water. Meteoric water flows to subsurface and heated by hot rock from geopressed process, which then forms reservoir fluid. This old hydrothermal system has reservoir temperature is about 70 to 170°C with the formation of its geothermal system is affected by the sedimentary environment.

The geothermal system in the Kutai Basin has a reservoir with medium-low temperatures, therefore its utilization is more suitable for direct utilization. Recommendation of geothermal direct use such as aquaculture, agro industry, tourism, and balneotherapy can be applied on all geothermal system in Kutai Basin. Santan Tengah, Samboja and Tamapole-Dondang are possible for balneotherapy to heal bone-ache due to high bicarbonate concentration (>500 ppm). There also an opportunity to develop indirect use for electricity by using binary cycle technology in Tamapole-Dondang (170 °C) and Samboja (150 °C).

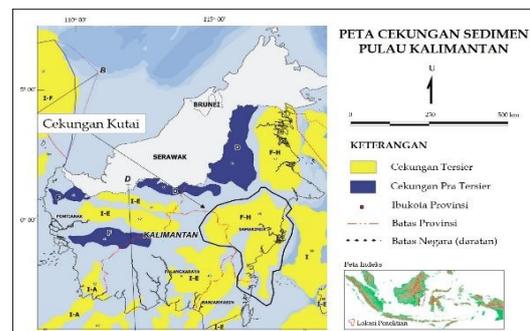
Keywords: geothermal, low-medium temperature, direct use, East Kutai Basin, Kalimantan

PENDAHULUAN

Sistem panas bumi umumnya diasosiasikan dengan gunung api atau busur vulkanik (*volcanic arc*). Semua sistem panas bumi di Indonesia yang sudah dikembangkan menjadi listrik berada di jalur busur vulkanik. Dari 357 lokasi panas bumi yang sudah diidentifikasi oleh Badan Geologi sampai dengan tahun 2020, sekitar 30% berkaitan dengan sistem vulkanik, yang umumnya bertemperatur tinggi. Sisanya sekitar 70% tersebar di Pulau Sulawesi, Kalimantan, dan Papua, yang umumnya merupakan sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang. Beberapa sistem panas bumi diantaranya terletak pada cekungan sedimen seperti di Kalimantan dan Papua. Penelitian ini difokuskan pada beberapa lokasi panas bumi yang sudah diidentifikasi pada Cekungan Kutai di Kalimantan bagian Timur yaitu di Kabupaten Kutai Kartanegara (Gambar 1).

Pengembangan sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang belum banyak diupayakan. Hal ini dikarenakan keterbatasan informasi geosain seperti karakteristik fluida, kedalaman reservoir,

temperatur reservoir, dan model sistem panas bumi serta nilai keekonomian yang kurang menarik. Karakteristik sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang berbeda dengan sistem panas bumi bertemperatur tinggi di lingkungan vulkanik sehingga konsep eksplorasi yang dilakukan juga berbeda. Pada sistem panas bumi bertemperatur rendah-sedang umumnya mempunyai temperatur reservoir 100-200°C, sehingga sistem pembangkitan listrik yang digunakan juga masih terbatas pada *binary cycle*. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem panas bumi non vulkanik di Cekungan Kutai berdasarkan data manifestasi permukaan serta rekomendasi pemanfaatannya.



Gambar 1. Peta lokasi Cekungan Kutai (Modifikasi dari Badan Geologi, 2009)

METODOLOGI

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini berupa pengamatan di lapangan, pengambilan conto, analisis laboratorium dan interpretasi data. Pengamatan yang dilakukan di lapangan meliputi pengamatan karakteristik fisik manifestasi panas bumi seperti temperatur, pH, debit air dan daya hantar listrik. Pengambilan conto fluida berupa pengambilan conto air panas untuk selanjutnya dilakukan analisis geokimia air seperti anion, kation dan isotop di laboratorium. Pengambilan conto fluida dilakukan oleh penulis pada tahun 2018. Data cekungan geologi meliputi formasi dan struktur geologi yang digunakan merupakan data sekunder yang diambil dari beberapa literatur.

Metode analisis yang digunakan terhadap 15 unsur-unsur terlarut meliputi anion utama Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , kation seperti Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Li^+ dan beberapa senyawa netral SiO_2 , NH_3 , F, B, secara berurutan menggunakan ion kromatografi, *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) dan spektrometri. Untuk mengetahui kandungan isotop stabil Deuterium dan Oksigen 18 menggunakan *Mass Spectrometer* (MS). Data hasil analisis laboratorium kemudian diinterpretasi sehingga karakteristik fluida yang terdapat di daerah penelitian dapat diketahui yang selanjutnya digunakan untuk pembahasan sistem panas bumi dan rekomendasi pemanfaatannya.

TINJAUAN GEOSAIN

Berdasarkan Saemundsson dkk (2011), sistem panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan temperatur reservoir (temperatur tinggi, sedang, dan rendah), entalpi (entalpi tinggi dan rendah), keadaan fisik fluida (dominasi air, 2 fasa, dan dominasi uap), dan kondisi geologi. Sistem panas bumi dapat juga diklasifikasikan berdasarkan kondisi geologi yaitu (Saemundsson dkk, 2011) :

1. *Volcanic geothermal system*, sistem ini berasosiasi dengan aktivitas vulkanisme yang masih aktif maupun vulkanisme yang tidak aktif namun masih memiliki sisa panas. Sumber panas sistem panas bumi ini berupa intrusi atau magma.
2. *Convective fracture controlled system*, sumber panasnya berupa batuan panas di kedalaman pada area dengan aktifitas tektonik yang masih aktif, dengan gradient termal di atas rata-rata ($> 30^\circ\text{C}/\text{km}$).
3. *Sedimentary geothermal system*, ditemukan di hampir semua cekungan sedimen. Sistem ini memiliki lapisan sedimen yang permeabel di kedalaman ($>1 \text{ km}$) dan gradien termal di atas rata-rata ($>30^\circ\text{C}/\text{km}$). Transfer panas pada sistem ini lebih cenderung konduktif dibandingkan konvektif, walaupun dibebepada sistem panas bumi aktifitas sesar yang lebih dominan.
4. *Geopressured geothermal system*, sistem ini mirip dengan terbentuknya reservoir pada minyak dan gas dimana fluida terperangkap di kedalaman dengan tekanan yang mendekati nilai tekanan litostatik.
5. *Hot Dry Rock* (HDR), sistem ini memiliki batuan panas dari gradien termal normal dan terletak pada kedalaman yang dalam. Nilai permeabilitasnya juga umumnya rendah dan belum bisa optimal dieksploitasi dengan metode konvensional.
6. *Shallow resources*, sistem ini mengacu pada aliran panas normal melalui formasi dekat permukaan dan energi panas yang tersimpan di bebatuan serta sistem air tanah hangat di dekat permukaan kerak bumi.

Geologi Cekungan Kutai

Cekungan Kutai berada di Kalimantan bagian Timur, merupakan Cekungan Sedimen Tersier terbesar (165.000 km) dan terdalam (12.000 s.d. 14.000 meter) di Indonesia (Gambar 1). Batas cekungan : di bagian utara tinggian Mangkalihat; di selatan *basin hinges* pada Adang – *Flexure*

(*Adang-Paternoster Fault*); di barat tinggian Kuching – bagian dari Kalimantan *Central Range*; di bagian timur Selat Makassar (Zajuli dkk., 2015).

Cekungan Kutai mengalami subsiden pada Paleosen Akhir – Eosen Tengah hingga Oligosen, akibat *basement rifting*, dan menjadi tempat pengendapan Mangkupa *Shale* lingkungan marginal hingga *open marine*. Terdapat silisiklastik kasar, *Beriu Sands*, dalam sekuen lempung indikasi interupsi oleh pengangkatan. Subsiden berlanjut membentuk mekanisme Basin Sagging, menghasilkan endapan lempung Formasi Atan dan karbonat Formasi Kedango (Satyana dkk., 1999).

Stratigrafi Cekungan Kutai dari yang tua muda sesuai Peta Geologi Lembar Balikpapan (Hidayat dan Umar, 1994) terdiri dari:

- a. Formasi Pemaluan, terdiri batupasir, serpih, perselingan batulanau dan batupasir halus, batubara, serpih, *shaly coal*, *coaly shale*.
- b. Formasi Pulaubalang meliputi batupasir, serpih, batugamping, *coaly shale*.
- c. Formasi Balikpapan tersusun oleh serpih, batupasir, batulempung dan batubara
- d. Formasi Kampung baru terdiri dari batupasir, batubara, serpih, dan batulempung.

Struktur geologi yang umum dijumpai di Cekungan Kutai adalah struktur lipatan dan sesar yang berarah timurlaut - baratdaya, dimana inti antiklin didominasi oleh unit litologi batulempung. Kekar dapat berupa *Shear Joint*, *Extensional Joint*, dan *Hybrid Joint* dengan kondisi bukaan bisa terbuka atau tertutup oleh *fracture filling* mineral (Zajuli dkk., 2015).

Manifestasi Panas Bumi

Terdapat lima pemunculan manifestasi berupa air panas, yaitu air panas Santan Tengah, air panas Samboja, air panas Dondang, air panas Tamapole, dan air panas Sanga-sanga (Gambar 2).

Karakteristik fisik dari kelima manifestasi tersebut ditampilkan pada tabel 1.

Air panas Santan Tengah, terletak di Desa Santan Tengah, Kecamatan Marangkayu. Air panas berada di wilayah usaha pertambangan minyak milik PT VICO yang keluar dari bekas sumur bor minyak PT. VICO. Berdasarkan informasi masyarakat, pengeboran dilakukan pada tahun 1974 dengan kedalaman akhir 3.000 *feet* atau sekitar 1.000 meter. Temperatur air panas terukur sebesar 44,8°C dengan temperatur udara 30,4°C, pH 6,2, dan daya hantar listrik (DHL) 1.036 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Air panas berwarna jernih, rasa tawar, dengan debit total sebesar 2 lt/dtk.

Air panas Samboja, berada di desa Sungai Merdeka, Kecamatan Samboja. Air panas Samboja muncul di kawasan Taman Nasional Bukit Bangkirai yang merupakan daerah konservasi orang utan. Air panas Samboja muncul dari rekahan bidang Sesar berarah N 310 E/65 dan rekahan patahan sekunder berarah N 240 E. Temperatur air panas di patahan utama sebesar 47,12°C dan di patahan sekunder 47,11°C, dengan temperatur udara 28,84°C. Air panas berwarna jernih, rasa tawar, dengan pH 6,38, daya hantar listrik (DHL) 1.656 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan debit 0,5 lt/dtk.

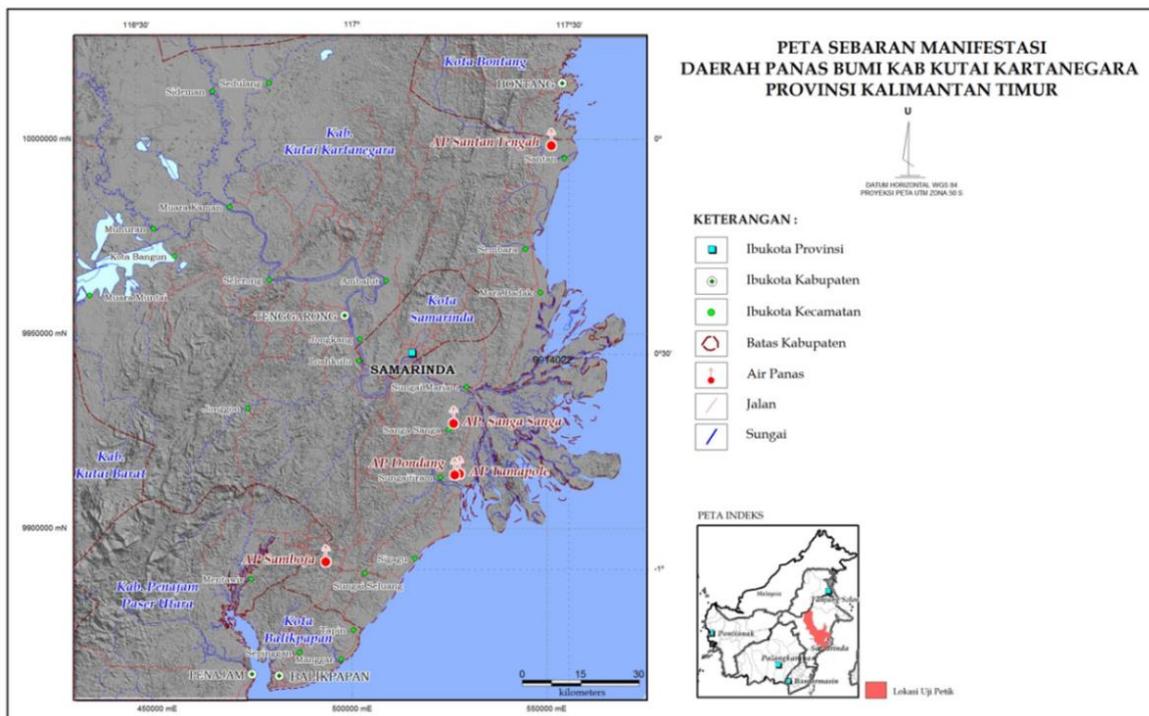
Air panas Dondang, berada di desa Dondang, Kecamatan Muara Jawa, yang muncul melalui celah batuan dan ditampung dalam bak penampungan yang telah dikelola penduduk sekitarnya dengan debit relatif kecil sekitar 0,20 l/detik dan luas manifestasi sekitar 2x3 m². Karakteristik fisik air panas menunjukkan temperatur air sebesar 55,8°C, dengan temperatur udara 36,1°C, pH 8,42, daya hantar listrik 3.520 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ditemukan adanya endapan oksida besi warna kecoklatan dengan kondisi air panas kurang jernih.

Air panas Tamapole, terletak di desa Tamapole, Kecamatan Muara Jawa. Air panas tersebut berada \pm 1 km sebelah timur dari air panas Dondang, yang

menurut informasi masih terdapat banyak pemunculan-pemunculan air panas lainnya di sekitar air panas Tamapole. Lokasi air panas terletak di pinggir jalan desa yang berada di areal persawahan dengan kondisi lahan yang bergambut. Temperatur air panas terukur sebesar 38 s.d. 44,98°C dengan temperatur udara 23,35°C, pH 7,14, dan daya hantar listrik (DHL) 541 $\mu\text{s/cm}$. Air panas berwarna keruh dan berasa tawar.

Air panas Sanga-sanga, terletak di desa Sanga-sanga, Kecamatan Sanga-sanga, yang lokasi pemunculannya berada di pinggir jalan raya. Air panas keluar dari

bekas sumur pemboran minyak yang kedalaman sumurnya belum diketahui. Kondisi pemunculan air panas Sanga-sanga mirip dengan air panas Santan Tengah, dimana air panas keluar ke permukaan akibat aktivitas pemboran minyak. Namun kondisi air panas Sanga-sanga terkontaminasi oleh karat dari pipa air sehingga ditemukan bau besi yang cukup kuat dan air panas yang keruh. Temperatur air panas terukur sebesar 42,47°C dengan temperatur udara 28°C, pH 7,59, dan DHL 212 $\mu\text{s/cm}$. Air panas berwarna keruh, rasa tawar, dan berbau besi.



Gambar 2. Lokasi manifestasi panas bumi

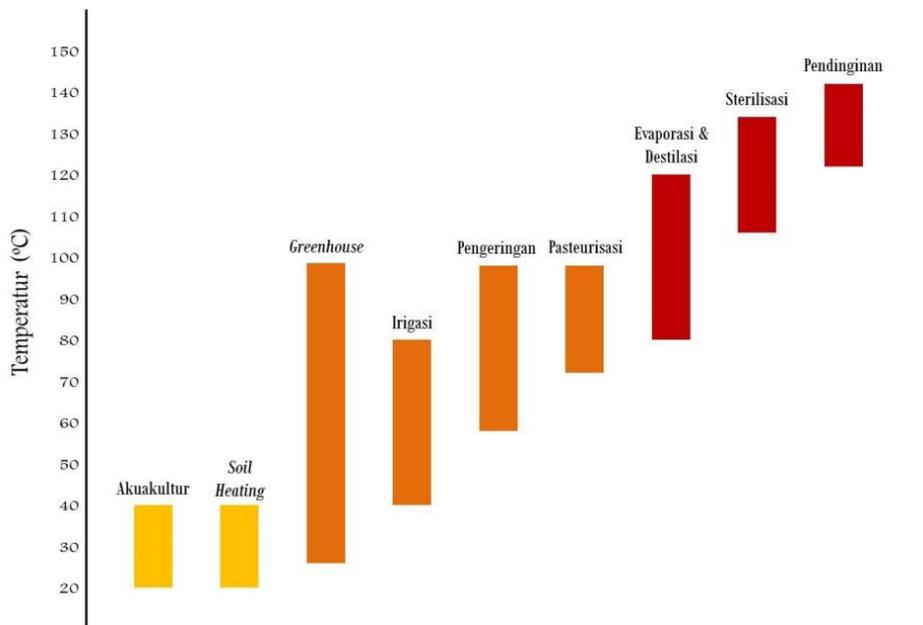
Tabel 1. Karakteristik fisik manifestasi air panas

NO	MANIFESTASI PANAS BUMI	KOORDINAT (UTM)		Z (mdpl)	SUHU AIR (°C)	DEBIT (lt/dtk)	pH	DHL ($\mu\text{S/cm}$)
		(mT)	(mU)					
1	Air Panas Santan Tengah	551270	9998588	38	44,8	2	6,2	1.036
2	Air Panas Samboja	493364	9891728	30	47,12	0,1	6,38	1.656
3	Air Panas Dondang	526425	9914022	12	55,8	0,2	8,24	3.520
4	Air Panas Tamapole	527627	9914350	20	44,98	-	7,14	541
5	Air Panas Sanga-sanga	526146	9927269	3	42,47	-	7,59	212

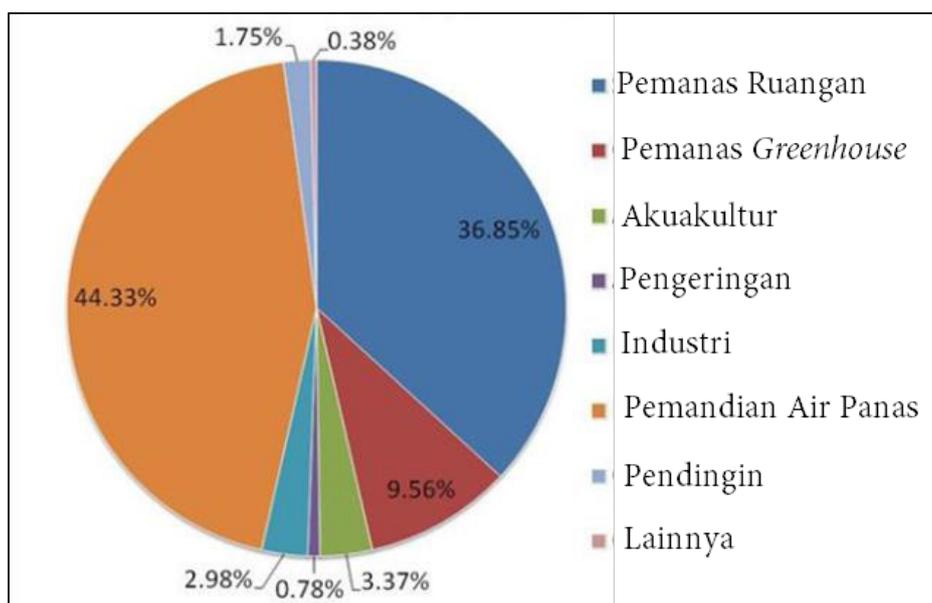
Pemanfaatan Energi Panas Bumi

Secara umum, pemanfaatan energi panas bumi dapat dilihat pada Gambar 3, yaitu pemanfaatan langsung (*direct use*) untuk sektor pariwisata, pertanian, ataupun industri dan pemanfaatan tidak langsung (*indirect use*) menjadi energi listrik. Pemanfaatan energi panas bumi secara langsung di dunia sudah lama berkembang sejak dahulu. Pemanfaatannya digunakan untuk pemandian air panas, pemanas

ruangan, *green house*, pengeringan, dan lain-lain (Gambar 4). Di Indonesia, pemanfaatan langsung energi panas bumi mulai banyak dikembangkan seperti pemanfaatan untuk sektor wisata seperti pemandian air panas dan balneoterapi (terapi air panas) maupun pemanfaatan untuk sektor pertanian seperti pengeringan kopra, teh, coklat, pasteurisasi, dan perikanan.



Gambar 3. Pemanfaatan langsung Panas Bumi di sektor agro industri (modifikasi dari IRENA, 2019)



Gambar 4. Diagram pemanfaatan langsung Panas Bumi di dunia (Lund & Boyd, 2015)

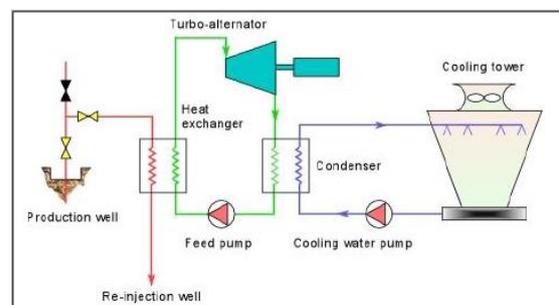
Pemanfaatan Tidak Langsung

Secara ekonomis, fluida panas bumi bertemperatur tinggi (> 225 °C) merupakan fluida panas yang ideal untuk digunakan dalam pembangkit listrik panas bumi dengan sistem pembangkitan konvensional. Namun dengan berkembangnya teknologi, fluida dengan temperatur rendah-sedang dapat pula dimanfaatkan menjadi energi listrik yaitu dengan *binary cycle* (siklus biner). Nilai ekonomis yang semakin baik, pemanfaatan sisa panas, serta terbatasnya sumber energi lain merupakan alasan penggunaan siklus biner ini. Aplikasi siklus biner dapat digunakan baik pada sumur-sumur panas bumi temperatur rendah-sedang, maupun dengan memanfaatkan air brine sisa pembangkit konvensional yang masih mempunyai panas yang tinggi. Pada prinsipnya, proses termodinamika pada siklus biner hampir sama dengan pembangkit listrik konvensional. Fluida kerja menerima panas dari fluida panas bumi melalui *heat exchanger*, lalu dilepaskan untuk memutar turbin yang kemudian akan menghasilkan listrik dari generator (Vaccaro, 2013). Teknologi yang banyak digunakan pada siklus biner saat ini adalah dengan siklus Kalina (*Kalina Cycle*) dan *Organic Rankine Cycle* (ORC). Perbedaan kedua teknologi ini adalah dalam penggunaan fluida kerja yang berbeda dimana Siklus Kalina menggunakan campuran air dan ammonia sedangkan ORC menggunakan fluida organik seperti iso-butana dan iso-pentana.

Siklus Kalina menggunakan fluida kerja berupa campuran ammonia dan air (Kalina dkk., 1995). Ammonia dan air mempunyai berat molekul yang mirip (ammonia 17 kg/mol, air 18 kg/mol), mudah larut dan mudah juga dipisahkan. Keduanya mempunyai titik didih yang berbeda, ammonia mendidih di -33 °C dan air di 100 °C (Yanagisawa dkk., 2012). Titik didih campuran ammonia dan air bervariasi tergantung rasio campurannya. Hal tersebut membuat siklus ini sangat cocok digunakan, bahkan pada sistem temperatur rendah sekalipun, karena memiliki kisaran

temperatur mendidih yang besar (Renz dan Engelhard, 2006).

Pada alur proses siklus Kalina (Gambar 5), fluida kerja berupa campuran ammonia dan air, dipanasi oleh fluida panas bumi melalui mesin penukar kalor atau *heat exchanger*. Fluida sekunder akan menguap dan mengalir ke turbin, setelah dimanfaatkan akan dikondensasikan sebelum dipanaskan kembali oleh fluida panas bumi. Fluida panas bumi tidak dimanfaatkan langsung melainkan hanya panasnya saja yang diekstraksi, sementara fluidanya sendiri diinjeksikan kembali ke dalam reservoir (Gazo dan Lind, 2010).



Gambar 5. Skema diagram dari siklus Kalina (Kopunicova, 2009)

Temperatur dan laju alir fluida merupakan komponen penting dalam siklus Kalina. Minimum temperatur fluida yang dapat digunakan pada siklus Kalina diperkirakan sebesar 53°C. Namun untuk mendapatkan konversi panas yang efektif, minimum temperatur fluida adalah sebesar 80°C (Yanagisawa dkk., 2012). Berdasarkan hasil studi kelayakan untuk pembangkit listrik dengan siklus biner yang disusun oleh Kopunicova (2009), temperatur optimum *inlet* sebesar 126,4°C dengan laju alir 171 kg/s.

Rasio campuran air dan ammonia juga sangat penting untuk efisiensi termodinamika dan lingkungan (Mirolli dkk., 2002). Kalina dkk (1995) mengatakan rasio komposisi air dan ammonia untuk siklus Kalina sebesar 80 hingga 90 % berat ammonia. Pada aplikasinya, rasio campuran air dan ammonia bervariasi tergantung temperatur *inlet* yang

digunakan, yaitu 82 % berat ammonia pada temperatur *inlet* 121°C (Mirolli dkk., 2002) dan 83,15 % berat ammonia pada temperatur *inlet* 180°C (Kalina dkk., 1995).

Pembangkit listrik panas bumi (PLTP) pertama yang menggunakan siklus Kalina adalah Husavik yang berada di bagian utara Islandia. PLTP ini mampu membangkitkan listrik sebesar 1.700 kW sejak tahun 2000. PLTP dengan siklus Kalina kedua yang berproduksi adalah Unterhaching, Munchen dengan kapasitas 3.300 kW yang beroperasi sejak tahun 2007 dengan temperatur fluida 120°C dari batuan sedimen molase pada kedalaman 3,4 km (Yanagisawa dkk., 2012).

Organic Rankine Cycle (ORC) menggunakan fluida organik sebagai fluida kerjanya seperti iso-butana, iso-pentana, n-pentana, Toluena, R134a, R123, R125, atau R600 (Darvis dkk, 2015). Titik didid senyawa organik pada fluida kerja bervariasi, dari -146.9°C (nitrogen) hingga 197.96°C (R-11), sehingga fluida panas yang dapat digunakan pada ORC pun bervariasi dari 80 hingga 300°C (Hromadka dan Martinek, 2017). Beberapa keunggulan ORC ini antara lain kemampuan untuk mengekstrak energi pada temperatur rendah, efisiensi siklus dan isentropik turbin yang tinggi, desain turbin yang sederhana, mudah dalam pengoperasian, dan daya tahan yang tinggi. Namun diantara banyak kelebihan tersebut, ada kekurangan pada ORC yaitu beberapa senyawa organik mempunyai sifat beracun dan mudah terbakar (Hromadka dan Martinek, 2017).

Pemilihan fluida kerja merupakan faktor penting untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi di ORC. Berdasarkan analisis Darvish dkk (2015), ORC dengan menggunakan fluida kerja iso-butana dan R134a mempunyai efisensi energi tertinggi dengan fluida panas sebesar 120°C. Sedangkan Karimi dkk (2015) menyebutkan pada temperatur 80-100°C, ORC dengan fluida kerja R125 mempunyai nilai keekonomian yang tinggi dan efek lingkungan yang kecil.

Beberapa pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) telah menggunakan siklus biner, baik menggunakan Siklus Kalina maupun ORC. Tabel 2 menunjukkan beberapa PLTP yang sudah beroperasi menggunakan siklus biner.

Pemanfaatan Langsung

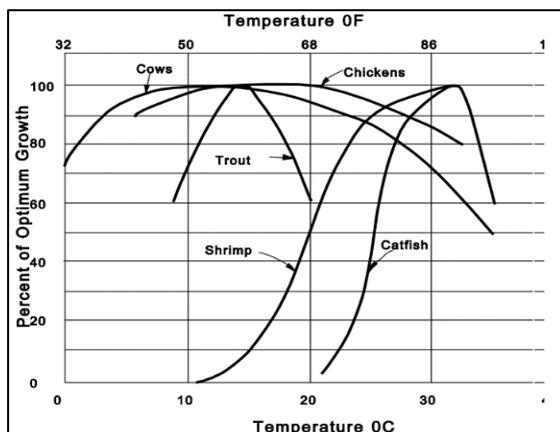
Akuakultur

Air panas bumi dapat digunakan untuk pemanfaatan budidaya perikanan pada kisaran temperatur 20 s.d. 40°C. Prinsip dari penggunaan air panas bumi adalah mengontrol konsistensi temperatur air kolam untuk perkembang-biakan komoditas perikanan, agar dapat meningkatkan ketahanan hidup dan mempercepat perkembang-biakan. Hal tersebut sulit tercapai apabila dengan temperatur air/kolam yang tidak konsisten. Air panas tersebut digunakan untuk memanaskan air kolam melalui *heat exchanger* untuk mencapai temperatur yang diinginkan, ataupun dapat langsung dicampur dengan air kolam.

Tabel 2. PLTP dengan siklus biner yang sudah beroperasi di dunia (Vaccaro, 2013)

No	PLTP	Lokasi	T (°C)	Siklus Biner	Fluida Kerja	Kapasitas Terpasang (kW)
1	Birdsville	Australia	98	ORC	Iso-pentana	150
2	Bruchsal	Jerman	120	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	610
3	Empire	USA	118	ORC	Iso-pentana	1.200
4	Fang	Thailand	116	ORC	Iso-pentana	300
5	Husavik	Islandia	124	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	2.030
6	Nagqu	China	110	ORC	Iso-pentana	1300
7	Unterhaching	Jerman	122	Kalina	NH ₃ – H ₂ O	4.000
8	Wabuska	USA	104	ORC	Iso-pentana	750
9	Wendel	USA	103	ORC	R114	2.000
10	Wineagle	USA	110	ORC	Iso-butana	750

Beberapa jenis ikan seperti nila, salmon atau ikan lele dapat tumbuh baik dengan mengontrol temperatur air kolam. Beberapa ikan tropis, lobster, ataupun udang juga dapat tumbuh baik. Temperatur optimum untuk masing-masing komoditas, ditunjukkan dalam Gambar 6. Sebagai contoh ikan lele dan udang, dapat tumbuh 50% lebih baik pada temperatur antara 20 s.d. 26°C, dan tumbuh optimum pada temperatur 32°C, tetapi pada temperatur lebih tinggi, pertumbuhannya akan menurun.



Gambar 6. Temperatur pertumbuhan untuk berbagai komoditas perikanan

Budidaya udang tropis yang dikemas dalam bentuk pariwisata sudah lama dikembangkan di New Zealand (Gambar 7). Budidaya ini menggunakan sisa fluida panas dari PLTP Wairakei. Sisa fluida tersebut tidak langsung dialirkan ke kolam karena mengandung silika yang tinggi, namun menggunakan penukar panas yang akan memanaskan air dari sungai Waikato menjadi temperatur 26 °C. Budidaya ikan lele menggunakan air panas juga sudah dilakukan di Lampung. Menurut laporan peternak di Lampung, ikan lele tumbuh sangat bagus dengan metode pencampuran air panas dengan air kolam dibandingkan dengan metode pemanasan air kolam melalui *heat exchanger* (Lund dan Boyd, 2015).

Selain perikanan, budidaya ganggang seperti spirulina dapat diaplikasikan pada temperatur 35 s.d. 37°C (IRENA, 2019).

Spirulina dan ganggang jenis lainnya dijual sebagai suplemen nutrisi kesehatan dan untuk penyembuhan medis. Spirulina tergolong ke dalam ganggang hijau-biru yang tumbuh bagus di bawah sinar matahari yang kuat dan kondisi alkali. Di Yunani, budidaya spirulina sudah dilakukan sejak tahun 1990an. Air panas temperatur 51°C dialirkan sebanyak 10 kg/detik yang digunakan untuk memanaskan air kolam ke temperatur 33 s.d. 36°C. Kandungan CO₂ dalam air panas juga digunakan untuk meningkatkan produksi dan mengurangi biaya operasional (FAO, 2015).



Gambar 7. Pemanfaatan budidaya udang dan pariwisata di New Zealand (<https://hukaprawnpark.co.nz>)

Pengeringan

Aplikasi pemanfaatan langsung panas bumi di bidang pengeringan dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan kualitas hasil panen. Banyak industri makanan dan pertanian menggunakan proses pengeringan untuk mempertahankan kualitas produk. Di Negara-negara maju, proses pengeringan menghabiskan 7 s.d. 15 % dari total kebutuhan listrik, namun efisiensi termalnya relatif rendah sekitar 25 s.d. 50 %. Bahkan di beberapa negara maju, konsumsi energinya sepertiga dari total kebutuhan listrik (Chou dan Chua dalam FAO, 2015).

Di Indonesia, aplikasi pengeringan sudah dilakukan secara intensif oleh BPPT. Sebagai contoh di Lampung untuk pengeringan coklat dan kopra, di Kamojang untuk budidaya jamur, di Lahendong untuk proses pengolahan gula aren, dan di

Wayang Windu untuk pengeringan teh (Taufan dalam Abdullah dan Gunadnya, 2010). Pengolahan gula aren di Lahendong menggunakan 4 ton/jam air brine dari PLTP Lahendong. Temperatur yang dibutuhkan untuk proses pengeringan umumnya 60 s.d. 100°C. Untuk pengeringan sayuran, buah, dan ikan umumnya membutuhkan temperatur 70 s.d. 95°C (IRENA, 2019). Tabel 3 memperlihatkan kebutuhan temperatur dan waktu pengeringan untuk beberapa komoditas di Indonesia.

Tabel 3. Temperatur dan waktu pengeringan untuk beberapa komoditas di Indonesia (Abdullah dan Gunadnya, 2010)

No	Komoditas	Temperatur Pengeringan (°C)	Waktu Pengeringan (jam)
1	Coklat		
	- Uji lab 1	50	40
	- Uji lab 2	49,2	32
	- Uji lapangan	45,8	43
2	Kopi Robusta	37	60
3	Vanilla	51	52
4	Benih		
	- Cabai	40	4
	- Timun	40	9,5
5	Buah-buahan		
	- Pepaya	39	33
	- Pisang	40,6	11
6	Bayur	39,3	158
7	Kemiri	48,5	96

Pariwisata dan Balneoterapi

Di Indonesia, pemanfaatan langsung panas bumi umumnya berupa pariwisata untuk pemandian air panas (Gambar 8). Sumber air panas bumi tidak hanya dapat digunakan sebagai tempat wisata, tetapi dapat pula dimanfaatkan lebih lanjut untuk sarana pengobatan. Terapi pengobatan dengan media air panas ini dikenal sebagai Balneoterapi. Istilah balneoterapi berasal dari kata Yunani *balneum* yang berarti mandi. Balneoterapi sendiri berarti mandi/berendam dengan air panas yang mengandung mineral-mineral alami. Komposisi dan karakteristik fisik masing-masing air panas umumnya berbeda, seperti air panas dengan kandungan garam tinggi, air panas kaya sulfur, kaya bikarbonat, kaya CO₂, kaya radon, kaya selenium, dan lain-lainnya. Umumnya

terapi pengobatan ini dikombinasikan dengan terapi fisik, hidroterapi, dan lumpur (Nasermoaddeli dan Kagamimori, 2015). Kolam-kolam terapi air panas telah dimanfaatkan sejak lama di Indonesia, namun informasi jenis penyakit dan metode pengobatannya belum banyak diketahui.



Gambar 8. Pemanfaatan langsung panas bumi untuk pemandian air panas di Kabupaten Kutai Kartanegara (sumber: Dinas ESDM Kabupaten Kutai Kartanegara)

Hasil kajian para pakar sudah banyak di publikasikan. Siswoidjojo (2012) mengatakan bahwa berendam di dalam air panas alami dapat memulihkan kesehatan dari berbagai gangguan pada saluran pencernaan, saluran urin, *vascular, cordial ailment* dan beberapa jenis gangguan organ kandungan akibat dari terserapnya unsur kimia mineral oleh tubuh melalui kulit. Berendam di air panas alami memberikan efek positif bagi penderita sakit kencing manis, diantaranya penurunan kadar gula dalam darah dan *metabolical endocrine function*. Mata air panas alami yang mengandung CO₂ yang bersumber di daerah vulkanik dapat digunakan untuk penyembuhan kelainan fungsi jantung (*cardiovascular disorders*), khususnya *arterial hypertension*. Perawatan dilakukan selama 4 minggu, dengan tiap kalinya berendam selama 15 sampai 20 menit dan dilakukan 3 kali setiap minggunya.

Secara rinci, Nasermoaddeli dan Kagamimori (2015) telah merangkum publikasi ilmiah tentang balneoterapi dari tahun 1966 s.d. 2003. Studi klinis tersebut

menyebutkan manfaat balneoterapi pada kelainan dermatologis, muskuloskeletal kronis (inflamasi dan non-inflamasi), kelainan metabolik, dan psikologis. Balneoterapi menghasilkan efek positif pada penyakit psoriasis, eksim, dan *cutaneous microcirculation* (kelainan dermatologis); *rheumatoid arthritis*, spondylitis ankilosa, dan fibrositis (penyakit *chronic inflammatory musculoskeletal*); *Osteoarthritis* dan nyeri tulang belakang (penyakit *chronic non-inflammatory musculoskeletal*); kekentalan darah, agregasi trombosit, plasma lipid, stress hormones, dan plasma *homocysteine* (kelainan metabolisme); depresi dan ketegangan psikologis (kondisi psikologis).

Galvez dkk (2018) menyampaikan ringkasan studi yang paling relevan, berdasarkan orisinalitas penelitian, desain eksperimental dan metodologi pengobatan. Balneoterapi merupakan metode tambahan untuk pengobatan yang cukup efektif pada beberapa jenis peradangan, tulang, dan kelainan metabolisme. Subyek penelitian yang digunakan antara lain pada tikus, monyet, dan manusia. Pada manusia, umumnya penyakit yang diteliti adalah diabetes dan osteoarthritis dengan efek positif yang didapatkan pada subyek penelitian setelah melakukan terapi air panas. Beberapa metode pengobatan dan efek klinis yang dihasilkan antara lain (Galvez dkk, 2018) :

- *Diabetes*, metode hidroterapi (38 s.d. 42°C) selama 60 kali setiap hari @ 30 menit (pada tikus), 10 kali setiap hari @ 30 menit (pada monyet), dan 18 kali setiap hari @ 30 menit (pada manusia) memberikan efek klinis berupa pencegahan komplikasi diabetes, peningkatan tekanan darah dan metabolisme glukosa. Selain itu didapatkan penurunan level glukosa plasma puasa dan *glycated hemoglobin*.
- *Osteoarthritis*, metode balneoterapi menggunakan air kaya Bikarbonat dan Kalsium (38 s.d. 42°C, 10 kali setiap hari @ 60 menit atau 39 s.d. 40°C, 21 kali setiap hari @ 15 menit) dan metode balneoterapi menggunakan air kaya Sulfur (37°C) dan Lumpur 46-48°C (12 kali setiap hari @ 20 menit) yang disertai meminum air sulfur 400 ml/hari, memberikan efek klinis pengurangan rasa sakit; peningkatan kelenturan lutut, kekakuan dan fungsi fisik; dan kualitas hidup yang lebih baik.

ANALISIS DAN HASIL

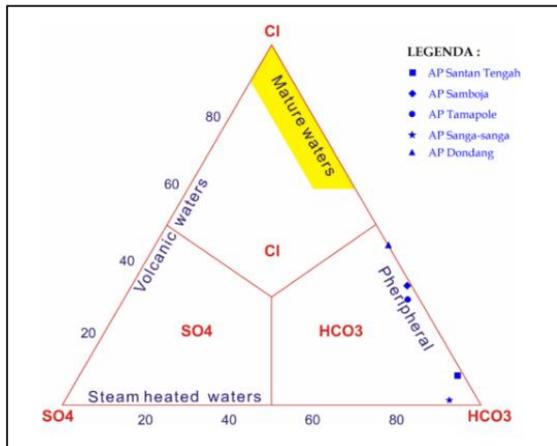
Analisis kimia dilakukan terhadap 5 sampel air panas untuk mengetahui karakteristik fluida panas bumi seperti tipe fluida, asal fluida, maupun perkiraan temperatur reservoir. Hasil analisis kimia air panas ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis Kimia Air Panas di Cekungan Kutai (Wita dkk, 2019)

Parameter	AP Santan Tengah	AP Samboja	AP Tamapole	AP Sanga-sanga	AP Dondang
Temp (°C)	44,3	45,3	36,8	49,5	55,7
pH	6,20	6,38	7,14	7,59	8,42
DHL (µS/cm)	1036	1656	541	212	3520
SiO ₂	95,88	27,85	29,43	23,37	33,45
B	1,13	8,08	1,41	1,62	3,81
Al ³⁺	0,04	0,04	0,05	0,03	0,03
Fe ³⁺	0,16	1,44	0,27	0,45	0,10
Ca ²⁺	13,21	11,86	2,41	4,10	34,1
Mg ²⁺	7,57	5,74	1,20	2,89	24,61
Na ⁺	236,65	366,26	129,62	31,88	635,4
K ⁺	7,18	15,17	7,72	20,34	34,18
Li ⁺ (mg/L)	0,14	0,21	0,01	0,03	0,10
As ³⁺	0,00	0,10	0,10	0,00	0,17
NH ₄ ⁺	1,51	4,06	1,13	1,51	15,28
F ⁻	0,27	0,19	0,31	0,46	0,26
Cl ⁻	51,44	274,34	100,00	2,00	667,2
SO ₄ ²⁻	10,00	10,00	10,00	10,00	0,01
HCO ₃	569,82	547,35	232,52	132,23	838,61
CO ₃ ⁼	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Karakteristik Fluida Panas Bumi

Hasil plotting pada diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ memperlihatkan bahwa air panas di Cekungan Kutai termasuk dalam tipe bikarbonat (Gambar 9). Hal ini sesuai dengan litologi daerah penyelidikan yang didominasi oleh batuan sedimen. Hasil analisis kimia juga menunjukkan komposisi bikarbonat yang tinggi jika dibandingkan dengan komposisi kimia lainnya (132 s.d 838 mg/L).

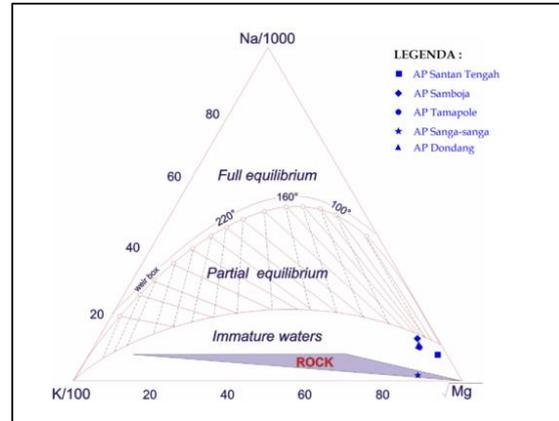


Gambar 9. Diagram segitiga Cl - SO₄ - HCO₃

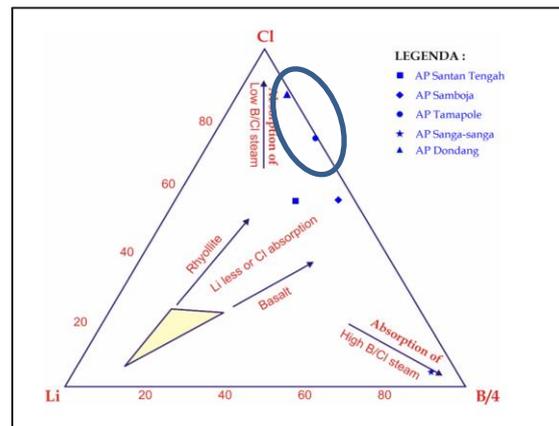
Berdasarkan diagram segitiga Na/1000-K/100-√Mg, menunjukkan air panas di Cekungan Kutai merupakan *Immature Water* atau tidak dalam kesetimbangan (Gambar 10). Hal ini menunjukkan pengaruh dari pelarutan batuan lebih dominan dibandingkan kesetimbangan air dengan batuan (Gigenbach, 1988), interaksi air dengan batuan di dekat permukaan (Nicholson, 1993), kemungkinan kesetimbangan pada temperatur yang lebih rendah (Powell dan Cumming, 2010), ataupun pencampuran dengan air permukaan (Rahayudin, 2018) sehingga tidak dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer Na/K (Gigenbach, 1988).

Berdasarkan diagram segitiga Cl-Li-B, air panas di Cekungan Kutai berada di antara zona Cl dan B, yang menunjukkan lingkungan pembentukan sistem panas bumi di daerah Cekungan Kutai dipengaruhi oleh lingkungan sedimen

dengan umur sistem panas bumi relatif sudah tua (Gambar 11). Dari diagram tersebut juga dapat disimpulkan bahwa air panas Tamapole dan Dondang yang berjarak berdekatan diperkirakan mempunyai reservoir yang sama.



Gambar 10. Diagram segitiga Na/1000-K/100-√Mg



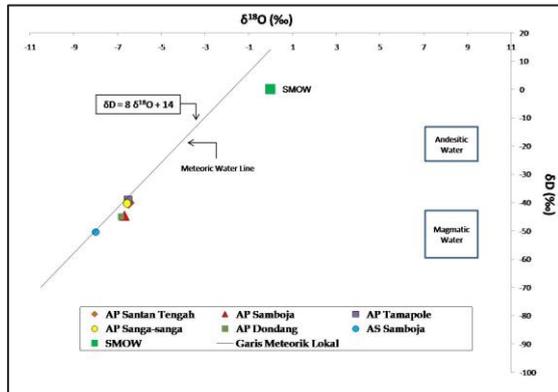
Gambar 11. Diagram segitiga Cl-Li-B/4

Isotop ¹⁸O dan ²H

Isotop ¹⁸O dan ²H (D) didapat dari empat sampel air panas serta satu sampel air dingin. Nilai δ¹⁸O berkisar -6,49 sampai -7,99 ‰, sedangkan nilai δD berkisar -38,99 sampai -50,4 ‰. Nilai rasio dari sampel air di plot pada grafik δD terhadap δ¹⁸O, dengan garis air meteorik δD = 8δ¹⁸O +14.

Posisi air panas pada umumnya berada pada garis air meteorik (*Meteoric Water Line*) yang mengindikasikan bahwa sumber fluida panas bumi berasal dari air meteorik (Gambar 13). Tidak terjadi pengkayaan ¹⁸O

yang signifikan dikarenakan temperatur fluida yang tidak terlalu tinggi sehingga interaksi fluida dengan batuan tidak terjadi dengan intensif.



Gambar 13. Grafik isotop δD dan $\delta^{18}O$

Pendugaan Temperatur Bawah Permukaan

Geotermometri unsur terlarut umumnya digunakan untuk mengestimasi temperatur bawah permukaan dari suatu sistem panas bumi. Hasil perhitungan geotermometer SiO_2 memberikan nilai temperatur bawah permukaan sebesar 70 s.d. 130°C, geotermometer Na/K sebesar 150 s.d. 190°C, dan geotermometer Na/K/Ca sebesar 140 s.d. 170°C (tabel 5).

Penggunaan geotermometer silika sangat bergantung pada konsentrasi absolut silika dibandingkan pada rasio konsentrasi,

sehingga akan terpengaruh oleh proses di bawah permukaan seperti pendidihan (*boiling*) dan pengenceran (Nicholson, 1993). Fluida panas di daerah Cekungan Kutai merupakan *immature water* yang mengalami pencampuran oleh air permukaan, yang menyebabkan konsentrasi silika di air panas tidak mencerminkan konsentrasi silika di reservoir. Oleh karena itu, geotermometer silika kurang tepat digunakan untuk perhitungan geotermometer. Begitu juga dengan penggunaan geotermometer Na/K. Geotermometer Na-K-Ca lebih tepat digunakan untuk memperkirakan temperatur reservoir karena dapat digunakan pada air hangat/sedikit panas dan *immature water* (D'Amore dan Arnorsson, 2010). Hal tersebut juga didukung dengan hasil komposisi kimia yang mempunyai nilai $Ca^{1/2}/Na > 1$ (Nicholson, 1993).

Pada sistem panas bumi Santan Tengah diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 140°C, sistem panas bumi Samboja diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 150°C, sistem panas bumi Sanga-sanga diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan 70°C, dan sistem panas bumi Tamapole-Dondang diperkirakan mempunyai temperatur bawah permukaan sebesar 170°C.

Tabel 5. Hasil perhitungan temperatur bawah permukaan

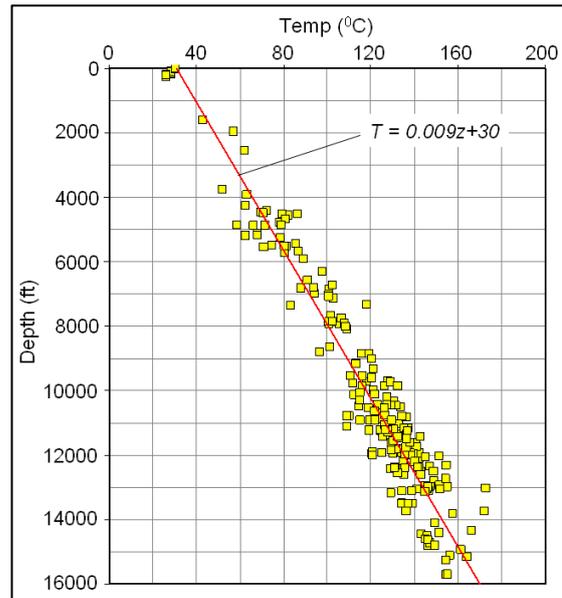
PARAMETER		AP Santan Tengah	AP Samboja	AP Tamapole	AP Sanga sanga	AP Dondang
T. Air Panas	°C	44,3	45,3	36,8	49,5	55,7
pH		6,20	6,38	7,14	7,59	8,42
T SiO_2 (cc)		135	77	79	70	84
T SiO_2 (ac)		131	81	83	74	87
T NaK (G)	°C	152	171	194	442	187
T NaK (F)		133	152	176	452	169
T Na-K-Ca		136	153	167	285	167

DISKUSI

Manifestasi panas bumi di Cekungan Kutai berupa mata air panas, pH netral, dan bertipe bikarbonat sebagai indikasi lingkungan geologinya didominasi oleh batuan sedimen yang kaya karbonatan. Hal ini sesuai dengan litologi di Cekungan Kutai yang didominasi oleh batuan sedimen dengan lingkungan pengendapan deltaik hingga marin. Keberadaan air panas di Kabupaten Kutai Kartanegara pada zona *immature water* memberikan gambaran bahwa kondisi air panas banyak dipengaruhi oleh air permukaan. Komposisi klorida yang cukup tinggi (51 s.d. 667 mg/L) dan hasil plotting diagram Cl-Li-B berada pada zona klorida, mengindikasikan sudah terbentuknya reservoir di kedalaman dengan umur yang relatif tua dan mekanisme pemunculan air panas di permukaan melalui sirkulasi dalam (*deep circulation*). Air permukaan yang turun ke bawah permukaan terpanaskan oleh batuan panas yang diperkirakan timbul akibat adanya pembebanan dalam waktu yang sangat lama (*geopressured*), yang kemudian muncul sebagai air panas di permukaan melalui rekahan berupa struktur sesar yang dalam.

Gupta dan Sukanta (2007) menyatakan bahwa sistem panas bumi *geopressured* terbentuk ketika air panas terperangkap dan terjadi pertukaran atau pencampuran dengan batuan sekitarnya. Sistem panas bumi di cekungan sedimen merupakan hasil interaksi dari berbagai sumber panas dan mekanisme pemindahan (*transfer*) panas dimana panas dari kedalaman dipindahkan ke permukaan. Sistem-sistem panas bumi yang terletak pada cekungan Kutai, diperkirakan berkaitan dengan pembentukan cekungan sedimen yang terisi secara cepat oleh produk sedimentasi, sehingga fluida hidrotermal yang terbentuk mengalami tekanan tinggi. Sistem panas bumi yang berhubungan dengan *geopressured* ataupun yang berada di lingkungan sedimentasi umumnya memiliki depresi yang sangat tebal, bisa mencapai 5 – 8 km (Hadi, 2013).

Ketebalan batuan sedimen yang mengisi cekungan ini berimplikasi terhadap nilai gradien termal yang cukup tinggi pada cekungan ini. Gradien termal pada Cekungan Kutai bagian bawah diperkirakan sebesar 90°C pada kedalaman 2.000 m (Gambar 14), diiringi oleh keberadaan mineral smektit yang mulai hilang (Ramdhan dkk, 2010).



Gambar 14. Kurva gradien termal Cekungan Kutai (Ramdhan, 2010)

Pembentukan sistem panas bumi sangat erat hubungannya dengan siklus hidrologi yang berkesinambungan. Kalimantan memiliki wilayah daratan dengan hutan yang sangat luas. Letak geografisnya sangat menunjang terbentuknya siklus hidrologi di seluruh kawasan dan bahkan dengan curah hujan yang tinggi. Air yang terdapat di permukaan meresap melalui kantong-kantong daerah resapan yang masuk hingga menjangkau akuifer yang paling dalam. Di samping itu, batuan pun mengandung air seperti yang dikenal sebagai *connate water* atau air yang terperangkap di dalam formasi batuan. Umumnya *connate water* ini terdapat pada batuan sedimen. Selain itu, terdapat *juvenile water* atau *magmatic water* sebagai air yang terperangkap pada batuan magmatik, yaitu air yang terbawa sejak bahan-bahan pembentuk batuan itu

masih berupa magma. Cekungan sedimen merupakan wadah atau tempat untuk mengakumulasi fluida tersebut dalam suatu reservoir. Komposisi litologi berjenis lempungan di suatu cekungan sedimen kemungkinan sebagai batuan penutup (*cap rock*) yang menahan keluarnya panas dan fluida di reservoir.

Di Indonesia sistem panas bumi pada cekungan sedimen ataupun *geopressured* tidak lepas dari sejarah tektonik setempat, seperti di Kalimantan yang berhubungan dengan jalur subduksi tua. Sumber panas pada sistem panas bumi ini diantaranya dapat berasal dari sisa panas pada batuan terobosan (intrusi) dan faktor pembebanan pada lapisan sedimen dalam, hingga pemanasan dari aktivitas radiogenik pada *basement* cekungan. Sumber panas dapat juga karena terjadinya pembebanan oleh endapan di atasnya dalam waktu yang relatif singkat pada suatu cekungan, sehingga mengakibatkan terakumulasi panas yang kemudian menjadi sumber panas pada cekungan tersebut (Jones, 1970; Gupta dan Sukanta, 2007).

Secara umum, sistem panas bumi di Cekungan Kutai mempunyai temperatur reservoir rendah ke sedang dengan temperatur bawah permukaan diperkirakan 70 s.d. 170°C. Temperatur tertinggi pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang dengan perkiraan temperatur bawah permukaan sebesar 170°C.

REKOMENDASI PEMANFAATAN PANAS BUMI

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai dapat dimanfaatkan secara tidak langsung menjadi energi listrik maupun secara langsung. Mengingat temperatur reservoirnya tergolong pada temperatur rendah-sedang, maka pemanfaatan menjadi energi listrik masih terbatas pada penggunaan siklus biner (*binary cycle*).

Sedangkan pemanfaatan langsung panas bumi dapat di aplikasikan pada sektor perikanan, agro-industri, ataupun pariwisata.

Pemanfaatan panas bumi baik secara langsung ataupun tidak langsung, tentunya membutuhkan fluida panas yang kontinyu. Kebutuhan fluida panas ini bisa didapatkan dengan cara pemboran ataupun langsung dari manifestasi di permukaan. Pada pemanfaatan tidak langsung menggunakan siklus biner, kebutuhan fluida panas diperoleh dengan cara pemboran dalam hingga ke reservoir untuk mendapatkan temperatur optimum yang dibutuhkan. Pada pemanfaatan langsung untuk pengeringan, kebutuhan fluida panas dapat dipenuhi baik secara langsung dari manifestasi ataupun dengan pemboran. Pengambilan fluida panas langsung dari manifestasi dapat dimungkinkan karena temperatur manifestasi mencukupi dalam hal kebutuhan panas yang dibutuhkan untuk aplikasi pengeringan (tabel 3). Kebutuhan fluida juga dapat dipenuhi dengan cara pemboran sumur dangkal ke dalam reservoir di dekat permukaan. Penentuan titik bor tersebut dapat dilakukan dengan metode geofisika seperti geolistrik untuk mencari letak reservoir dangkal tersebut. Pada pemanfaatan langsung untuk akuakultur, pariwisata, dan balneoterapi kebutuhan fluida panas dapat dipenuhi langsung dari manifestasi.

Pemanfaatan langsung panas bumi erat kaitannya dengan kebutuhan dan hasil komoditas dari daerah setempat. Menurut BPS Kabupaten Kutai Kartanegara (Kukar) tahun 2021, hasil bumi daerah Kukar didominasi oleh kopra, kelapa sawit, kopi, kemiri, dan gula aren sehingga pemanfaatannya dapat diaplikasikan untuk komoditas tersebut. Rekomendasi pemanfaatan panas bumi untuk daerah Cekungan Kutai ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekomendasi Pemanfaatan Panas Bumi di Cekungan Kutai

No	Air Panas	T. Reservoir (°C)	Rekomendasi Pemanfaatan		Keterangan
			Langsung	Tidak Langsung	
1	Tamapole-Dondang	170	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	Siklus biner	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengeringan kopra, kelapa sawit, dan kemiri • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
2	Samboja	150	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	Siklus biner	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengolahan gula aren serta pengeringan kopra, kelapa sawit, dan kopi • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
3	Santan Tengah	140	Pariwisata, Akuakultur, Agroindustri, Balneoterapi	-	<ul style="list-style-type: none"> • Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang • Agroindustri : pengeringan kopra dan kelapa sawit • Balneoterapi : untuk peradangan tulang karena mengandung bikarbonat >500 ppm.
4	Sanga-sanga	70	Pariwisata, Akuakultur	-	Akuakultur : ikan tropis, udang, lobster, dan ganggang

KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai tergolong pada sistem panas bumi temperatur rendah-sedang dengan kisaran temperatur reservoir 70 s.d. 170°C. Pembentukan sistem panas buminya diperkirakan berhubungan dengan proses sedimentasi (*syn-genetic*) dan *geopressured*. Beberapa air panas keluar melalui sumur pemboran minyak dan masih mengalir hingga saat ini. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem panas bumi sudah terbentuk di bawah permukaan dan siklus hidrologinya masih berjalan dengan baik.

Melihat dari karakteristik fluida panas bumi di Cekungan Kutai dan potensi sumber daya alamnya, maka ada beberapa rekomendasi pemanfaatan panas bumi yang dapat diaplikasikan (tabel 6). Pemanfaatan langsung seperti untuk akuakultur, pengeringan, pariwisata, dan balneoterapi dapat diaplikasikan pada

semua sistem panas bumi di Cekungan Kutai. Pada sistem panas bumi Santan Tengah, Samboja, dan Tamapole-Dondang sangat memungkinkan dimanfaatkan untuk balneoterapi terhadap penyakit peradangan tulang karena memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi (>500 ppm). Ada peluang untuk pemanfaatan tidak langsung menjadi energi listrik menggunakan siklus biner, yaitu pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang (170°C) dan Samboja (150°C). Perlu adanya kajian lebih lanjut terhadap komposisi kimia dari masing-masing air panas terkait kemungkinan adanya skaling kalsit pada fasilitas produksi yang dapat mengurangi efisiensi, mengingat tingginya kandungan bikarbonat pada air panas tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis pertama⁽¹⁾ merupakan kontributor utama dari makalah ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat

Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas bumi atas terlaksananya kegiatan kajian sistem panas bumi di Kabupaten Kutai Kartanegara pada tahun 2018. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Kabupaten Kutai Kartanegara atas bantuannya kepada tim kajian selama berada di Lapangan, rekan-rekan di Bidang Panas Bumi, dan tim editor atas koreksi, saran, dan masukannya dalam perbaikan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, K., dan Gunadnya, I.B.P., 2010. Use of Geothermal Energy for Drying and Cooling Purposes. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*, Bali.
- Angelino, L., dan Barrera, F., 2019. Accelerating geothermal heat adoption in the agri-food sector. *The International Renewable Energy Agency (IRENA) Report*, Abu Dhabi.
- Anonim, 2009. Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan Data Gaya Berat dan Geologi. *Badan Geologi*, Bandung.
- Anonim, 2020. Peta Sebaran Panas Bumi Indonesia, *Badan Geologi*, Bandung.
- Anonim, 2021. Kabupaten Kutai Kartanegara Dalam Angka, *BPS Kabupaten Kutai Kartanegara*.
- Chandrasekharam, D., dan Bundschuh, J., 2008. *Low Enthalpy Geothermal Resources for Power Generation*. CRC Press, pp. 101-102.
- D'Amore, F., dan Arnorsson, S., 2000. Geothermometry, In *Isotopic and Chemical Techniques in: Geothermal Exploration, Development and Use*, Edited by S. Arnorsson, IAEA, Vienna, 152-199.
- Darvish, K., Ehyaei, M. A., Atabi, F., dan Rosen, M. A., 2015. Selection of Optimum Working Fluid for Organic Rankine Cycles by Exergy and Exergy-Economic Analyses. *Journal Sustainability* No 7.
- Galvez, I., Torres-Piles, S., dan Ortega-Rincon, E., 2018. *Balneotherapy, Immune System, and Stress Response: A Hormetic Strategy*. *International Journal of Molecular Sciences*.
- Gazo, F. dan Lind, L., 2010. *Low Enthalpy Geothermal Energy – Technology Review*, GNS Science Report 2010/20. 58 p.
- Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria: derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2749–2765
- Gupta, H., dan Sukanta, R., 2007. *Geothermal Energy, An Alternative Resource for the 21st Century*, Amsterdam, the Netherlands; Boston : Elsevier.
- Hadi, M.N., 2013. *Panas Bumi Non-Vulkanik di Indonesia*. *GEOMAGZ*, Vol 3 No 3, Bandung.
- Hadi, M.N., dan Wibowo, A.E.A., 2014. *Panas Bumi Nirgunungapi di Kalimantan*. *GEOMAGZ*, Vol 4 No 1, Bandung.
- Hidayat S., dan Umar I., 1994. *Peta Geologi Lembar Balikpapan, Kalimantan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, Bandung
- Hromádka, A., dan Martinek, Z., 2017. Overview Of The Organic Rankine Cycles And Their Current Utilization: Verification Of Several Current ORC's Utilization By The Software Dymola. *Conference Paper*, DOI: 10.1109/EPE.2017.7967272.
- Jones, P.H., 1970. Geothermal resources of the Northern Gulf of Mexico basin. In: *Proceedings of the U.N. Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources*. *Geothermics, Special Issue*, 2 (1), 14–26.
- Kalina, A., Leibowitz, H., Lazzori, L., dan Diotti. F., 1995. Recent development in the application of Kalina cycle for geothermal plants. *Geothermal Resources Council*.

- Karimi, M. N., Dutta, A., Kaushik, A., Bansal, H., dan Haque, S.Z., 2015. A Review of Organic Rankine, Kalina and Goswami Cycle. *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, Vol 3.
- Kopunicova, M., 2009. Feasibility Study of Binary Geothermal Power Plant in Eastern Slovakia; Analysis of ORC and Kalina Power Plant. *The School for Renewable Energy Science, Iceland*, pp. 26-28.
- Lund, J.W., dan Boyd, T.L., 2015. Direct Utilization of Geothermal Energy 2015 Worldwide Review. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia*.
- Mirolli, M., Hjartarson, H., Mlcak, H.A., dan Ralph, M., 2002. Testing and Operating Experience of the 2 MW Kalina Cycle Geothermal Power Plantin Húsavík, Iceland. *OMMI Vol. 1, Issue 2*.
- Marini, L., 2001. *Geochemical Techniques for the Exploration and Exploitation of Geothermal Energy*. Dipartimento per lo Studio del Territorio e delle sue Risorse, Università degli Studi di Genova, Italy.
- Nasermoaddeli, A., dan Kagamimori, S., 2005. Balneotherapy in Medicine: A Review. *Environmental Health and Preventive Medicine* vol 10, page 171–179, July 2005.
- Nicholson, K., 1993. *Geothermal Fluids; Chemistry and Exploration Techniques*. Springer-Verlag, Berlin.
- Popovski, K., 2009. Agricultural and Industrial Uses of Geothermal Energy in Europe. *Proceedings of the International Conference on National Development Of Geothermal Energy Use, Slovakia*.
- Powell, T., dan Cumming, W., 2010. Spreadsheets for geothermal water and gas geochemistry. In: *Proceedings 35th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University. Stanford, California, USA.
- Rahayudin, Y., Kashiwaya, K., Susmanto, A., Tada, Y., Iskandar, I., and Koike, K., (2018). Estimation of Fluid-rock Interaction Process and Recharge Area of the Tampomas Geothermal Field, West Java, Indonesia by Water Chemistry, *Proceedings 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*.
- Ramdhan, A.M., 2010. *Overpressure And Compaction In The Lower Kutai Basin, Indonesia*. Doctoral Thesis, Durham University.
- Renz, M. dan Engelhard, M., 2006. The New Generation of Kalina Cycle. *Conference on Electricity Generation from Enhanced Geothermal System*. M+W Zander, Strasbourg, France.
- Saemundsson, K., Axelsson, G., dan Steingrímsson, B., 2011. *Geothermal System in Global Perspective*. Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants, UNU-GTP, Iceland.
- Satyana, A.H., dan Darman, H., 2000. Kalimantan. dalam *Outline of the geology of Indonesia*, Chapter 5, Indonesian Association of Geologists (IAGI), Jakarta, p. 69-90.
- Siswosidjojo, S.S., 2012. *Balneoterapi di Sumber Air Panas Alami*. GEOMAGZ, Vol 2 No 3, Bandung.
- Vaccaro, M., 2013. *Multidisciplinary Approach For The Sustainable Utilization Of Medium-Low Temperature Geothermal Resources*. PhD Thesis, Università di Pisa, Italia.
- Van Nguyen, M., Arason, S., Gissurarson, M., dan Pálsson, P.G., 2015. *Uses of Geothermal Energy in Food and Agriculture – Opportunities for Developing Countries*. Food and Agriculture Organization of United Nation (FAO), Roma, Italia.
- Wita, L.M., Syafri, I., Yoseph, B., dan Wibowo, A.E.A., 2019. Karakteristik Hidrokimia Untuk Mengetahui Sistem Dan Pemanfaatan Fluida Panas Bumi Daerah Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur. *Padjajaran Geoscience Journal*, Vol 3 No 5, Bandung.

Yanagisawa, N., Muraoka, H., Sasaki, M., Sugita, H., Ioka, S., Sato, M., dan Osato, K., 2012. Starting Field Test of Kalina System Using Hot Spring Fluid in Japan. *Proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

Zajuli, M.H.H., Irawan, D., Permana, A.K., Kusworo, A., Wahyudiono, J., Hamzah, A., Saragih, R., Hermanto, B., Firdaus, M., dan Arifin, A.S., 2015. Karakteristik Serpih Gas (Shale Gas) dan Potensinya di Cekungan Kutai dan Cekungan Akimeugah. Kolokium Pusat Survei Geologi, Bandung.

Diterima	: 2 November 2020
Direvisi	: 2 Desember 2020
Disetujui	: 31 Agustus 2021

UCAPAN TERIMA KASIH

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

Kami juga mengucapkan terimakasih kepada semua unsur Dewan Redaksi atas perhatian dan kerjasamanya dalam proses penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.16 Nomor.2 Tahun 2021. Semoga kehadiran Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat dan pihak-pihak yang berkepentingan dalam bentuk cetakan maupun digital secara *on line* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 16 Nomor 2 Tahun 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Abizar Adi
Universitas Padjadjaran
Email: abizar861@gmail.com

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

Andri Eko Ari Wibowo
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: andri.wibowo@esdm.go.id

Asri Arifin
Universitas Padjadjaran
Email: asri15008@mail.unpad.ac.id

Boy Yoseph CSSSA
Universitas Padjadjaran
Email: boy.yoseph@unpad.ac.id

Dewi Gentana
Universitas Padjadjaran
Email: dewigentana06@gmail.com

Dikdik Risdianto
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: dikdik.risdianto@esdm.go.id

Dirga Ilham Fahlevi
Universitas Lampung
Email: dirgailham@gmail.com

Eska P. Dwitama
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: eska.dwitama@esdm.go.id

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

Fachri Aldi Pramudya
Universitas Lampung
Email: fachrialdi07@gmail.com

I Gede Boy Darmawan
Universitas Lampung
Email: igedeboy@staff.unila.ac.id

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

Mega Fatimah Rosana
Universitas Padjadjaran
Email: mega.fatimah.rosana@unpad.ac.id

Muhammad Farhan Yassar
Universitas Lampung
Email: farhanyassar23@gmail.com

M. Rizki Ramdhani
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: rizki.ramdhani@esdm.go.id

Mochamad Nur Hadi
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: mochamad.nur@esdm.go.id

R. Maria Ulfa
Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan
Panas Bumi
Email: maria.ulfa@esdm.go.id

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 16 Nomor 2 Tahun 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

- ASTER GDEM 99, 100, 102, 107, 108
Basinal water-sea water 71, 72
Brecciated 71-77, 80
Cekungan Kutai Timur 133
Cekungan Sumatra Selatan 83
Fault Fracture Density 99-103, 105, 107, 109, 111-120, 123, 128
Formasi Muaraenim 83, 85
Inklusi fluida 71-76
Kalimantan 133-136, 146, 147, 149, 150
Karakteristik batubara 83, 84, 90
Kelurusan 99, 102, 104-112, 114, 116, 117, 119, 120, 123-127
Leaching 71, 72, 76, 80
Manifestasi Panas Bumi 99, 100, 102-106, 120, 123, 128, 129, 135-137, 146
Panas Bumi 83, 84, 86, 89-106, 114, 116-120, 122-124, 126, 128-130, 133-151
Pemanfaatan langsung 133, 138, 140-142, 147, 148
Permeabilitas 90, 99, 100, 102, 105, 112, 113, 116-120, 135
Rajabasa 119-130
Ramba Joring 71-74, 76, 78, 80
Reservoar 100, 102, 104, 116, 117, 119-121, 123, 125, 127-129, 131, 133-135, 139, 143, 144, 146-148, 151
Temperatur rendah-sedang 133-135, 137, 139, 141, 143, 145, 147-149, 151
Underground coal gasification (UCG) 83, 84
Vuggy silica 71-77, 80

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Agustus 2021

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSSA (Universitas Padjadjaran)

KARAKTERISTIK FLUIDA PEMBAWA MINERALISASI PIT RAMBA JORING DEPOSIT MARTABE, SUMATRA UTARA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2021 Vol. 16 No. 2 Hal. 71 - 81

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui evolusi hidrotermal dari fluida pembawa mineralisasi yang terdapat di Pit Ramba Joring, meliputi temperatur, tekanan, densitas dan kedalaman pembentukan mineralisasi. Penelitian ini menggunakan analisis inklusi fluida. Sampel yang dianalisis merupakan sampel yang terindikasi terbentuk bersamaan dengan mineralisasi bijih (syngenetik), pada dua tekstur utama bijih yaitu batuan dengan tekstur silica vuggy yang terbentuk pada kisaran T_h 331°C hingga 394°C, T_m -15,19°C hingga -12,94°C dengan salinitas 14,42 wt% hingga 14,89 wt%. NaCl equivalent dan batuan dengan tekstur brecciated terbentuk pada kisaran T_h 287,8°C hingga 398,2°C, T_m -14,89°C hingga -11,76°C serta salinitas 13,91 wt% hingga 4,87 wt%. NaCl equivalent. Korelasi positif antara temperatur homogenisasi pembentukan mineralisasi dengan salinitas larutan menandakan bahwa proses leaching yang membentuk rongga pada batuan terjadi pada stage awal proses alterasi hidrotermal yang diawali dengan proses leaching membentuk rongga (vuggy silica) yang diikuti proses silisifikasi dengan tekstur brecciated, pada fase ini berlangsung pengendapan mineralisasi. Asal larutan yang menjadi larutan pembentuk endapan hidrotermal merupakan jenis larutan basinal water-seawater dalam bentuk connate water yang masih dipengaruhi oleh air permukaan/meteoric water yang menunjukkan adanya indikasi hubungan dengan magmatic water. Densitas fluida pembentuk bijih logam berkisar pada 0,8 gr/cm³ sampai dengan 0,9 gr/cm³ sedangkan proses pembentukan bijih pada Pit Ramba Joring termasuk dalam isothermal mixing dengan sedikit pengaruh pemanasan/boiling.

Kata kunci: Ramba Joring, inklusi fluida, leaching, vuggy silica, brecciated, basinal water-sea water

Eska P. Dwitama, M. Rizki Ramdhani dan R. Maria Ulfa (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

EVALUASI PENDAHULUAN POTENSI UNDERGROUND COAL GASIFICATION DI CEKUNGAN SUMATRA SELATAN: STUDI KASUS BATUBARA FORMASI MUARA ENIM

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2021 Vol. 16 No. 2 Hal. 83 - 97

Salah satu cara memanfaatkan batubara bawah permukaan adalah dengan cara mengonversinya ke dalam bentuk gas yang lebih ramah lingkungan melalui metode underground coal gasification (UCG). Cekungan Sumatra Selatan adalah salah satu cekungan batubara produktif di Indonesia. Kegiatan evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui lokasi potensi batubara yang cocok untuk pengembangan UCG. Evaluasi potensi batubara Indonesia untuk pengembangan UCG di cekungan ini, dilakukan dengan cara mengarakterisasi lapisan batubaranya.

Batubara cekungan Sumatra Selatan di Daerah Bayung Lencir, Muara Kilis, dan Srijaya Makmur dievaluasi karakteristiknya untuk melihat potensi UCG pada batubara tersebut. Parameter karakteristik yang dievaluasi meliputi peringkat, ketebalan, kemiringan dan kedalaman lapisan batubara, rasio kedalaman dan ketebalan lapisan batubara, batuan pengapit berikut ketebalannya, kondisi hidrogeologis (posisi batubara terhadap akuifer), struktur geologi serta sumber daya batubara. Hasil evaluasi menunjukkan, berdasarkan karakteristik batubaranya, daerah Bayung lencir merupakan daerah yang cocok untuk pengembangan UCG.

Kata kunci: karakteristik batubara, underground coal gasification (UCG), Cekungan Sumatra Selatan, Formasi Muaraenim

Abizar Adi, Agus Didit Haryanto, Johannes Hutabarat, dan Dewi Gentana (Universitas Padjadjaran)

ANALISIS PENGINDERAAN JAUH DAN PEMODELAN 3D FAULT FRACTURE DENSITY (FFD) DALAM PENENTUAN ZONA PERMEABILITAS PERMUKAAN DI WILAYAH PANAS BUMI GUNUNG TAMPOMAS, JAWA BARAT

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2021 Vol. 16 No. 2 Hal. 99 - 118

Wilayah Gunung Tampomas yang terletak di Kecamatan Buahdua, Kecamatan Conggeang, dan Kecamatan Tanjungkerta, Kabupaten Sumedang, Jawa Barat dipilih sebagai daerah penelitian karena diperkirakan memiliki potensi panas bumi dengan hadirnya manifestasi panas bumi berupa mata air panas di sekitarnya. Kemunculan manifestasi berhubungan dengan zona permeabilitas yang dikontrol oleh struktur geologi. Kelurusan punggungan dan lembah diamati dan dianalisis menggunakan citra penginderaan jauh ASTER GDEM dan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI), skala 1:25.000. Tujuan penelitian untuk mengetahui hubungan antara permeabilitas dengan kemunculan manifestasi panas bumi di daerah penelitian. Metode penelitian dengan melakukan analisis penginderaan jauh dan Fault Fracture Density (FFD) menggunakan pemodelan 3D micromine software. Hasil analisis penginderaan jauh dengan azimuth penyinaran dari 0°, 45°, 90°, 135° dan altitude 45° memperlihatkan pola utama kelurusan punggungan-lembah yang diinterpretasikan sebagai patahan memiliki arah relatif barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya. Indikasi struktur geologi di lapangan diperlihatkan oleh morfologi bentuk punggungan lembah, di beberapa tempat memiliki tebing curam membentuk gawir besar dan faset segitiga. Hasil analisis FFD di daerah penelitian memiliki tingkat permeabilitas yang bervariasi dengan nilai FFD rendah (0,00–3,00 km⁻¹), sedang (3,00–6,00 km⁻¹) dan tinggi (6,00–9,33 km⁻¹). Manifestasi panas bumi muncul pada zona permeabilitas yang memiliki nilai FFD sedang hingga tinggi yang ditandai oleh warna jingga dan merah. Dari pemodelan 3D micromine software terhadap zona permeabilitas dan plotting mata air panas di permukaan terlihat secara jelas kemunculan mata air panas ke permukaan difasilitasi oleh patahan yang berkembang di daerah penelitian.

Kata kunci: ASTER GDEM, Fault Fracture Density, Manifestasi Panas Bumi, Permeabilitas

I Gede Boy Darmawan, Dirga Ilham Fahlevi, Muhammad Farhan Yassar, dan Fachri Aldi Pramudya (Universitas Lampung)

IDENTIFIKASI ZONA RESERVOAR PANAS BUMI BERDASARKAN ANALISIS FAULT FRACTURE DENSITY CITRA DIGITAL ELEVATION MODEL ALOS PALSAR DI GUNUNG RAJABASA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2021 Vol. 16 No. 2 Hal. 119 – 131

Gunung Rajabasa merupakan salah satu lapangan panas bumi di Sumatra yang belum dapat dieksploitasi hingga saat ini. Keberadaan manifestasi di daerah ini menjadi petunjuk keberadaan zona reservoir panas bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi zona permeabilitas tinggi berdasarkan analisis Fault Fracture Density (FFD) dan menganalisis keterkaitan antara karakteristik struktur jalur fluida panas bumi ke permukaan dengan lokasi zona reservoir panas bumi. Metode FFD dilakukan dengan menggunakan Citra Digital Elevation Model (DEM) ALOS PALSAR untuk memetakan kelurusan/lineament yang berasosiasi dengan zona patahan maupun rekahan khususnya di area manifestasi. Observasi struktur di lapangan dilakukan untuk mengkonfirmasi hasil FFD. Arah dominan dari struktur yang teridentifikasi sebagian selaras dan searah dengan sistem sesar Sumatra yaitu arah Barat Laut – Tenggara dan sebagian menunjukkan respons yang memotong sistem sesar utama. Selanjutnya, hasil analisis FFD menunjukkan keterkaitan yang cukup signifikan antara zona lemah (fracturing) dengan zona reservoir panas bumi yang ditunjukkan oleh pola densitas struktur tinggi pada zona upflow di manifestasi Way Belerang, sedangkan pada zona outflow di manifestasi mata air panas Gunung Botak berada pada densitas struktur yang rendah.

Kata kunci: Kelurusan, Manifestasi, Panas Bumi, Rajabasa, Reservoir

Andri Eko Ari Wibowo, Mochamad Nur Hadi, dan Dikdik Risdianto (Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi)

SISTEM PANAS BUMI TEMPERATUR RENDAH-SEDANG PADA CEKUNGAN KUTAI DAN REKOMENDASI PEMANFAATANNYA

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2021 Vol. 16 No. 2 Hal. 133 - 151

Pengembangan panas bumi di Indonesia masih didominasi pada sistem panas bumi vulkanik yang digunakan sebagai pemanfaatan tidak langsung (listrik), padahal sekitar 70% dari 357 lokasi panas bumi di Indonesia berasosiasi dengan sistem non vulkanik. Keterbatasan informasi bawah permukaan berupa data sumur dan fluida reservoir serta nilai keekonomian yang rendah, menyebabkan kurang berkembangnya pemanfaatan energi panas bumi di sistem non vulkanik. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang karakteristik kimia air panas seperti tipe, asal-usul, dan temperatur fluida di Kalimantan, khususnya Cekungan Kutai Timur, serta memberikan rekomendasi pemanfaatannya.

Terdapat lima manifestasi berupa air panas dengan temperatur mulai dari 42 s.d. 55°C, pH netral, bertipe bikarbonat, dan terletak pada zona immature water. Karakteristik fluida di daerah panas bumi ini berkorelasi dengan litologi daerah penyelidikan yang didominasi oleh batuan sedimen. Hasil plotting nilai isotop O18 dan D menunjukkan sumber fluida panas bumi berasal dari air meteorik. Air permukaan meresap ke bawah permukaan dan akan terpanaskan oleh batuan panas yang diperkirakan timbul akibat adanya pembebanan dalam waktu yang sangat lama (geopressured), yang kemudian membentuk fluida reservoir. Temperatur reservoir diperkirakan sebesar 70 s.d. 170°C, dengan pembentukan sistem panas buminya dipengaruhi oleh lingkungan sedimen dengan umur yang relatif sudah tua (old hydrothermal system).

Sistem panas bumi di Cekungan Kutai memiliki reservoir dengan temperatur sedang-rendah, oleh karena itu pemanfaatannya lebih sesuai digunakan untuk pemanfaatan langsung. Rekomendasi pemanfaatan langsung seperti untuk akuakultur, agro industri, pariwisata, dan balneoterapi dapat diaplikasikan pada semua sistem panas bumi di Cekungan Kutai. Pada sistem panas bumi di daerah Santan Tengah, Samboja, dan Tamapole-Dondang sangat memungkinkan dimanfaatkan untuk balneoterapi terhadap penyakit peradangan tulang karena memiliki kandungan bikarbonat yang tinggi (>500 ppm). Ada peluang untuk pemanfaatan tidak langsung menjadi energi listrik menggunakan siklus biner, pada sistem panas bumi Tamapole-Dondang (170°C) dan Samboja (150°C).

Kata kunci: panas bumi, temperatur rendah-sedang, pemanfaatan langsung, Cekungan Kutai Timur, Kalimantan



Migmatite pada Formasi Kemum, Kabupaten Manokwari, Provinsi Papua Barat
(David Mamengko, 2021)



Negeri di Atas Awan, Kabupaten Manokwari, Provinsi Papua Barat
(David Mamengko, 2021)

GALERI FOTO



Pembuatan Sumur Uji pada Eksplorasi Kuarsit, Kecamatan Kluet Tengah, Kabupaten Aceh Selatan, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2021)



Kuarsit yang salah satu kegunaannya untuk Industri Solar Cell, Kecamatan Kluet Tengah, Kabupaten Aceh Selatan, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2021)



Marmer terkait dengan Industri Kreatif dapat Diolah Menjadi Rencong Batu, Kabupaten Aceh Selatan, Provinsi Aceh (Irwan Muksin, 2020)



Hilirisasi Industri Skala Kecil Dolomit, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatra Utara (Irwan Muksin, 2019)

GALERI FOTO



Penambangan Timah, Desa Lubuk Pabrik, Kecamatan Lubuk Besar, Kabupaten Bangka Tengah, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung (Irwan Muksin, 2015)



Kenampakan Megaskopis Singkapan Batubara MKS-02 yang Ditemukan di Desa Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Sigit Arso Wibisono, 2021)



Kenampakan Percontoh Inti Bor Batubara yang Masih Memiliki Kenampakan Struktur Kayu di Desa Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Feddi Ervianna, 2021)



Pelamparan Singkapan Batubara MKS-01 yang Ditemukan di Desa Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Sigit Arso Wibisono, 2021)

GALERI FOTO



Kenampakan Pita-pita Karbonan dalam Percontoh Inti Bor Batupasir di Desa Jangga, Kabupaten Batang Hari, Provinsi Jambi (Feddi Ervianna, 2021)



Singkanan dan Sampel Handspeciment Satuan Lava Andesit Gegerhalang, Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat (Candra, 2021)



Satuan Lava Ciremai Berupa Andesit, Abu-abu, Segar, Porfiritik, Inequigranular, Subhedral - Anhedral, Fenokris Dominan Plagioklas, Piroksen dalam Massa Dasar Afanitik Warna Abu, Terekahkan, Terdapat Struktur Sheeting Joint, Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat (Candra, 2021)



Singkapan Satuan Lava Ciremai 3, Terdiri dari Basalt, Warna Abu-abu Kehitaman, Tekstur Vesikuler, Porfiritik, Inequigranular, Fenokris Plagioklas Piroksen, Hornblende Berukuran 1 - 7 mm dalam Massa Dasar Afanitik, Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat (Candra, 2021)



Singkatan Satuan Piroklastik Ciremai, Berupa Batulapili, Warna Abu Kemerahan, Agak Lapuk, Sortasi Baik, Struktur Laminasi Sejajar dan Bomb Sag Structure, Fragmen Berukuran Lapili. Terdiri Dari Fragmen Litik Andesit, Tuff, dan Pumice Dalam Matriks Abu Vulkanik, Teraltrasi Terdapat di Dekat Kawah Gunung Ciremai, Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat (Candra, 2021)



Batu Manakarra atau Biasa Dikenal dengan Nama Ngalo Termasuk dalam Golongan Batumulia yang Memiliki Ciri Khas Seperti Anggur, Lembah Ahu, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat (Andi Haeriah, 2020)



Penambangan Batumulia Manakarra, Lembah Ahu, Desa Tanete Pao, Kecamatan Tapalang Barat, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat (Andi Haeriah, 2020)



Taman Batu Ramang-ramang, sebagai Kawasan Karst, Salenrang, Bontoa, Kabupaten Maros, Provinsi Sulawesi Selatan (Andi Haeriah, 2020)

GALERI FOTO



Kenampakan Magnetit Hasil Pemisahan dari Mineral Lainnya dengan Menggunakan Alat Separator Magnetik Manual dengan Daya 300 Gauss dalam Kegiatan Prospeksi Pasir Besi di Kecamatan Lunyuk, Kabupaten Sumbawa, Provinsi Nusa Tenggara Barat (Sulaeman, 2021)



Pengukuran Gaya Berat di Puncak Gunung Ciremai.
Titik Ukur ini Berada di Ketinggian 3078 mdpl, Puncak Tertinggi di Jawa Barat dan Merupakan Titik Ukur Gaya Berat Tertinggi di Indonesia, Wilayah Kerja Panas Bumi Gunung Ciremai, Kabupaten Kuningan, Provinsi Jawa Barat (Ratna Dewi, 2021)

PEDOMAN PENULISAN
Makalah/karya tulis ilmiah
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

ISI DAN KRITERIA UMUM

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

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

FORMAT

UMUM

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

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

PEDOMAN PENULISAN

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

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

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

Buku

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

Bab dalam Buku

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

Prosiding

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

Skripsi/Tesis/Disertasi

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

Informasi dari Internet

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

Wewenang Redaksi

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

Pengiriman Naskah

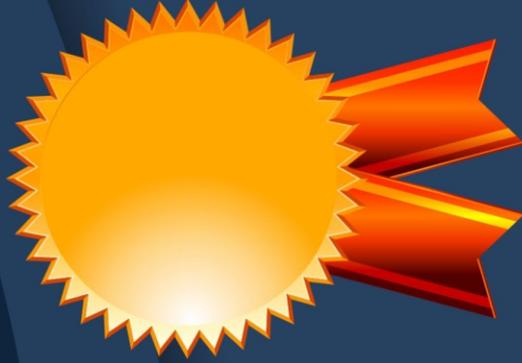
Penulis dimohon untuk mengirimkan 1 eksemplar naskah asli baik *hardcopy* maupun *softcopy* kepada:

Sekretariat Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian Tata Usaha, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung, 40254
Telepon. (022) 520 2698, 522 6270
Fax. (022) 522 6270, 522 6263
Email: 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



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

Peringkat Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode III Tahun 2020
Nama Jurnal Ilmiah

Buletin Sumber Daya Geologi

E-ISSN: 25801023

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

Ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

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

Jakarta, 23 Desember 2020

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



Bambang P. S. Brodjonegoro

Alamat Redaksi

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

