



Karakteristik Morfotektonik Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi di Daerah Gunung Seulawah Agam, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh

Characteristics of Morphotectonic on the Appearances of Geothermal Manifestations in the Mount Seulawah Agam, Aceh Besar Regency, Aceh Province

Zakia Lukman, Nana Sulaksana, Dewi Gentana, dan Murni Sulastri

Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Jalan Raya Bandung-Sumedang Km.21, Jawa Barat, Indonesia

email: zakialukman7@gmail.com

Naskah diterima: 24 Mei 2021, Revisi terakhir: 01 Agustus 2022, Disetujui: 02 Agustus 2022, Online: 02 Agustus 2022

DOI: <http://dx.doi.org/10.33332/jgsm.geologi.v23.2.123-131>

Abstrak - Subduksi antara Lempeng Samudra Indo-Australia dan Lempeng Benua Eurasia membentuk Indonesia berada di wilayah cincin api yang memiliki potensi panas bumi yang besar. Gunung Seulawah Agam dan sekitarnya, Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh, dipilih sebagai daerah studi dikarenakan memiliki manifestasi panas bumi di permukaan, mengindikasikan daerah tersebut memiliki potensi panas bumi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisis pengindraan jauh dan perhitungan variabel morfotektonik dengan menggunakan peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan citra Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS). Tujuan penelitian untuk mengetahui pola utama kelurusan geologi dan tingkat aktivitas tektonik yang menggambarkan karakteristik morfotektonik dan hubungannya terhadap kemunculan manifestasi panas bumi di daerah studi. Karakteristik morfotektonik di daerah ini menunjukkan daerah yang mengalami tingkat pengangkatan rendah hingga tinggi (nilai V_f ; 0,47 – 1,24), terdeformasi dan tidak terdeformasi (nilai R_b ; 2,98 – 6,27), memiliki tingkat aktivitas tektonik sedang hingga aktif (nilai S_{mf} ; 1,07 – 2,07) dan kerapatan kelurusan rendah hingga tinggi (L_d ; 0 – 1,51 km^{-1}). Kemunculan manifestasi panas bumi permukaan terdapat pada tepi dan perpotongan kelurusan-kelurusan struktur geologi (patahan) yang memiliki pola utama berarah baratlaut - tenggara. Daerah tersebut merupakan daerah yang memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi dan tingkat aktivitas tektonik sedang hingga aktif.

Katakunci: Morfotektonik, manifestasi panas bumi permukaan, pola kelurusan geologi

Abstract - The subduction between the Indo-Australian Ocean Plate and the Eurasian Continent Plate forms Indonesia in a ring of fire region that has great geothermal potential. Mount Seulawah Agam and its surroundings, Aceh Besar District, Aceh Province, were chosen as the study area because it has geothermal manifestations on the surface, which is an indication that the area may have geothermal potential. This study uses Rupa Bumi Indonesia (RBI) map and National Digital Elevation Model (DEMNAS) imagery. Remote sensing and calculations of morphotectonic variables methods aim to determine the main pattern of geological lineament and tectonic activity levels that describe the characteristics of the morphotectonic and its relationship to the appearances of geothermal manifestations in the study area. Morphotectonic characteristics in the study area show the area has a level of low to high uplift (V_f values ; 0.47 – 1.24), deformed and not deformed (R_b values ; 2.98 – 6.27), has moderate to active tectonic levels (S_{mf} values ; 1.07 – 2.07), and has low to high lineament density (L_d values ; 0 – 1.51 km^{-1}). The appearances of geothermal surface manifestations are found at the edges and intersections of the lineament of geological structures (faults) with the main pattern of northwest – southeast directions. That area is an area that has moderate to high lineament density and moderate to active tectonic activity levels.

Keywords: Morphotectonic, geothermal surface manifestations, geological lineament patterns.

PENDAHULUAN

Aktivitas pertemuan dua lempeng tektonik yaitu Lempeng Samudra Indo-Australia dan Lempeng Benua Eurasia menyebabkan terbentuknya zona subduksi di Pulau Sumatra bagian barat dan jalur gunung api serta struktur Patahan Sumatra (Hidayati dkk., 2014). Patahan Segmen Aceh dan Segmen Seulimeum merupakan bagian dari sistem Patahan Sumatra yang bersifat aktif dengan pergerakan menganan (dekstral) dan memiliki panjang sekitar 1.900 km (Sugiyanto dkk., 2011). Studi terdahulu mengenai struktur geologi regional menjelaskan dua patahan aktif, yaitu Segmen Aceh dan Segmen Seulimeum ditemukan melintasi beberapa wilayah di Aceh dan salah satunya yaitu Gunung Api Seulawah Agam (Oesanna dkk., 2018). Pada tahun 1975, 2010 dan 2013, Patahan Segmen Seulimeum bersamaan dengan Gunung Api Seulawah Agam memperlihatkan pergerakan aktif yang diindikasikan dengan adanya gempa tremor (Muksin dkk., 2018). Patahan Seulimeum memiliki arah baratlaut – tenggara (NNW – SSE) dan merupakan jenis sesar geser dekstral (*right lateral strike-slip*) yang memperlihatkan kesamaan karakteristik dengan sistem Patahan Sumatra (Muksin dkk., 2018).

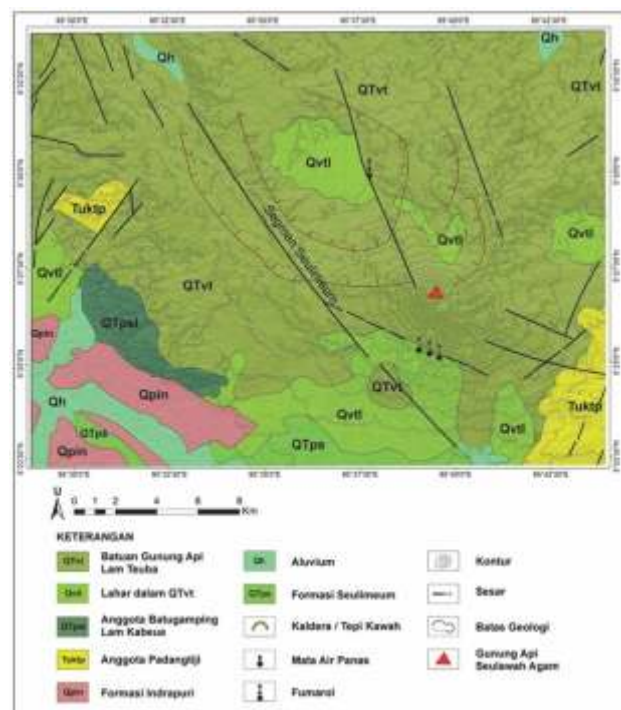
Daerah studi yaitu Gunung Seulawah Agam dan sekitarnya, secara administratif berada di Kabupaten Aceh Besar, Provinsi Aceh, terletak pada koordinat 5° 33' 41,661" – 5° 33' 41,661" LU dan 95° 28' 54,078" – 95° 43' 58,316" BT (Gambar 1).

Secara fisiografi, daerah Aceh Besar dan sekitarnya merupakan dataran aluvium bergelombang hingga dataran rendah pantai dengan elevasi yang semakin tinggi ke arah selatan dan terletak di kaki pegunungan kompleks Bukit Barisan (Moechtar dkk., 2009). Gunung Seulawah Agam merupakan salah satu gunung strato-vulkanik aktif yang ada di Aceh (Syukri dkk., 2018), memiliki dua kawah yaitu kawah aktif Van Heutsz yang terletak di bagian utara pada ketinggian 714 m, dan Kawah Simpago yang terletak pada bagian selatan (Syukri dkk., 2018). Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Banda Aceh (Bennett dkk., 1981), daerah studi memiliki litologi yang bervariasi (Gambar 2), terdiri atas material sedimen dan gunung api berumur Neogen hingga Kuartar, yaitu: (i) Anggota Padangtiji (Tuktp), (ii) Batuan Gunung Api Lam Teuba (QTvt), (iii) Anggota Batugamping Lam Kabeue (QTpsl), (iv) Formasi Indrapuri (Qpin), (v) Formasi Seulimeum (QTPs), (vi) lahar Batuan Gunung Api Lam Teuba (Qvtl), dan (vii) aluvium (Qh) (Gambar 2).

Daerah Gunung Seulawah Agam dan sekitarnya dipilih sebagai daerah studi dikarenakan terdapat manifestasi panas bumi permukaan. Manifestasi panas bumi di daerah ini berupa mata air panas dan uap panas yang dikenal sebagai Ie-Seu'um, Ie-Brôuk, Ie-Jue dan Van-Heutz crater (Idroes dkk., 2019). Struktur geologi yang terbentuk akibat aktivitas tektonik membentuk patahan dan rekahan berpotensi sebagai jalur bagi fluida panas bumi mengalir menuju permukaan (Hermawan dan Rezky, 2011).



Gambar 1. Peta lokasi daerah studi di Provinsi NAD.



sumber: Modifikasi dari Bennett dkk. (1981).

Gambar 2. Peta geologi regional daerah studi.

Daerah studi diperkirakan memiliki potensi panas bumi yang berhubungan dengan pola kelurusan dan perkembangan struktur geologi (patahan) dan kemunculan manifestasi panas bumi permukaan. Tujuan dari kegiatan ini yaitu untuk mengetahui hubungan karakteristik morfotektonik terhadap kemunculan manifestasi panas bumi di daerah Gunung Seulawah Agam melalui analisis kelurusan geologi dan perhitungan variabel morfotektonik menggunakan Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) dan peta Rupa bumi Indonesia (RBI) skala 1:50.000.

METODOLOGI

Studi ini menggunakan data sekunder yang berkaitan dengan data manifestasi panas bumi, dan data primer yang diperoleh melalui: 1) analisis kelurusan geologi (punggungan dan lembah) pada citra DEMNAS, dan 2) perhitungan kuantitatif 4 (empat) variabel morfotektonik, yaitu; (i) rasio lebar dan tinggi lembah (*valley width and height ratio / Vf*), (ii) rasio percabangan sungai (*bifurcation ratio / Rb*), (iii) sinusitas muka gunung (*mountain front sinuosity / Smf*), dan (iv) kerapatan kelurusan (*lineament density /Ld*).

1) Analisis Pola Kelurusan

Kelurusan geologi punggungan dan lembah / sungai dapat diidentifikasi melalui citra satelit atau foto udara (Lillesand & Kiefer, 1993 dalam Iswahyudi dkk., 2016). Analisis kelurusan punggungan dan lembah pada penelitian ini menggunakan sudut pencahayaan 0° dan 135° pada ketinggian pencahayaan sebesar 45°. Hasil interpretasi penarikan kelurusan memberikan informasi mengenai pola arah utama struktur geologi (patahan), diduga sebagai faktor yang mempengaruhi kemunculan manifestasi panas bumi (Hermawan & Rezky, 2011).

2) Morfotektonik

Pengukuran kuantitatif yaitu membandingkan perbedaan bentuk lahan dengan menghitung variabel secara langsung (morfotektonik) berguna untuk mengidentifikasi karakteristik dan tingkat aktivitas tektonik suatu daerah (Gentana, 2018). Beberapa variabel morfotektonik yang digunakan yaitu:

(i) Rasio lebar dan tinggi lembah – *valley width and height ratio (Vf)*

Rasio lebar dan tinggi lembah (Vf) merupakan salah satu variabel morfotektonik yang sering digunakan untuk menggambarkan pengaruh aktivitas tektonik

yaitu pengangkatan / *uplift* (Sarp & Düzgün, 2012). Lembah sempit (berbentuk seperti huruf V) berasosiasi dengan pengangkatan tinggi sehingga menghasilkan nilai Vf yang relatif rendah, sedangkan lembah landai (berbentuk seperti huruf U) mencerminkan pengangkatan rendah dan proses erosi yang dominan dan cenderung menghasilkan nilai Vf yang tinggi (Keller & Pinter, 2002). Persamaan Vf dinyatakan sebagai berikut:

$$Vf = 2Vfw / [(Eld - Esc) + (Erd - Esc)] \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- Vfw : lebar dasar lembah
- Eld – Erd : ketinggian sisi kiri-kanan lembah
- Esc : ketinggian rata-rata dasar lembah

Nilai Vf diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelas tingkat pengangkatan (Keller & Pinter, 1996 dalam Sukiyah, 2017; Tabel 1).

Tabel 1. Klasifikasi nilai Vf

Kelas	V _f	Keterangan
I	< 0,50	Tingkat Pengangkatan (<i>Uplift</i>) Tinggi
II	0,50 – 1,00	Tingkat Pengangkatan (<i>Uplift</i>) Sedang
III	> 1,00	Tingkat Pengangkatan (<i>Uplift</i>) Rendah

sumber: Keller & Pinter, 1996 dalam Sukiyah, 2017.

(ii) Rasio percabangan sungai - *bifurcation ratio (Rb)*

Rasio percabangan sungai (Rb) dihitung dengan cara membandingkan jumlah segmen sungai pada orde 'n' dengan jumlah segmen sungai pada orde yang lebih tinggi (n+1) (Horton, 1945 dalam Gentana dkk., 2018), dengan persamaan:

$$Rb = n / n + 1 \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

- n : jumlah segmen sungai orde 'n'
- n + 1 : jumlah segmen sungai orde yang lebih tinggi

Penentuan orde sungai menggunakan metode Strahler (1952 dalam Sukiyah, 2017), yaitu mengelompokkan segmen sungai tanpa cabang sebagai orde pertama (1) dan pertemuan segmen sungai orde pertama (1) dikelompokkan sebagai orde kedua (2) dan begitu seterusnya. Klasifikasi nilai Rb (Verstappen, 1983 dalam Sukiyah, 2017) digunakan untuk mengetahui pengaruh aktivitas tektonik terhadap deformasi batuan (Tabel 2).

Tabel 2. Klasifikasi nilai R_b

R_b	Keterangan
$R_b > 5$ atau $R_b < 3$	Terdeformasi
$3 < R_b < 5$	Tidak Terdeformasi

sumber: Keller dan Pinter, 1996 dalam Sukiyah 2017

(iii) Sinusitas muka gunung - *mountain front sinuosity* (S_{mf})

Sinusitas muka gunung merupakan salah satu morfotektonik yang mencerminkan hubungan antara pengaruh aktivitas tektonik yang cenderung membentuk muka gunung yang lurus dan intensitas erosi yang cenderung menggerus muka gunung (Keller & Pinter, 2002), dengan persamaan S_{mf} dinyatakan sebagai berikut:

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

- L_{mf} : panjang lekukan muka gunung
- L_s : garis lurus segmen muka gunung

Nilai S_{mf} diklasifikasikan menjadi 3 (tiga) kelas yang mencerminkan tingkat aktivitas tektonik (Doornkamp, 1986 dalam Sukiyah, 2017; Tabel 3).

Tabel 3. Klasifikasi nilai S_{mf}

S_{mf}	Aktivitas Tektonik
1,2 – 1,6	Kelas I (Tektonik Aktif)
1,8 – 3,4	Kelas II (Tektonik Sedang)
2,0 – 7,0	Kelas III (Tektonik Tidak Aktif)

(iv) Kerapatan kelurusan - *lineament density* (L_d)

Kerapatan kelurusan (L_d) diperoleh dari nilai total panjang kelurusan (L) terhadap satuan luas (A) yaitu km/km^2 atau km^{-1} (Soengkono, 1999). Analisis kerapatan kelurusan membantu dalam kajian struktur geologi sebagai faktor penting pada sistem panas bumi (Hermawan & Rezky, 2011). Tingkat kerapatan kelurusan yang tinggi di suatu area diinterpretasikan memiliki persebaran manifestasi panas bumi dengan probabilitas yang tinggi (Mardiati dkk., 2020), dengan persamaan:

$$L_d = F / A \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

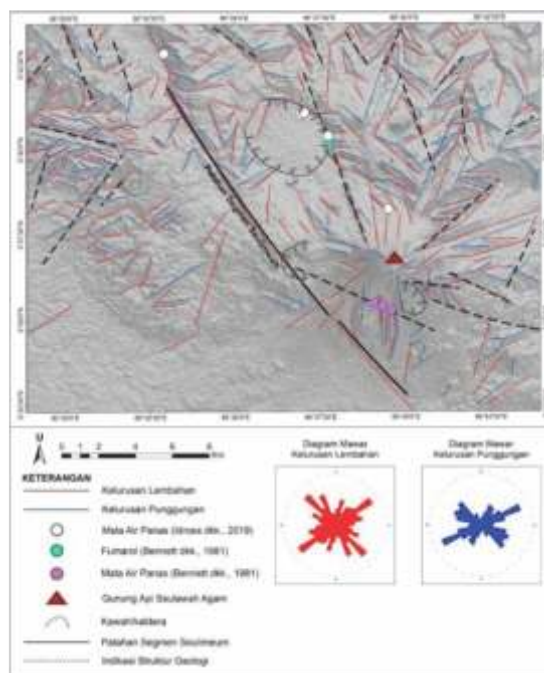
- F : frekuensi kelurusan (km)
- A : luas perhitungan (km^2)

HASIL KEGIATAN

Hasil kegiatan berupa hasil interpretasi kelurusan geologi (punggungan dan lembah) dan data hasil perhitungan variabel morfotektonik, yang diolah dan dianalisis sebagai data primer, dikorelasikan terhadap kemunculan manifestasi panas bumi (data sekunder), memberikan gambaran sebagai berikut:

Pola Utama Kelurusan Geologi

Hasil kelurusan geologi (punggungan dan lembah) yang di plot ke dalam diagram mawar memiliki pola utama kelurusan lembah yang didominasi oleh 2 (dua) orientasi yaitu berarah timurlaut -baratdaya (NE -SW) dan pola kelurusan berarah baratlaut - tenggara (NW-SE). Berdasarkan interpretasi kelurusan punggungan memperlihatkan pola utama kelurusan berarah timurlaut - baratdaya (NE-SW). Kelurusan geologi (punggungan-lembah) tersebut diinterpretasikan sebagai struktur geologi (patahan) yang berkembang di daerah ini, berhubungan dengan aktivitas tektonik yang membentuk patahan Segmen Seulimeum yang melintasi daerah bagian barat Gunung Seulawah Agam. Patahan Segmen Seulimeum merupakan bagian dari rangkaian sistem Patahan Sumatra (Gambar 3).



sumber: DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>).

Gambar 3. Peta pola kelurusan punggungan dan lembah di daerah Gunung Seulawah Agam.

Selain fitur kelurusan geologi (punggungan dan lembah), di daerah ini juga memperlihatkan adanya jejak kaldera atau beberapa kawah (*crater*) berbentuk melingkar (*circular*) dengan morfologi depresi. Hal tersebut menunjukkan adanya aktivitas gunung api yang kuat. Bentuk jejak kaldera atau beberapa kawah (*crater*) terlihat sudah tidak sempurna, menandakan kaldera atau kawah berumur tua dan telah terpengaruh oleh struktur geologi.

Rasio Lebar dan Tinggi Lembah (Vf)

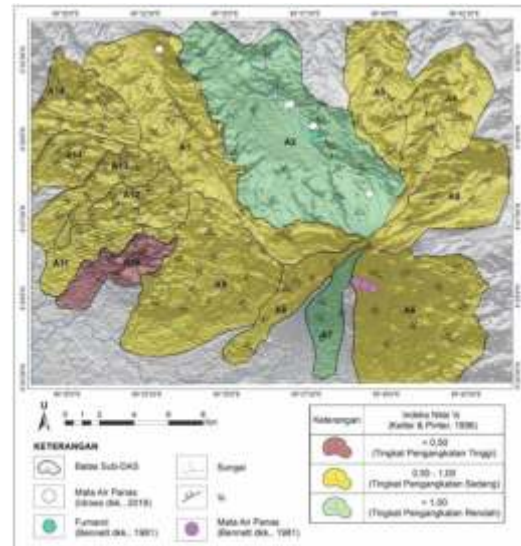
Perhitungan nilai Vf dilakukan pada 15 (lima belas) sub-DAS (Gambar 4). Hasil Perhitungan Vf rata-rata pada masing-masing sub-DAS memiliki rentang nilai 0,47-1,24 (Tabel 4). Nilai Vf rendah mengindikasikan aktivitas tektonik tinggi yang menyebabkan terjadinya pengangkatan (*uplift*) dan cenderung membentuk lembah sempit / curam (seperti huruf V) serta erosi berlangsung secara vertikal. Bilai Vf tinggi mengindikasikan tingkat pengangkatan rendah dan cenderung membentuk lembah lebar / landai (seperti huruf U) akibat pengaruh erosi horizontal yang dominan menggerus permukaan dasar lembah. Kemunculan manifestasi panas bumi di daerah ini menempati sub-DAS A1 (nilai Vf: 0,65), A2 (nilai Vf: 1,24), dan A6 (nilai Vf: 0,87).

Rasio Percabangan Sungai (Rb)

Perhitungan Rb dilakukan pada 15 (lima belas) sub-DAS (Gambar 5). Daerah studi tersusun oleh segmen sungai orde 1 (satu) hingga orde 5 (lima). Hasil perhitungan rasio percabangan sungai (Rb) memiliki nilai Rb berkisar 2,98 hingga 6,27 (Tabel 5). Kemunculan manifestasi panas bumi di daerah ini menempati sub-DAS A1 (nilai Rb: 4,17), A2 (nilai Rb: 3,30), dan A6 (nilai Rb: 4,53).

Tabel 4. Hasil perhitungan rasio lebar dan tinggi lembah (Vf) di daerah studi

Sub-DAS	V _f rata-rata	Kelas Tektonik
A1	0,65	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A2	1,24	3 (Tingkat Pengangkatan Rendah)
A3	0,70	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A4	0,62	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A5	0,76	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A6	0,87	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A7	1,08	3 (Tingkat Pengangkatan Rendah)
A8	0,69	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A9	0,71	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A10	0,47	1 (Tingkat Pengangkatan Tinggi)
A11	0,53	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A12	0,59	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A13	0,76	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A14	0,55	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)
A15	0,81	2 (Tingkat Pengangkatan Sedang)



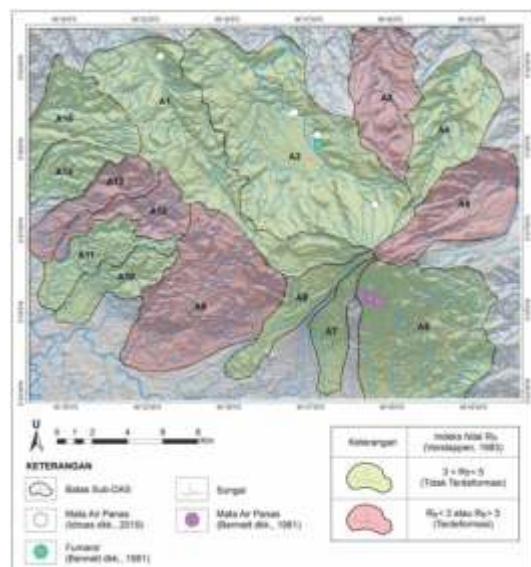
sumber: DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>).

Gambar 4. Peta rasio lebar dan tinggi lembah (Vf) di daerah studi memperlihatkan manifestasi panas bumi permukaan terdapat pada Sub-DAS yang mengalami tingkat pengangkatan (*uplift*) rendah hingga sedang.

Tabel 5. Hasil perhitungan rasio percabangan sungai (Rb) di daerah studi

Sub-DAS	Jumlah Segmen Sungai Orde ke-					Jumlah Segmen Sungai	Nilai R _b (n/n+1)				R _b rata-rata	Aktivitas Tektonik
	1	2	3	4	5		1-2	2-3	3-4	4-5		
A1	72	19	4	1		96	3,78	4,75	4,00		4,17	Tidak Terdeformasi
A2	95	23	5	2	1	126	4,13	4,60	2,50	2,00	3,30	Tidak Terdeformasi
A3	32	9	1			42	3,55	9,00			6,27	Terdeformasi
A4	39	11	3	1		54	3,54	3,66	3,00		3,40	Tidak Terdeformasi
A5	27	7	1			35	3,85	7,00			5,42	Terdeformasi
A6	81	17	6	1		105	4,76	2,83	6,00		4,53	Tidak Terdeformasi
A7	9	3	1			13	3,00	3,00			3,00	Tidak Terdeformasi
A8	9	2	1			12	4,50	2,00			3,25	Tidak Terdeformasi
A9	69	19	5	2	1	96	3,63	3,80	2,50	2,00	2,98	Terdeformasi
A10	13	3	1			17	4,33	3,00			3,66	Tidak Terdeformasi
A11	29	6	1	1		37	4,83	6,00	1,00		3,94	Tidak Terdeformasi
A12	31	5	1			37	6,20	5,00			5,60	Terdeformasi
A13	27	6	1			34	4,50	6,00			5,25	Terdeformasi
A14	21	4	1			26	5,25	4,00			4,62	Tidak Terdeformasi
A15	42	9	2			53	4,66	4,50			4,58	Tidak Terdeformasi

sumber: Klasifikasi Verstappen (1983).



Gambar 5. Peta rasio percabangan sungai (Rb) memiliki nilai Rb yang bervariasi, menunjukkan di daerah studi telah mengalami deformasi dan tidak terdeformasi.

Sinusitas Muka Gunung (Smf)

Perhitungan Smf dilakukan pada 20 (dua puluh) segmen muka gunung yang tersebar di bagian utara, selatan dan barat laut daerah studi (Gambar 6). Hasil perhitungan Smf (Tabel 6) memiliki rentang nilai 1,07 hingga 2,09. Smf bernilai rendah cenderung membentuk muka gunung yang lurus, sedikit lekukan dan lembah yang curam. Smf bernilai tinggi memperlihatkan banyak lekukan di sepanjang segmen muka gunung yang menandakan proses erosi berlangsung secara dominan.

Kerapatan Kelurusan (Ld)

Hasil perhitungan kerapatan kelurusan (Ld; Gambar 7) memperlihatkan variasi nilai Ld yang mencerminkan tingkat permeabilitas pada batuan. Nilai kerapatan kelurusan dikelompokkan menjadi 3 (tiga) kelas, yaitu kerapatan kelurusan (Ld) rendah memiliki rentang nilai: 0 – 0,50 km⁻¹, kerapatan kelurusan (Ld) sedang memiliki rentang nilai: 0,50 – 1,01 km⁻¹, dan kerapatan kelurusan (Ld) tinggi memiliki rentang nilai: 1,01 – 1,51 km⁻¹. Manifestasi panas bumi muncul pada daerah yang memiliki nilai kerapatan kelurusan (Ld) sedang hingga tinggi.

DISKUSI

Hasil kegiatan fokus mengemukakan hasil interpretasi kelurusan geologi berdasarkan pengamatan pola kelurusan punggungan dan lembah, kemudian diolah ke dalam diagram mawar untuk mengetahui pola utama kelurusan geologi yang diinterpretasikan sebagai struktur geologi (patahan) yang berkembang di daerah ini. Hasil perhitungan dari 4 (empat) variabel morfotektonik dipergunakan untuk mengetahui karakteristik morfotektonik dan hubungannya terhadap kemunculan manifestasi panas bumi di daerah studi. Karakteristik morfotektonik dalam kegiatan ini dipelajari karena aspek ini dapat mengetahui perkembangan struktur geologi dan tingkat aktivitas tektoniknya (Gentana dkk., 2019). Analisis morfotektonik pada 15 (lima belas) sub-DAS termasuk dalam cakupan daerah ini. Kajian struktur geologi dijelaskan sebagai berikut:

Karakteristik Kelurusan Geologi

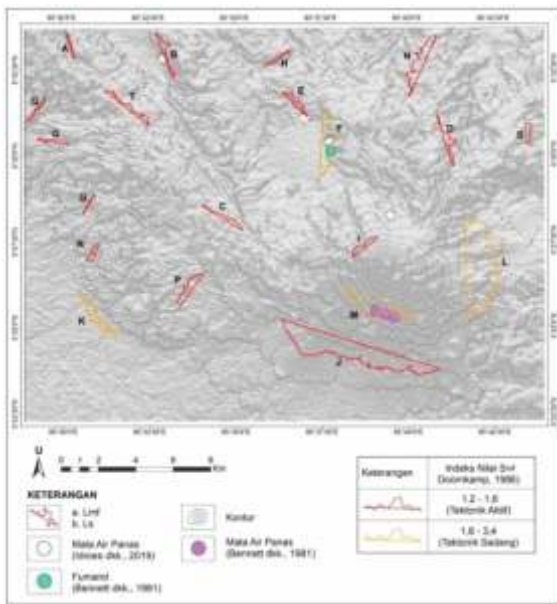
Pola kelurusan punggungan dan lembah merupakan fenomena morfologi dan jenis batuan memiliki peranan penting dalam perkembangan struktur geologi. Berdasarkan interpretasi pada citra DEMNAS dan peta RBI di daerah studi, indikasi struktur geologi dapat diamati melalui fitur kelurusan

punggungan dan lembah. Kelurusan tersebut sebagai indikasi adanya aktivitas tektonik yang mempengaruhi bentuk bentang alam. Pola utama kelurusan (struktur geologi / patahan) yang berkembang di daerah studi yang berperan terhadap kemunculan manifestasi panas bumi permukaan berarah barat laut – tenggara dan timurlaut – baratdaya (NW – SE dan NE – SW), diperkirakan sebagai sesar geser oblique. Sesar ini menimbulkan pemotongan pada tubuh batuan beku yang awalnya bersifat *impermeabel* menjadi *permeabel*, membentuk bidang lemah (permeabilitas) pada batuan yang dilaluinya sehingga fluida panas bumi dari suatu sistem panas bumi dapat muncul ke permukaan. Kenampakan morfologi jejak kaldera dan kawah membentuk fenomena depresi, menunjukkan adanya aktivitas vulkanik kuat. Daerah depresi pada daerah ini terlihat dari perbedaan rona warna dan bayangan di sekitarnya. Terdapatnya jejak kaldera dan beberapa kawah memperkuat indikasi bahwa bentang alam di daerah ini dikontrol oleh struktur geologi yang cukup intensif. Analisis morfotektonik menunjukkan terdapatnya daerah depresi memperkuat bentang alam telah dikontrol oleh struktur geologi yang cukup intensif (Gentana dkk., 2019). Beberapa jejak kawah yang bentuknya sudah tidak sempurna, menandakan kawah berumur tua dan terpengaruh oleh adanya struktur geologi.

Tabel 6. Hasil perhitungan sinusitas muka gunung (Smf) di daerah studi

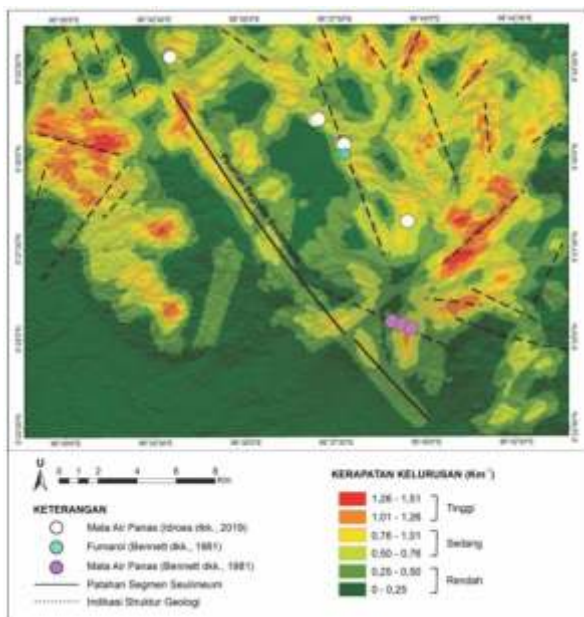
Kode	L _{mf} (km)	L _s (km)	S _{mf}	Aktivitas Tektonik
A	1,71	1,59	1,07	Tektonik Aktif
B	3,80	2,59	1,46	Tektonik Aktif
C	3,16	2,56	1,23	Tektonik Aktif
D	4,05	2,91	1,38	Tektonik Aktif
E	2,78	1,83	1,51	Tektonik Aktif
F	6,16	3,48	1,76	Tektonik Sedang
G	1,35	1,21	1,11	Tektonik Aktif
H	1,76	1,65	1,07	Tektonik Aktif
I	2,16	1,73	1,24	Tektonik Aktif
J	13,15	8,84	1,48	Tektonik Aktif
K	6,19	3,24	1,90	Tektonik Sedang
L	10,82	5,22	2,07	Tektonik Sedang
M	6,53	3,80	1,71	Tektonik Sedang
N	5,98	3,57	1,67	Tektonik Aktif
O	1,91	1,74	1,09	Tektonik Aktif
P	3,27	2,02	1,62	Tektonik Aktif
Q	1,77	1,64	1,07	Tektonik Aktif
R	1,50	1,01	1,48	Tektonik Aktif
S	1,53	1,14	1,33	Tektonik Aktif
T	4,70	2,96	1,58	Tektonik Aktif

sumber: Klasifikasi Doornkamp (1986).



sumber:DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>) dan RBI (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/perwilayah>).

Gambar 6. Peta sinusitas muka gunung (Smf) di daerah studi, memperlihatkan kemunculan manifestasi panas bumi berada pada daerah yang memiliki aktivitas tektonik sedang hingga aktif.



sumber:DEMNAS (<http://tides.big.go.id/DEMNAS/>).

Gambar 7. Peta kerapatan kelurusan (Ld) di daerah studi memperlihatkan daerah yang memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi (batuan permeabel warna kuning hingga jingga) membentuk pola yang relatif sama dengan pola kelurusan di permukaan, berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi.

Karakteristik Morfotektonik

Berdasarkan perhitungan perbandingan lebar dan tinggi lembah (Vf) pada 15 (lima belas) sub-DAS, secara keseluruhan menunjukkan daerah studi dikontrol oleh tingkat pengangkatan (*uplift*) rendah, sedang dan tinggi. Daerah yang mengalami tingkat

pengangkatan rendah terdapat di sub-DAS A2 di bagian utara dan sebagian kecil di bagian selatan, pada sub-DAS A7 (rentang nilai Vf ; 1,08 – 1,24). Daerah yang mengalami tingkat pengangkatan sedang mendominasi daerah studi, terdapat di sub-DAS A1, A3, A4, A5, A6, A8, A9, A11, A12, A13, A14, dan A15 (rentang nilai Vf ; 0,46 – 0,81). Sedangkan daerah yang mengalami tingkat pengangkatan tinggi berada di bagian baratdaya daerah studi di sub-DAS A10 (nilai Vf : 0,47). Terdapatnya manifestasi panas bumi pada daerah yang mengalami tingkat pengangkatan rendah – sedang, mencerminkan proses geologi seperti erosi, pelapukan atau adanya ubahan hidrotermal dengan intensitas tinggi dapat menyebabkan daya dukung batuan relatif rendah, sehingga membentuk bentang alam depresi bukan bentang alam perbukitan (Gentana, 2018). Di daerah studi diperlihatkan oleh bentuk morfologi yang melingkar sebagai jejak kaldera dan beberapa kawah gunung api.

Berdasarkan perhitungan rasio percabangan sungai (Rb) menunjukkan daerah studi telah mengalami deformasi dan tidak terdeformasi dengan nilai Rb yang bervariasi. Daerah yang mengalami deformasi diperlihatkan pada 5 (lima) sub-DAS, yaitu: sub-DAS A3, A5, A9, A12 dan A13 memiliki nilai Rb berkisar dari 6,27 – 5,25 menempati bagian barat laut dan timurlaut. Daerah yang tidak terdeformasi terdapat pada 10 (sepuluh) sub-DAS, yaitu; sub-DAS A1, A2, A4, A6, A7, A8, A10, A11, A14, dan A15 memiliki nilai Rb berkisar dari 4,17 – 4,58 tersebar menempati bagian barat, baratdaya, timurlaut, tenggara, dan mengarah utara dan selatan. Kemunculan manifestasi panas bumi berada pada daerah yang tidak terdeformasi. Terdapatnya nilai Rb sebagai daerah yang tidak terdeformasi diakibatkan oleh adanya proses geologi pada batuan / litologi yang bersifat homogen dan kurang resistan, proses erosi dan pelapukan yang dominan, adanya proses hidrotermal atau struktur geologi. Proses geologi tersebut sebagai faktor yang menyebabkan anomali pada konsep morfotektonik (Gentana, 2018).

Berdasarkan perhitungan nilai sinusitas muka gunung (Smf) pada 20 (dua puluh) segmen muka gunung, di daerah studi memiliki tingkat aktivitas tektonik sedang memperlihatkan *spotted area* (rentang nilai Smf ; 1,71 – 2,07) pada segmen F, K, L dan M. Daerah yang memiliki aktivitas tektonik aktif mendominasi daerah studi (rentang nilai Smf ; 1,07 – 1,67) pada segmen A, B, C, D, E, G, H, I, J, N, O, P, Q, R, S dan T. Kemunculan manifestasi panas bumi berada pada daerah yang memiliki tingkat aktivitas tektonik sedang dan tinggi.

Berdasarkan perhitungan kerapatan kelurusan (L_d) di daerah studi memperlihatkan kerapatan kelurusan

rendah, sedang dan tinggi. Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan rendah diperlihatkan oleh warna hijau tua – hijau muda (nilai L_d ; 0,00 – 0,50 km^{-1}) mendominasi daerah studi. Daerah yang memiliki kerapatan sedang diperlihatkan oleh warna hijau pupus – kuning (nilai L_d ; 0,50 – 1,01 km^{-1}). Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan tinggi diperlihatkan oleh warna jingga – merah (nilai L_d ; 1,01 – 1,51 km^{-1}). Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi mempunyai pola yang relatif sama dengan kelurusan geologi di permukaan. Hal ini mengindikasikan daerah tersebut memiliki intensitas rekahan cukup tinggi, membentuk porositas sekunder yang memiliki tingkat permeabilitas yang tinggi pada batuan berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi. Fluida (berupa air) mengalir ke reservoir panas bumi dan muncul di permukaan sebagai manifestasi panas bumi. Struktur geologi yang berperan sebagai zona permeabel tersebut diperkirakan terbentuk akibat aktivitas tektonik sedang hingga aktif yang terjadi di daerah studi.

KESIMPULAN

Pola utama kelurusan punggungan dan lembah yang berhubungan dengan perkembangan struktur geologi di daerah studi berarah timurlaut – baratdaya (NE - SW) dan baratlaut-tenggara (NW – SE). Kelurusan berarah baratlaut-tenggara memiliki pola yang relatif sama dengan sistem patahan regional.

ACUAN

- Ansori, C., dan Wardhani, F.A., 2015. Penentuan Tipe Fluida, Geotermometer Reservoir dan Hilang Panas Alamiah Berdasarkan Analisis Data Geokimia Panas Bumi di Kabupaten Banjarnegara, Jawa Tengah. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 10(3): 64-77.
- Badan Informasi Geospasial, 2015-2019. Peta Rupabumi Digital Indonesia. Bogor, Jawa Barat. Tersedia pada: <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/download/perwilayah> (Diakses: 13 September 2020 pukul 12.58 WIB).
- Badan Informasi Geospasial. DEMNAS. Tersedia pada: <http://tides.big.go.id/DEMNAS/> (Diakses: 13 September 2020 pukul 12.54 WIB).
- Bennett, J.D., Bridge, D.McC., Cameron, N.R., Djunuddin, A., Ghazali, S.A., Jeffery, D.H., Kartawa, W., Keats, W., Rock, N.M.S., Thomson, S.J., dan Whandoyo, R., 1981. *Peta Geologi Lembar Banda Aceh, Sumatra, skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Gentana, D., 2018. Indeks Geomorfik Sebagai Dasar Karakterisasi Neotektonik Untuk Penentuan Prospek Panas Bumi di Gunung Rendingan dan Sekitarnya. Disertasi, Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran.
- Gentana, D., Sulaksana, N., Sukiyah, E., and Yuningsih, E.T., 2018. Index of Active Tectonic Assessment: Quantitative-based Geomorphometric and Morphotectonic Analysis at Way Belu Drainage Basin, Lampung Province, Indonesia. *International Journal of Advanced Science Engineering Information Technology*, 8(6): 2460-2471.

Karakteristik morfotektonik di daerah studi mengekspresikan daerah ini telah mengalami pengangkatan (*uplift*) rendah hingga tinggi, terdeformasi dan tidak terdeformasi, aktivitas tektonik sedang hingga aktif, dan kerapatan kelurusan rendah hingga tinggi. Hal tersebut diperlihatkan oleh nilai Vf, Rb, Smf dan Ld:

- Rentang nilai Vf berkisar 0,47 – 1,24 (tingkat pengangkatan rendah hingga tinggi),
- Rentang nilai Rb berkisar 2,98 – 6,27 (terdeformasi dan tidak terdeformasi),
- Rentang nilai Smf berkisar 1,07 – 2,07 (aktivitas tektonik sedang hingga aktif),
- Rentang nilai Ld berkisar 0,00 – 1,51 km^{-1} (kerapatan kelurusan rendah hingga tinggi).

Kemunculan manifestasi panas bumi di permukaan terdapat pada tepi dan perpotongan kelurusan geologi (patahan) berarah baratlaut – tenggara (NW – SE), pada daerah yang mengalami aktivitas tektonik sedang hingga aktif dan memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh dosen dan staf Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran serta tim redaksi Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral (JGSM) yang telah memberikan kesempatan untuk mempublikasikan artikel ini.

- Gentana, D., Sulaksana, N., Sukiyah, E., and Yuningsih, E.T., 2019. Morphotectonics of Mount Rendingan Area Related to the Appearances of Geothermal Surface Manifestations. *Indonesian Journal on Geoscience*, 6(3): 291-309.
- Hermawan, D., dan Rezky, Y., 2011. Delineasi Daerah Prospek Panas Bumi Berdasarkan Analisis Kelurusan Citra landsat di Candi Umbul-Telomoyo, Provinsi Jawa Tengah. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 6(1): 1-10.
- Hidayati, S., Supartoyo, dan Irawan, W., 2014. Pengaruh Mekanisme Sesar Terhadap Gempa Bumi Aceh Tengah, 2 Juli 2013. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 5(2): 79-91.
- Idroes, R., Yusuf, M., Saiful, S., Alatas, M., Subhan, S., Lala, A., Muslem, M., Suhendra, R., Idroes, G.M., Marwan, M., and Mahlia, T.M.I., 2019. Geochemistry Exploration and Geothermometry Application in the North Zone of Seulawah Agam, Aceh Besar District, Indonesia. *Energies*, 12(23): 4442.
- Iswahyudi, S., Widagdo, A., dan Pratama, B.A., 2016. Analisis Zona Permeabel Fluida Sistem Panas Bumi Gunungapi Slamet Berdasarkan Analisis Kerapatan Kelurusan Citra SRTM dan Struktur Geologi. *Dinamika Rekayasa*, 12(1): 25-29.
- Keller, E.A., and Pinter, N., 2002. *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, And Landscape, Edisi ke-2*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Mardiati, D., Setianto, A., and Harijoko, A., 2020. Revealing Geothermal Potential Areas with Remote Sensing Analysis for Surface Temperature and Lineament Density: Case Study in South Bajawa, NTT, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 417(1): 012009p. IOP Publishing.
- Moechtar, H., Subiyanto, dan Sugianto, D., 2009. Geologi Aluvium Dan Karakter Endapan Pantai/Pematang Pantai di Lembah Krueng Aceh, Aceh Besar (Prov. NAD). *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, 19(4): 273-283.
- Muksin, U., Irwandi, Rusydy, I., Muzli, Erbas, K., Marwan, Asrillah, Muzakir, and Ismail, N., 2018. Investigation of Aceh Segment and Seulimeum Fault by Using Seismological Data; A Preliminary Result. *Journal of Physics: Conference Series*, 1011(1), 012031p. IOP Publishing.
- Oesanna, M., Ismail, N., dan Marwan, 2018. Identifikasi Zona Patahan di Sebelah Barat Gunung Api Seulawah Agam Berdasarkan Nilai Anomali Gravitasi. *Journal of Aceh Physics Society*, 7(2): 56-60.
- Sarp, G., and Düzgün, S., 2012. Spatial Analysis of Morphometric Indices: The Case of Bolu Pull-Apart Basin, Western Section of North Anatolian Fault System, Turkey. *Geodinamica acta*, 25(1-2): 86-95.
- Soengkono, S., 1999. Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assessment of Geothermal System. *Proceeding 21st New Zealand Geothermal Workshop*.
- Sugiyanto, D., Zulfakriza, Ismail, N., Adriansyah, F., Meilano, I., dan Hasanuddin, Z.A., 2011. Analisa Deformasi Permukaan Patahan Aktif Segmen Seulimeum dan Segmen Aceh. Proc. *Seminar Hasil Penelitian Kebencanaan TDMRC-Unsyiah, Banda Aceh*: 72-77.
- Sukiyah, E., 2017. *Sistem Informasi Geografis: Konsep dan Aplikasinya Dalam Analisis Geomorfologi Kuantitatif*. Unpad Press. Edisi 1, xxvi, p.296.
- Syukri, M., Saad, R., Marwan, Anda, S.T., Safitri, R., and Fadhli, Z., 2018. Geohazard Identification Using 2-D Resistivity Imaging for Seulawah Agam Volcano, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 273(1), 012026p. IOP Publishing.
-