

HUBUNGAN KARAKTERISTIK INDEKS GEOMORFIK TERHADAP KEMUNCULAN MANIFESTASI PANAS BUMI DI DAERAH NOKILALAKI

Muhammad Hudzaifah¹, Nana Sulaksana¹, Dewi Gentana¹

¹*Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, Sumedang*

email: m.hudzaifah.mh@gmail.com

(Diterima: September 2021/Revisi: Oktober 2021 /Disetujui: November 2021)

ABSTRAK

Kemunculan manifestasi panas bumi di daerah Nokilalaki berhubungan dengan morfologi dan struktur geologi yang dipengaruhi oleh aktivitas tektonik segmen Palu - Koro. Kajian indeks geomorfik melalui perhitungan rasio percabangan sungai (R_b), sinusitis muka gunung (S_{mf}), rasio lebar dasar lembah – tinggi (V_f) dan kerapatan kelurusan (L_d), bertujuan untuk mengetahui hubungan karakteristik indeks geomorfik terhadap kemunculan manifestasi panas bumi. Metode penelitian yaitu analisis penginderaan jauh dan analisis indeks geomorfik pada peta Rupa Bumi Indonesia (RBI) dan citra ASTER-DEM untuk mendapatkan pola utama kelurusan geologi dan nilai indeks geomorfik. Nilai indeks geomorfik menggambarkan tingkat aktivitas tektonik dan permeabilitas pada batuan, berperan memunculkan fluida panas bumi dari suatu sistem panas bumi di kedalaman ke permukaan. Berdasarkan penggabungan peta kelurusan geologi, peta indeks geomorfik dan sebaran manifestasi panas bumi, di daerah penelitian memiliki dua kelompok manifestasi panas bumi. Daerah berpola utama kelurusan geologi berarah barat laut – tenggara (*NW – SE*), merupakan daerah yang tidak terdeformasi (nilai R_b : 4, 55), aktivitas tektonik aktif (nilai S_{mf} : 1,34 – 1,53), pengangkatan (*uplift*) tinggi (nilai V_f : 0,47), kerapatan kelurusan rendah (nilai L_d : 0,49 – 0,91), berasosiasi dengan kemunculan kelompok manifestasi panas bumi di daerah depresi tepi segmen Sesar Palu - Koro di bagian tengah daerah penelitian. Daerah berpola utama kelurusan geologi utara timur laut - selatan barat daya (*NNE-SSW*), merupakan daerah tidak terdeformasi (nilai R_b : 4,20), aktivitas tektonik aktif (nilai S_{mf} : 1,47), pengangkatan (*uplift*) tinggi (nilai V_f : 0,22), kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi (nilai L_d : 1,37 – 2,75), berasosiasi dengan kemunculan kelompok manifestasi panas bumi di daerah perbukitan tepi segmen sesar Palu - Koro di bagian baratdaya daerah penelitian.

Kata kunci: *indeks geomorfik; manifestasi panas bumi; morfologi; pola kelurusan.*

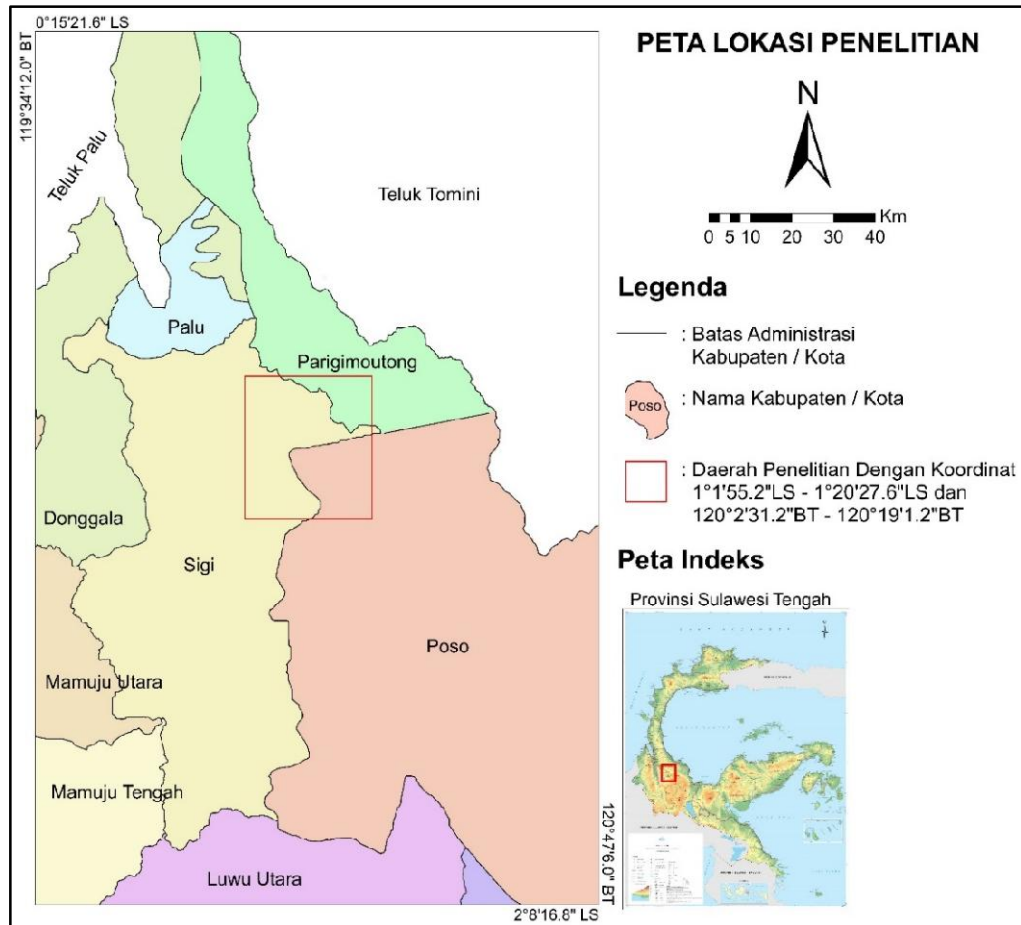
ABSTRACT

The appearance of geothermal manifestations in the Nokilalaki area is related to the morphology and geological structure which is influenced by the tectonic activity of the Palu - Koro segment. The study of geomorphic index through the calculation of river branching ratio (R_b), mountain face sinusitis (S_{mf}), valley bottom width ratio - height (V_f) and lineament density (L_d) to determine the relationship of geomorphic index characteristics to the appearance of geothermal manifestations. The research method is remote sensing analysis and geomorphic index analysis on the Indonesian Topographical Map (RBI) and ASTER – DEM images to obtain the main pattern of geological lineaments and geomorphic index values. The value of the geomorphic index describes the level of tectonic activity and permeability in rocks, which plays a role in generating geothermal fluid from a geothermal system at depth to the surface. Based on the combination of geological lineament maps, geomorphic index maps and distribution of geothermal manifestations, the study area has two groups of geothermal manifestations. The area with the main pattern of geological lineament trending northwest – southeast is an area that is not deformed (R_b value: 4.55), active tectonic activity (S_{mf} value: 1.34 – 1.53), high uplift (V_f value: 0.47), low lineament density (L_d value: 0.49 – 0.91), is associated with the appearance of geothermal manifestation groups in the depression edge of the Palu - Koro fault segment in the center of the study area. The main patterned area of the north- northeast-south-southwest geological lineament is a non-deformed area (R_b value: 4, 20), active tectonic activity (S_{mf} value: 1.47), high uplift (V_f value: 0, 22), medium to high lineament density (L_d value: 1.37 – 2.75), associated with the emergence of groups of geothermal manifestations in the hilly area of the edge of the Palu - Koro fault segment in the southwest part of the study area.

Keywords: geomorphic index, geothermal manifestation, morphology, pattern of lineaments.

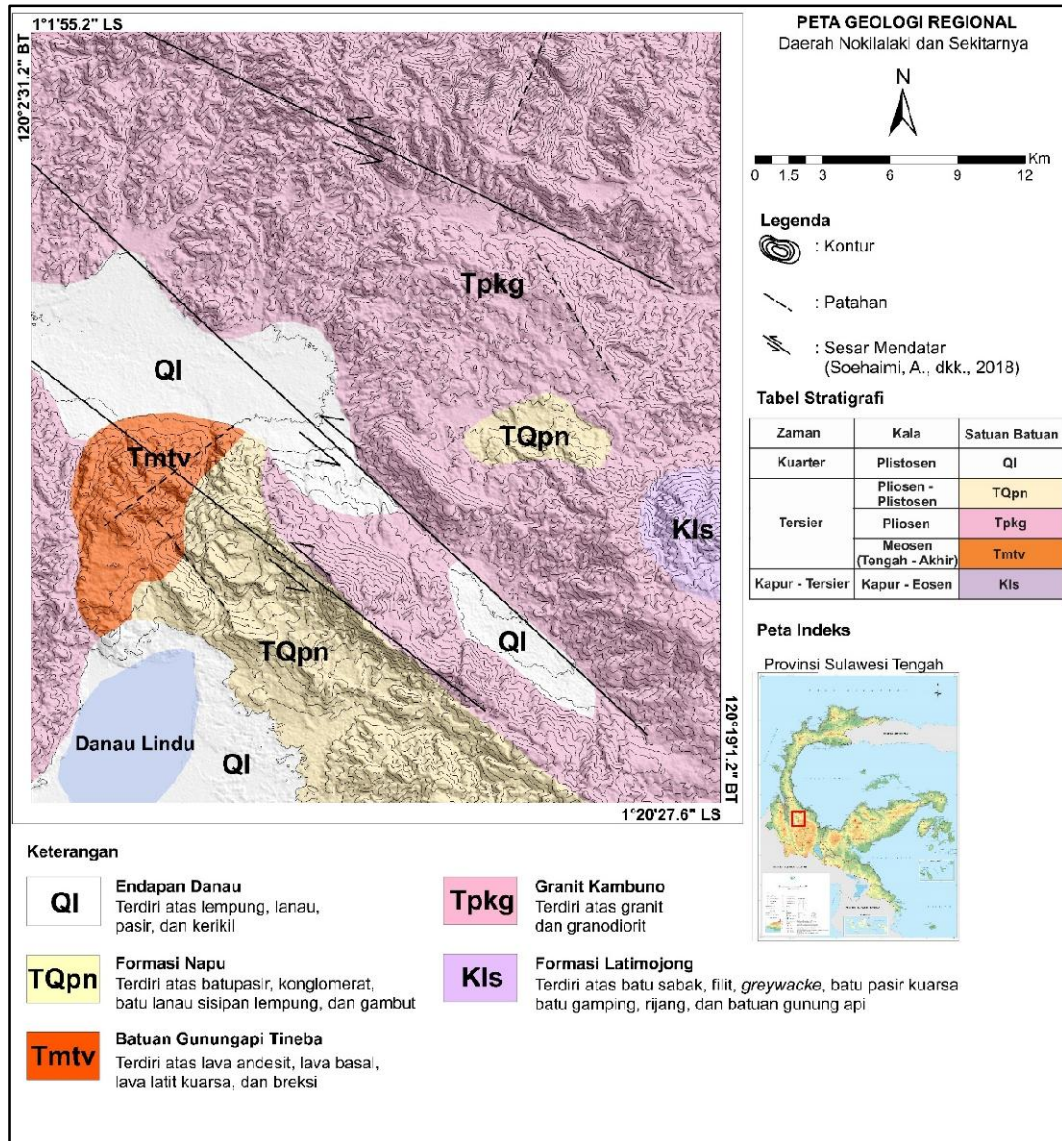
1. PENDAHULUAN

Secara administratif, daerah penelitian berada di Kecamatan Nokilalaki dan sekitarnya, Kabupaten Sigi, Sulawesi Tengah, terletak dalam koordinat $1^{\circ} 1' 55,2''\text{LS} - 1^{\circ} 20' 27,6''\text{LS}$ dan $120^{\circ} 2' 31,2''\text{BT} - 120^{\circ} 19' 1,2''\text{BT}$ (Gambar 1).



Gambar 1 Peta lokasi penelitian bersumber dari Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:50.000

Secara regional litologi di daerah penelitian terdiri dari 5 satuan batuan (Gambar 2) yaitu: 1 satuan batuan berumur Kapur, 3 satuan batuan berumur Tersier, dan 1 satuan batuan berumur Kuarter. Satuan batuan berumur Kapur adalah Formasi Latimojong (Kls). Satuan batuan berumur Tersier dari tua ke muda terdiri dari batuan gunung api Tineba (Tmtv), granit Kambuno (Tpkg), dan Formasi Napu (TQpn). Satuan batuan berumur Kuarter berupa endapan danau (Ql) (Simandjuntak, dkk., 1997).



Gambar 2 Peta geologi regional daerah penelitian (Simandjuntak, dkk., 1997)

Pola struktur geologi di daerah penelitian terbentuk akibat pergerakan sesar utama Palu - Koro di Sulawesi Tengah. Sesar ini secara keseluruhan memiliki panjang lebih kurang 250 km mulai dari Donggala di ujung Teluk Palu hingga Teluk Bone. Struktur sesar terlihat dari bentuk bentang alam segitiga faset pada gawir dengan jajaran kipas aluvium berarah barat - timur. Selain Sesar Palu - Koro berarah hampir utara - selatan dijumpai pula sesar berarah barat - timur, sesar dengan arah baratdaya - timurlaut dengan gerak geser turun, dan kekar yang dapat diamati berupa kekar tarik dan kekar gerus terutama pada batuan Pra-Tersier dan Tersier. Pada batuan Kuarter, kekar sulit diamati karena belum banyak mengalami deformasi seperti pada batuan Pra-Tersier dan Tersier (Soehaimi, 1985; Marjiyono, dkk., 2013).

Manifestasi panas bumi di daerah penelitian berupa mata air panas muncul pada tepi depresi dan perbukitan di selatan daerah penelitian (Wibowo, dkk., 2015). Kemunculan manifestasi panas bumi dapat muncul ke permukaan karena adanya struktur geologi pada batuan, akibatnya terbentuk zona lemah pada batuan sebagai jalur fluida yang menerobos keluar melalui rekahan-

rekahan batuan (Saptadji, 2001). Analisis geomorfologi kuantitatif dan keberadaan manifestasi panas bumi di permukaan dapat memberikan gambaran suatu daerah dikontrol oleh adanya aktivitas tektonik dan vulkanik (Gentana, 2018). Pola atau arah kelurusan berguna untuk mengidentifikasi pola struktur geologi utama yang mempengaruhi penyebaran manifestasi panas bumi (Hermawan & Rezky, 2011; Andrifa, dkk., 2021).

Tujuan dari penelitian yaitu untuk mengetahui tingkat aktivitas tektonik melalui analisis pola kelurusan geologi, karakteristik indeks geomorfik terutama yang berhubungan dengan kemunculan manifestasi panas bumi permukaan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari analisis pola kelurusan geologi (punggungan dan lembah) menggunakan citra ASTER-DEM dan perhitungan indeks geomorfik melalui 4 variabel, yaitu: rasio percabangan sungai (R_b), sinusitas muka gunung (S_m), rasio lebar dasar lembah terhadap tinggi lembah (V_f) dan kerapatan kelurusan (L_d). Sedangkan data sekunder berupa titik lokasi kemunculan manifestasi panas bumi yang diperoleh berdasarkan data dari peneliti terdahulu.

2.1. Analisis Pola Kelurusan Geologi

Fitur kelurusan geologi (punggungan dan lembah) dapat diidentifikasi pada suatu batas tepi yang memiliki perbedaan tingkat kecerahan warna yang halus pada citra. Kelurusan tersebut dapat berupa aliran sungai, lembah, dan depresi yang lurus, perubahan topografi yang mendadak, perubahan rona tanah, dan batas vegetasi yang lurus (Richards, 2000; Andrifa, dkk., 2021).

Berdasarkan pendekatan aplikasi penginderaan jauh dapat diketahui bahwa konvergensi dari kompleksnya struktur geologi di suatu daerah tercermin dari morfologi atau relief yang berkembang di daerah tersebut (Van Zuidam, 1983; Gentana, 2018). Untuk mendapatkan pola utama kelurusan geologi di daerah penelitian, diperoleh dari hasil penarikan garis kelurusan yang diaplikasikan pada diagram mawar.

2.2. Indeks Geomorfik

a) Rasio Percabangan Sungai-*Bifurcation Ratio* (R_b)

Rasio percabangan sungai adalah perbandingan antara jumlah segmen sungai orde “n” terhadap jumlah segmen sungai orde “n + 1” (Horton, 1945; Gentana, dkk., 2018). Rumus untuk menghitung rasio percabangan sungai yaitu:

$$R_b = \frac{\sum n}{\sum n+1} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

- R_b = Rasio percabangan sungai
- $\sum n$ = Jumlah sungai orde n
- $\sum n+1$ = Jumlah sungai orde n ditambah 1

Suatu daerah yang memiliki nilai R_b dengan nilai 3 – 5 diartikan bahwa daerah tersebut tidak terdeformasi oleh struktur geologi, sedangkan daerah yang memiliki nilai $R_b < 3$ atau > 5 menunjukkan daerah tersebut telah terdeformasi oleh struktur geologi (Tabel 1) (Verstappen, 1983; Gentana, dkk., 2018).

Tabel 1 Klasifikasi rasio percabangan sungai
(Verstappen, 1983; Gentana, dkk., 2018)

Keterangan	Nilai R_b
Tidak Terdeformasi	$3 \leq R_b \leq 5$
Terdeformasi	$R_b > 5$ atau $R_b < 3$

b) Sinusitas Muka Gunung-*Mountain Front Sinuosity* (S_{mf})

Sinusitas muka gunung merupakan perbandingan antara panjang muka gunung (L_{mf}) terhadap panjang proyeksi muka gunung ke bidang datar (L_s) (Bull & McFadden, 1977; Doornkamp, 1986). Gaya tektonik yang aktif cenderung akan membentuk profil morfologi relatif lurus dengan nilai S_{mf} yang rendah. Kelurusan morfologi biasanya berimpit dengan zona sesar aktif dan mencerminkan tektonik aktif dengan nilai S_{mf} yang rendah (Keller & Pinter, 1996). Rumus perhitungan nilai sinusitas muka gunung, yaitu:

$$S_{mf} = \frac{L_{mf}}{L_s} \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan:

- S_{mf} = Sinusitas muka gunung
- L_{mf} = Panjang lekukan muka gunung
- L_s = Panjang garis lurus muka gunung

Klasifikasi tektonik berdasarkan nilai S_{mf} dibagi menjadi kelas tektonik aktif, kelas tektonik sedang dan kelas tektonik tidak aktif (Tabel 2) (Doornkamp,1986; Supriyadi, dkk., 2018).

Tabel 2 Klasifikasi kelas tektonik (Doornkamp, 1986; Supriyadi, dkk., 2018)

Keterangan	Indeks Nilai S_{mf}
Kelas tektonik aktif	1,2 – 1,6
Kelas tektonik sedang	1,8 – 3,4
Kelas tektonik tidak aktif	2,0 – 7,0

c) Rasio Lebar Dasar Lembah Terhadap Tinggi Lembah-*Ratio of Valley Floor Width to Valley Height* (V_f)

Rasio lebar dasar lembah terhadap tinggi lembah memperlihatkan laju pengangkatan (*uplift*) pada suatu daerah melalui pengamatan terhadap lebar lembah dan tinggi lembah. Rumus perhitungan V_f adalah sebagai berikut (Keller & Pinter, 1996):

$$V_f = \frac{2 V_{fw}}{[(E_{ld}-E_{sc})+(E_{rd}-E_{sc})]} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- V_f = Rasio lebar dasar lembah terhadap tinggi lembah
- V_{fw} = Lebar dasar lembah
- E_{ld} = Elevasi sisi kiri lembah
- E_{rd} = Elevasi sisi kanan lembah
- E_{sc} = Elevasi dasar lembah

Nilai V_f yang rendah dicirikan oleh lembah berbentuk “V”, karena tingkat pengangkatan yang tinggi. Nilai V_f yang tinggi dicirikan oleh bentuk lembah “U” karena tingkat pengangkatan yang rendah. Klasifikasi tektonik berdasarkan nilai V_f dibagi menjadi 3 kelas (Tabel 3).

Tabel 3 Klasifikasi kelas tektonik

(Keller & Pinter, 2002; Hamdouni, dkk., 2008; Gentana, dkk., 2018).

Kelas Tektonik	Indeks Nilai V_f	Keterangan
1	$V_f < 0,5$	<i>Uplift</i> tinggi
2	$1 > V_f > 0,5$	<i>Uplift</i> sedang
3	$V_f > 1$	<i>Uplift</i> rendah

d) Kerapatan Kelurusan-*Lineament Density* (L_d)

Kerapatan kelurusan dapat dihitung menggunakan total panjang kelurusan per satuan luas, menggunakan *grid* dengan ukuran 1 x 1 km² sebagai luas area perhitungan (Soengkono, 1999).

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

Keterangan:

- L_d = Kerapatan kelurusan
 F = Frekuensi kelurusan
 A = Luas perhitungan (km²)

Kontur kerapatan kelurusan dengan nilai ≥ 3 km-1 berasosiasi kuat dengan zona permeabel akibat rekahan yang dapat mengakibatkan Bergeraknya fluida panas bumi, baik secara vertikal maupun lateral ke permukaan (Soengkono, 1999; Gentana, 2018).

2.3. Manifestasi Panas Bumi

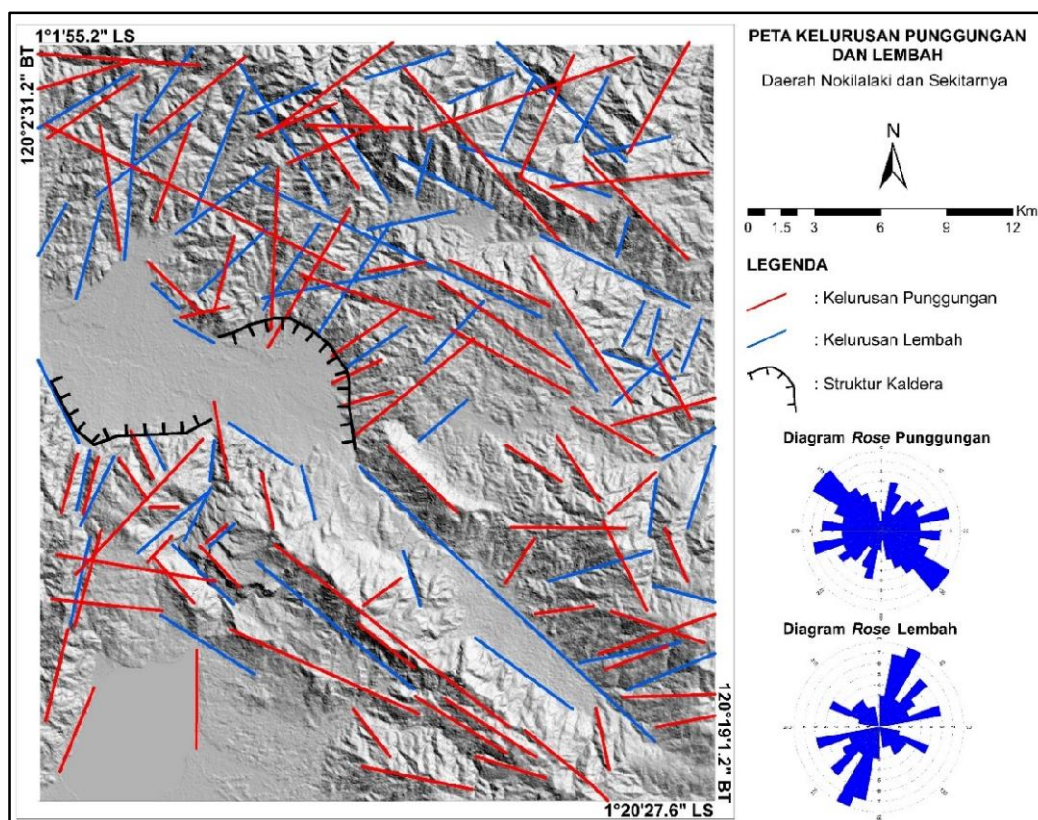
Manifestasi panas bumi di daerah penelitian merupakan data sekunder berupa mata air panas (Wibowo, dkk., 2015). lima lokasi kemunculan mata air panas berada di daerah depresi menempati bagian tengah daerah penelitian dan tiga lokasi kemunculan mata air panas menempati bagian barat laut daerah penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pola Kelurusan Geologi

Berdasarkan penarikan garis kelurusan geologi (punggungan dan lembahan) pada citra ASTER-DEM yang digambarkan pada diagram mawar memperlihatkan di daerah penelitian memiliki Pola utama kelurusan punggungan berarah barat laut – tenggara (*NW – SE*) dan kelurusan lembah memiliki pola utama berarah utara timur laut – selatan barat daya (*NNE – SSW*).

Kemunculan manifestasi panas bumi yang berada di bagian barat daya daerah penelitian, diinterpretasikan berasosiasi dengan kelurusan geologi yang memiliki pola utama barat laut – tenggara (*NW-SE*) merupakan sesar sekunder mendatar (*synthetic strike-slip fault*) yang relatif searah dengan sesar utama mendatar yang memiliki arah barat laut – tenggara. Kemunculan manifestasi panas bumi yang berada di bagian tengah daerah penelitian berada pada tepi garis sesar mendatar yang berarah barat laut-tenggara (*NW-SE*) dan tepi struktur melingkar (kaldera) (Gambar 3).



Gambar 3 Peta kelurusan geologi, memperlihatkan pola struktur geologi yang diaplikasikan pada diagram mawar memiliki pola utama punggungan berarah baratlaut -tenggara (NW-SE) dan pola utama lembah berarah utara timurlaut-selatan baratdaya (NNE-SSW). Struktur melingkar memperlihatkan jejak kaldera (membentuk daerah depresi), diinterpretasikan sebagai sisa aktivitas gunung api.

3.2. Karakteristik Indeks Geomorfik

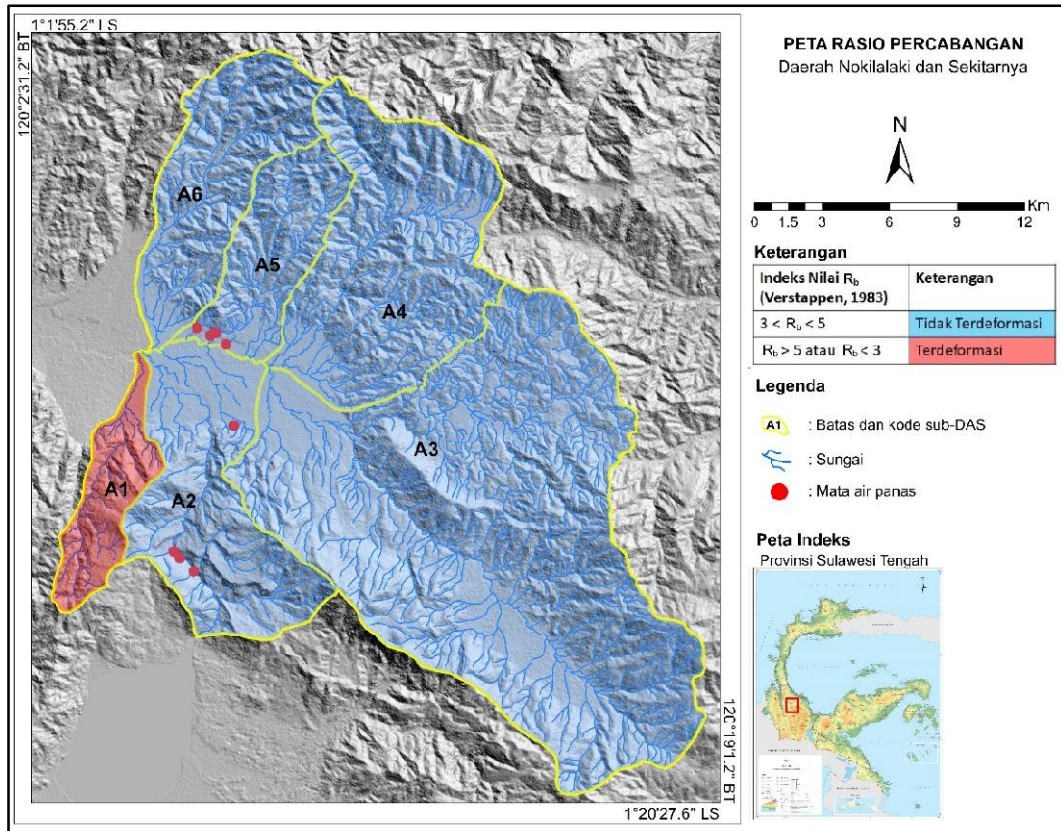
a) Rasio Percabangan Sungai – *Bifurcation Ratio* (R_b)

Hasil perhitungan nilai rasio percabangan sungai pada 6 sub-DAS di daerah penelitian, memperlihatkan daerah terdeformasi memiliki nilai R_b sebesar 5,71 (sub-DAS A1). lima sub-DAS (sub-DAS A-2,3,4,5 dan 6) tidak terdeformasi memiliki nilai R_b berkisar 3,91 – 4,94 (Tabel 4). Kemunculan manifestasi panas bumi (mata air panas) berada pada sub-DAS A2 dan sub-DAS A5 merupakan daerah yang tidak terdeformasi (Gambar 4).

Tabel 4 Perhitungan rasio percabangan sungai

Sub-DAS	Jumlah Segmen Sungai Orde					Nilai R_b				Rata-rata R_b	Keterangan
	1	2	3	4	5	R_b 1-2	R_b 2-3	R_b 3-4	R_b 4-5		
A1	31	7	1			4,42	7,00			5,71	Terdeformasi
A2	69	15	3	1		4,60	5,00	3,00		4,20	Tidak terdeformasi

A3	439	97	25	4	1	4,52	3,88	6,25	4,00	4,66	Tidak terdeformasi
A4	189	44	9	2	1	4,29	4,88	4,50	2,00	3,91	Tidak terdeformasi
A5	80	12	3	1		6,66	4,00	3,00		4,55	Tidak terdeformasi
A6	110	20	6	1		5,50	3,33	6,00		4,94	Tidak terdeformasi



Gambar 4 Peta rasio percabangan sungai (R_b)

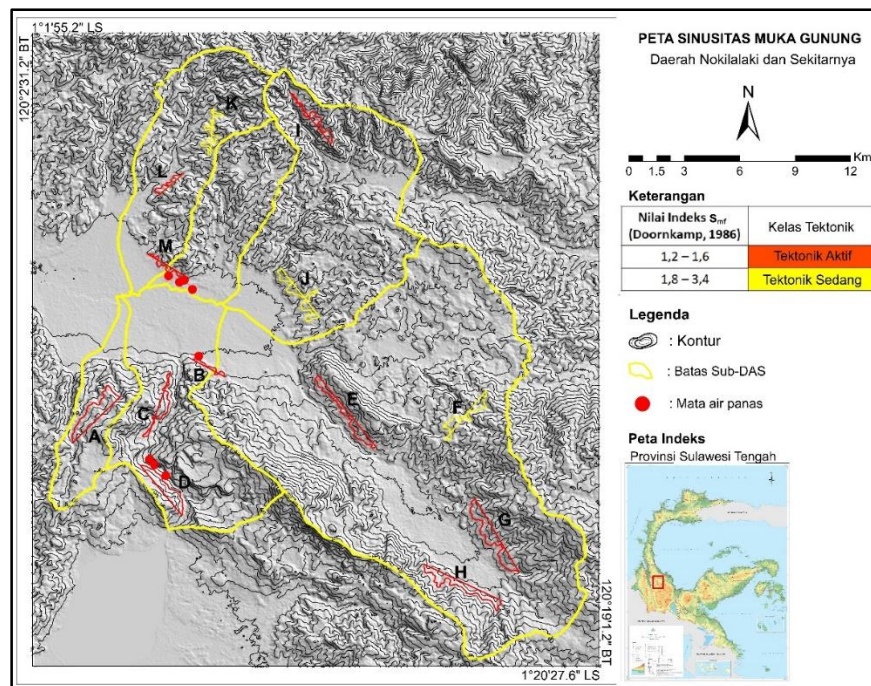
Terdapatnya manifestasi panas bumi pada daerah yang tidak terdeformasi mungkin terjadi dikarenakan beberapa proses geologi seperti tingkat pelapukan dan ubahan (alterasi) dengan intensitas tinggi dapat menyebabkan daya dukung batuan relatif rendah sehingga mudah tererosi dapat mengakibatkan anomali pada konsep geomorfologi termasuk indeks geomorfik (Gentana, 2018).

b) Sinusitas Muka Gunung-*Mountain Front Sinuosity* (S_{mf})

Hasil perhitungan S_{mf} terhadap 13 segmen muka gunung (Tabel 5), terdapat 10 segmen muka gunung yang memiliki kelas tektonik aktif memiliki rentang nilai S_{mf} 1,17 – 1,59 (segmen muka gunung A, B, C, D, E, G, H, I, L, dan M), dan 3 segmen muka gunung yang memiliki kelas tektonik sedang (segmen muka gunung F, J, dan K) memiliki rentang nilai S_{mf} 1,75 – 2,66. Kemunculan manifestasi panas bumi secara keseluruhan terletak pada segmen muka gunung yang memiliki kelas tektonik aktif (Gambar 5).

Tabel 5 Perhitungan sinusitas muka gunung

Kode	L _{mf} (Km)	L _s (Km)	S _{mf}	Kelas Tektonik (Doornkamp, 1986)
A	5,26	3,57	1,47	Tektonik Aktif
B	2,71	2,01	1,34	Tektonik Aktif
C	5,37	3,64	1,47	Tektonik Aktif
D	4,12	3,52	1,17	Tektonik Aktif
E	6,22	5,02	1,23	Tektonik Aktif
F	6,13	3,50	1,75	Tektonik Sedang
G	6,72	4,62	1,45	Tektonik Aktif
H	7,16	4,65	1,53	Tektonik Aktif
I	5,36	3,45	1,55	Tektonik Aktif
J	8,06	3,39	2,37	Tektonik Sedang
K	6,79	2,55	2,66	Tektonik sedang
L	2,76	1,73	1,59	Tektonik Aktif
M	3,61	2,53	1,53	Tektonik Aktif



Gambar 5 Peta sinusitas muka gunung (S_{mf}), memperlihatkan secara keseluruhan kemunculan mata air panas berada pada daerah yang memiliki kelas tektonik aktif

c) Rasio Lebar Dasar Lembah Terhadap Tinggi Lembah-*Ratio of Valley Floor Width to Valley Height (V_f)*

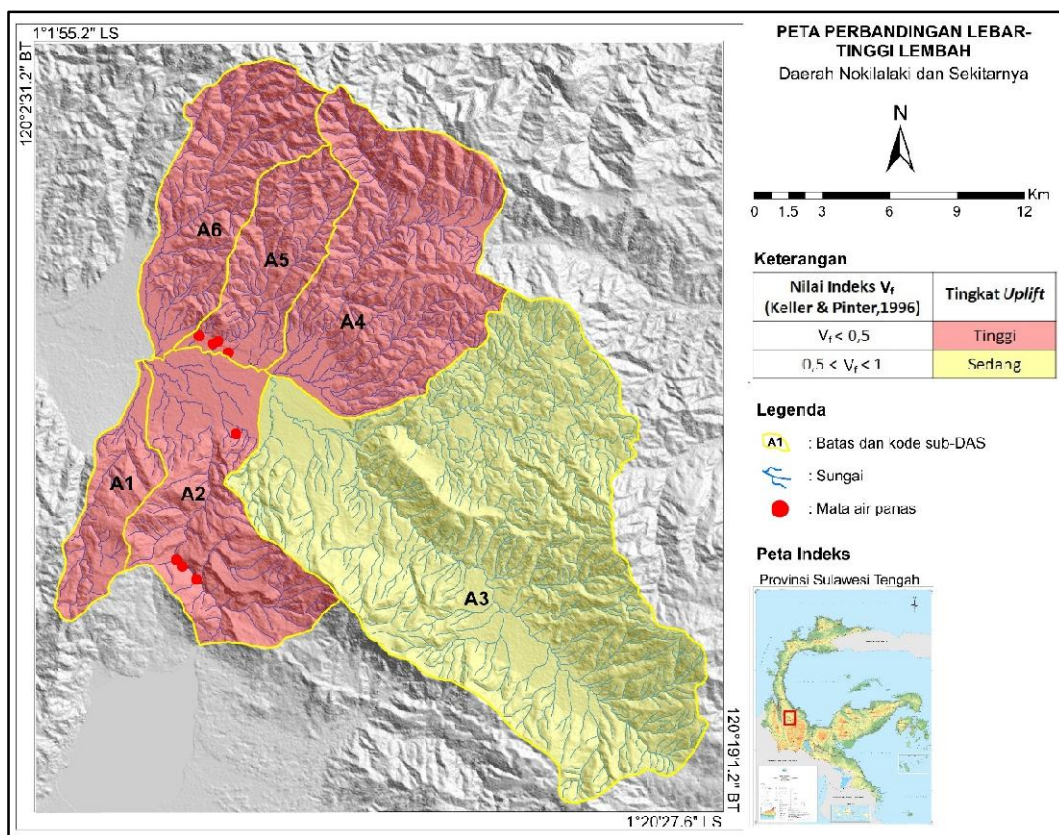
Hasil perhitungan V_f pada 6 sub-DAS di daerah penelitian (Tabel 6), secara keseluruhan mengalami tingkat pengangkatan tinggi hingga sedang (nilai V_f : 0,22 – 0,80), memperlihatkan 5 sub-DAS memiliki tingkat *uplift* tinggi dengan nilai V_f berkisar 0,22 – 0,47. Sedangkan 1 sub-DAS mengalami tingkat pengangkatan sedang (sub-DAS3), memiliki nilai V_f (0,80). Kemunculan manifestasi panas bumi mendominasi di daerah yang mengalami tingkat pengangkatan (*uplift*) tinggi yaitu di sub-DAS A2, A4, A5, dan A6 (Gambar 6).

Tabel 6 Perhitungan rasio lebar dan tinggi lembah

Sub-DAS	E_{ld} (m)	E_{rd} (m)	E_{sc} (m)	V_{fw} (m)	V_f	V_f rata-rata	Tingkat <i>uplift</i>
A1	1028,95	1227,27	882,01	52,47	0,21	0,30	Tinggi
	1360,00	1403,14	1190,90	59,28	0,31		
	1460,27	1478,24	1365,04	42,48	0,40		
A2	868,47	873,75	713,66	47,90	0,30	0,22	Tinggi
	1140,43	1124,41	769,70	70,11	0,19		
	1484,69	1427,02	802,49	98,16	0,15		
	1549,67	1445,84	858,39	99,51	0,15		
	1352,34	1370,52	907,19	60,99	0,13		
	1262,37	1263,78	1026,22	101,94	0,43		
A3	1296,40	1067,08	855,96	113,42	0,34	0,80	Sedang
	1931,28	1474,71	841,01	918,23	1,06		
	1201,06	1189,11	949,21	301,58	1,22		
	1190,79	1207,96	1078,88	245,06	2,03		
	1431,60	1475,87	1284,17	28,08	0,16		
	1552,84	1548,50	1027,09	711,11	1,35		
	1734,55	1761,34	1600,95	52,19	0,35		
	1946,31	1706,98	1152,41	796,49	1,18		
	2074,20	2166,79	1822,52	50,38	0,16		
	1765,68	1768,88	1509,07	44,93	0,17		
A4	793,64	799,17	732,05	41,58	0,64	0,32	Tinggi
	1116,63	1073,98	860,74	37,11	0,15		
	981,62	1028,79	771,21	63,31	0,27		
	1096,24	1072,42	1006,01	41,18	0,52		
	1053,38	1031,30	967,89	24,52	0,32		
	1508,19	1483,06	1365,77	70,63	0,54		
	1108,10	1140,16	1045,05	24,29	0,30		
	1586,12	1701,98	1429,41	20,91	0,09		

Hubungan Karakteristik Indeks Geomorfik Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi
Di Daerah Nokilalaki

	1690,49	1814,32	1304,00	42,80	0,09		
A5	919,05	929,13	855,08	37,65	0,54	0.47	Tinggi
	1204,08	1189,79	1145,45	27,43	0,53		
	1084,55	1120,08	943,60	53,63	0,33		
	1535,25	1504,84	1333,19	93,25	0,49		
A6	1016,15	1002,07	796,90	111,62	0,52	0.48	Tinggi
	1019,93	934,73	833,35	158,42	1,10		
	1215,99	1287,64	1035,31	47,76	0,22		
	1495,44	1464,26	1190,82	33,92	0,11		

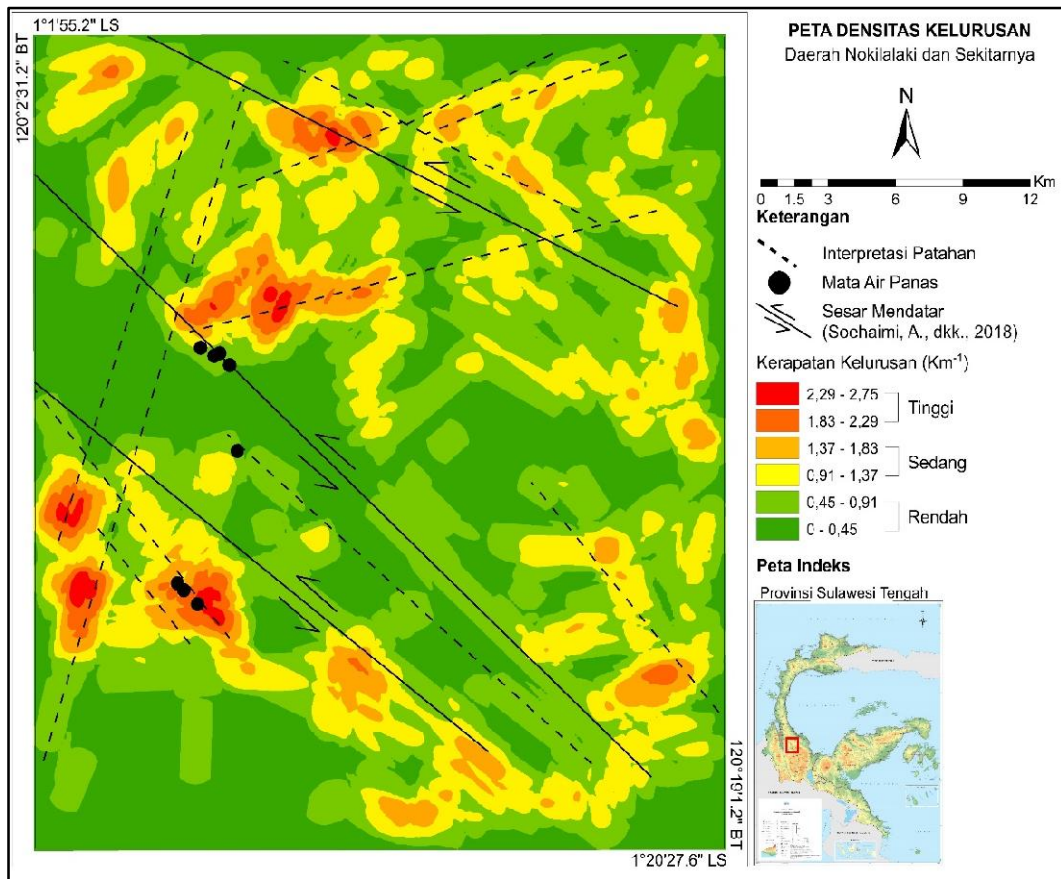


Gambar 6 Peta perbandingan lebar tinggi - lembah (V_r), memperlihatkan daerah yang mengalami tingkat pengangkatan (*uplift*), berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi

d) Kerapatan Kelurusan-*Lineament Density* (L_d)

Hasil perhitungan L_d , di daerah penelitian memiliki nilai kerapatan kelurusan yang bervariasi dari daerah yang memiliki nilai kerapatan kelurusan rendah, sedang hingga tinggi. Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan rendah memiliki kisaran nilai L_d 0 – 0,91 km^{-1} dicirikan oleh warna hijau tua – hijau muda. Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan sedang memiliki kisaran nilai L_d 0,91 – 1,83 km^{-1} dicirikan oleh warna kuning – coklat. Daerah yang memiliki kerapatan kelurusan tinggi memiliki nilai L_d 1,83 – 2,75 km^{-1} , dicirikan oleh warna jingga –

merah. Kemunculan manifestasi panas bumi berada pada daerah yang memiliki nilai kerapatan kelurusan rendah hingga tinggi (Gambar 7). Daerah yang memiliki nilai L_d tinggi mengindikasikan daerah yang memiliki intensitas rekahan tertinggi. Hasil penelitian di daerah Gunung Rendingan, daerah rekahan tinggi membentuk zona lemah dan porositas sekunder, menjadikan batuan bersifat permeabel dari sifat batuan yang awalnya tidak dapat meloloskan (*impermeable*) fluida dari suatu sistem panas bumi di bawah permukaan (Gentana, 2018).



Gambar 7 Peta kerapatan kelurusan (L_d), memperlihatkan daerah memiliki kerapatan tinggi (warna jingga – merah), diinterpretasikan sebagai jalur patahan membentuk permeabilitas paling tinggi pada batuan, berasosiasi dengan kemunculan manifestasi panas bumi di bagian baratdaya daerah penelitian.

3.3. Hubungan Kelurusan Geologi, Karakteristik Indeks Geomorfik Terhadap Kemunculan Manifestasi Panas Bumi

Hasil interpretasi kelurusan geologi yang diduga sebagai struktur geologi (patahan) di daerah penelitian memperlihatkan kemunculan manifestasi panas bumi (mata air panas) di daerah penelitian berasosiasi dengan struktur geologi yang memiliki pola utama barat laut – tenggara (*NW-SE*). Struktur geologi tersebut diinterpretasikan sebagai struktur sekunder yang terbentuk oleh adanya 2 sesar utama mendatar yang berarah barat laut-tenggara. Sesar utama di bagian utara berimpit dengan struktur melingkar (jejak kaldera). Kedua struktur utama mendatar membentuk graben (*oblique*) yang cukup luas. Perkembangan struktur geologi di daerah



penelitian menyebabkan terjadinya deformasi pada tubuh batuan membentuk bidang lemah (*permeable zone*), sehingga dapat meloloskan fluida panas bumi dari bawah permukaan ke permukaan sebagaimana halnya kemunculan mata air panas di daerah penelitian.

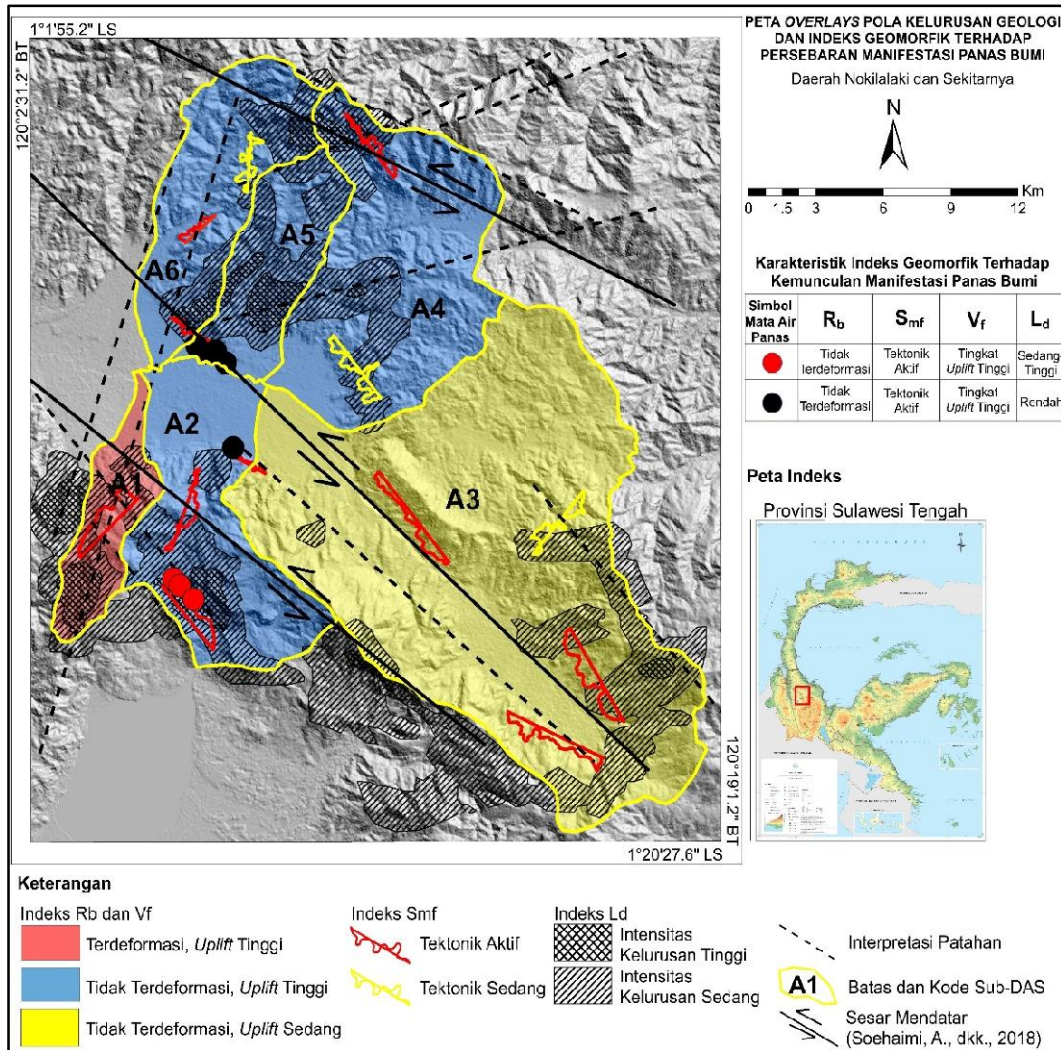
Hasil perhitungan indeks geomorfik menggunakan variabel sinusitas muka gunung (S_{mf}), perbandingan dasar tinggi dan lebar lembah (V_f), dan kerapatan kelurusan (L_d), memperlihatkan karakteristik yang relatif sama pada daerah kemunculan manifestasi panas bumi yaitu pada daerah yang memiliki tingkat tektonik aktif, mengalami tingkat pengangkatan (*uplift*) sedang hingga tinggi dan memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi.

Hasil perhitungan indeks geomorfik dari variabel rasio percabangan sungai (R_b) memperlihatkan kemunculan manifestasi berada pada daerah yang tidak terdeformasi dan terdapatnya satu lokasi manifestasi panas bumi berada pada daerah yang memiliki kerapatan kelurusan rendah. Hal ini mencerminkan proses geologi antara lain tingkat pelapukan dan ubahan (*alterasi*) pada batuan dengan intensitas tinggi dapat menyebabkan daya dukung batuan relatif rendah, sehingga mudah tererosi mengakibatkan anomali pada konsep geomorfologi termasuk indeks geomorfik, membentuk bentang alam depresi bukan bentang alam perbukitan. (Gentana, 2018). Dari citra ASTER-DEM terlihat di daerah ini merupakan daerah depresi yang cukup luas.

Penggabungan (*overlay*) peta pola utama kelurusan geologi dan peta hasil perhitungan karakteristik indeks geomorfik yang dikorelasikan dengan persebaran kemunculan manifestasi panas bumi di daerah penelitian diperlihatkan pada Tabel 7 dan Gambar 8.

Tabel 7 Karakteristik indeks geomorfik dan pola kelurusan terhadap kemunculan manifestasi panas bumi

Simbol mata air panas	Lokasi	Pola Kelurusan	R_b (deformasi oleh tektonik)	S_{mf} (tingkat tektonik)	V_f (tingkat <i>uplift</i>)	L_d (kerapatan kelurusan)	Keterangan
	Daerah perbukitan	baratlaut - tenggara (<i>NW - SE</i>)	4,20 (tidak terdeformasi)	1,47 (aktif)	0,22 (tinggi)	1,37 – 2,75 (sedang - tinggi)	- Kemunculan delapan manifestasi panas bumi pada dua sub-DAS (sub-DAS A2 dan A5)
	Daerah depresi	baratlaut - tenggara (<i>NW - SE</i>)	4,55 (tidak terdeformasi)	1,34 – 1,53 (aktif)	0,47 (tinggi)	0,45 – 0,91 (rendah)	- Satu lokasi manifestasi panas bumi memiliki nilai L_d rendah



Gambar 8 Peta *overlays* pola kelurusan geologi dan indeks geomorfik (R_b, S_{mf}, V_f dan L_d) memperlihatkan kemunculan manifestasi panas bumi berada pada daerah yang mengalami tektonik aktif, pengangkatan tinggi, kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi, dan tidak terdeformasi.

Pola struktur geologi di daerah penelitian terbentuk akibat pergerakan sesar utama Palu – Koro yang merupakan patahan aktif bercabang (bifurcation) dengan salah satu cabangnya mengarah ke daerah penelitian yaitu patahan aktif Lindu (Soehaimi, dkk., 2018). Aktivitas tektonik menyebabkan pergerakan Sesar Palu - Koro berdampak pada kondisi geologi di daerah penelitian. Gempa bumi besar bersifat merusak menyebabkan tsunami terakhir terjadi 28 September 2018 yang berpusat di sebelah timur Teluk Palu. Gempa terjadi akibat aktivitas patahan mendatar mengiri turun dengan arah jurus dan kemiringan patahan N359°E/67° (Soehaimi, 2018).

Rekomendasi penelitian lebih lanjut di sarankan ke bagian barat dari lokasi mata air panas di bagian baratdaya daerah penelitian ditandai dengan warna merah, daerah ini memiliki kelurusan geologi berarah baratlaut- tenggara (NW-SE), memiliki tingkat aktivitas tektonik tinggi, mengalami pengangkatan sedang hingga tinggi dan memiliki kerapatan kelurusan sedang

hingga tinggi. Sedangkan daerah di sebelah timur dari lokasi mata air panas yang berada di bagian tengah daerah penelitian meskipun merupakan daerah yang memiliki tingkat aktivitas tektonik tinggi, mengalami pengangkatan sedang hingga tinggi dan kerapatan kelurusan sedang, namun daerah ini sangat dekat dengan daerah konservasi yaitu Taman Nasional Lore Lindu, Kabupaten Sigi dan Lindu.

4. KESIMPULAN

Hasil *overlays* data pola utama kelurusan geologi, karakteristik indeks geomorfik, dan persebaran manifestasi panas bumi, menghasilkan dua kelompok sebaran manifestasi, yaitu:

1. Kelompok manifestasi panas bumi di daerah depresi

Manifestasi panas bumi muncul di daerah depresi, menempati bagian tengah daerah penelitian pada sub-DAS A2 dan sub-DAS A5, pada kelurusan geologi yang memiliki pola utama berarah barat laut – tenggara (*NW – SE*). Daerah ini merupakan daerah yang tidak terdeformasi ($R_b: 4,55$), memiliki tingkat aktivitas tektonik aktif ($S_{mf}: 1,34 – 1,53$), tingkat *uplift* tinggi ($V_f: 0,47$), serta memiliki satu lokasi manifestasi panas bumi dengan kerapatan kelurusan rendah ($L_d: 0,45 – 0,91$).

2. Kelompok manifestasi panas bumi di daerah perbukitan

Manifestasi panas bumi muncul di daerah perbukitan, menempati bagian barat laut daerah penelitian pada sub-DAS A2, pada kelurusan geologi yang memiliki pola utama berarah barat laut – tenggara (*NW – SE*). Daerah ini merupakan daerah yang tidak terdeformasi ($R_b: 4,20$), memiliki tingkat aktivitas tektonik aktif ($S_{mf}: 1,47$), tingkat *uplift* tinggi ($V_f: 0,22$), serta seluruh manifestasi muncul pada daerah yang memiliki kerapatan kelurusan sedang hingga tinggi ($L_d: 0 – 2,75$).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih banyak kepada PPSDM Geominerba yang telah memberikan kesempatan untuk menerbitkan tulisan ini. Terimakasih juga kepada para penelaah (*reviewer*) yang telah memberikan masukan dalam tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

Andrifa, J., Sulaksana, N., Gentana, D., & Sulastri, M. (2020) Geological Lineament Pattern and Geomorphic Indices Characteristic Related to Geothermal Manifestation Appearance: A Case Study from Gunung Talang District and Its Surroundings, Solok Regency, West Sumatra Province, Indonesia. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology* (www.ijrst.com). Volume 8, Issue 3 Page Number: 323-336 doi: <https://doi.org/10.32628/IJSRST218358>

- Gentana, D., Sulaksana, N., Sukiyah, E., & 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, p. 2460-2471 doi: <https://doi.org/10.18517/ijaseit.8.6.6089>
- Gentana, D. (2018). *Indeks Geomorfik Sebagai Karakterisasi Neotektonik untuk Penentuan Prospek Panasbumi Di Gunung Rendingan dan Sekitarnya, Lampung*. Disertasi yang tidak dipublikasikan, Universitas Padjadjaran, Bandung, Indonesia
- Keller, E. A., & Pinter, N. (1996). *Active tectonics earthquakes, uplift, and landscape*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Marjiyono, Kusumawardhani, H., & Soehaimi, A. (2013). Struktur geologi bawah permukaan dangkal berdasarkan interpretasi data geolistrik, studi kasus Sesar Palu Koro. *Geo-Hazards*, 23, p. 39 - 45.
- Peta Rupa Bumi Digital Indonesia, Badan Informasi Geospasial Republik Indonesia, 2015-2019. [Online]. Available: <http://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>. Accessed: August 21, 2021].
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik panasbumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Simandjuntak, T. O., Surono, & Supandjono, J. B. (1997). *Peta geologi lembar Poso, Sulawesi*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Soehaimi, A. (2018). *Seismotektonik dan gempa bumi tsunamigenik Palu-Donggala-Sigi, 28 September 2018, Sulawesi Tengah*. (diakses pukul 07.30 hari Senin 10 Juli 2021), dari <https://psg.bgl.esdm.go.id/informasi/layanan/geoseminar/544-seismotektonik-dan-gempa-bumi-tsunamigenik-palu-donggala-sigi-28-september-2018-sulawesi-tengah>.
- Soehaimi, A., Sopyan, Y., & Sulistyawan, I. H. (2018). *Di balik pesona Palu: seismotektonik Palu dan sekitarnya*. Bandung: Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Soengkono, S. (1999). Te Kopia geothermal system (New Zealand) - the relationship between its structure and extent. *Pergamon*, 28, p. 767-784 doi: [https://doi.org/10.1016/S0375-6505\(99\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6505(99)00042-5).
- Sompotan, A. F. (2012). *Struktur Geologi Sulawesi*. Bandung: Perpustakaan Sains Kebumihan Institut Teknologi Bandung.
- Supriyadi, Sulaksana, N., Ismawan, Raditya, P. P., & Sulastris, M. (2018). Karakteristik morfotektonik sub das Cikapundung dan kaitannya terhadap respon litologi gunung api Kuarter. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 2, p. 1-9.
- Wibowo, A. E., Nurhadi, M., Rezky, Y., Hermawan, D., & Setiawan, D. I. (2015). Penentuan kesamaan reservoir sistem panas bumi Kadidia dan Kadidia Selatan Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah berdasarkan metoda geokimia. *Bulletin Sumber Daya Geologi*, 10, p. 111-127 doi: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v10i2.142>.