



Analisis Potensi Panas Bumi Dua Sudara, Provinsi Sulawesi Utara Menggunakan Integrasi Citra Landsat 8 Dan DEM

Analysis Of Geothermal Potential In Dua Sudara, North Sulawesi Province Using Landsat 8 And Dem Image Integration

Peter Pratistha Utama^{1*}, Dani Mardiaty², Ikhwannur Adha³

¹Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia.
Jl. Padjajaran No. 104 Condongcatur, Sleman, D.I. Yogyakarta 55283

*Corresponding Author: peter.pratistha@upnyk.ac.id

Article Info:

Received : 5-10-2022
Accepted : 20-10-2022
Published: 30-10-2022

Kata kunci:

Panas bumi, kelurusan, Fault Fracture Density (FFD), Dua Sudara

Keywords:

Geothermal, kelurusan, Fault Fracture Density (FFD), Dua Sudara

Abstrak: Daerah potensi panas bumi Dua Sudara merupakan salah satu lokasi potensi panas bumi di Provinsi Sulawesi Utara. Tatanan tektonik regional lengan utara Pulau Sulawesi yang merupakan busur vulkanik Sangihe berumur Tersier hasil proses subduksi antara antara lempeng samudra Maluku dengan lempeng benua Eurasia menyebabkan melimpahnya keterdapatan gunungapi dan potensi panas bumi pada daerah ini. Penelitian ini menggunakan metode penginderaan jauh sebagai studi pendahuluan potensi panas bumi di daerah Dua Sudara. Data utama citra *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS) digunakan untuk melakukan analisis *Fault Fracture Density* (FFD) dan analisis kelerengan. Data utama citra Landsat-8 digunakan untuk melakukan analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), analisis *composite band*, dan analisis *Land Surface Temperature* (LST). Analisis FFD untuk mengetahui indikasi zona permeabilitas tinggi dalam sistem panas bumi Dua Sudara. Analisis kelerengan untuk menentukan lokasi imbuhan air permukaan. Indikasi lokasi sumber panas sistem panas bumi dan persebaran batuan teralterasi diinterpretasikan dari analisis LST dikorelasikan dengan analisis NDVI dan analisis *composite band*. Orientasi kelurusan hasil analisis dominan berarah baratlaut-tenggara dan utara-selatan. Sumber panas diinterpretasikan berasal dari Gunung Dua Sudara dan Gunung Batu Angus. Indikasi zona *outflow* berada di sebelah barat laut Gunung Dua Sudara yang dicirikan oleh sebaran sejumlah manifestasi panas bumi berupa mata air panas dengan orientasi barat laut-tenggara dan sebaran batuan alterasi hidrotermal. Daerah tangkapan air dan daerah imbuhan diidentifikasi berada di lereng sebelah barat laut dari Gunung Dua Sudara dan lereng sebelah barat laut-utara-timurlaut dari Gunung

Abstract: The Dua Sudara geothermal potential area is one of the potential geothermal locations in North Sulawesi Province. The regional tectonic arrangement of the northern arm of Sulawesi Island is the Sangihe volcanic arc of the Tertiary age resulting from the subduction process between the Maluku oceanic plate and the Eurasian continental plate, which has resulted in abundant occurrences of volcanoes and geothermal potential in this area. This research uses remote sensing methods as a preliminary study of geothermal potential in the Dua Sudara area. The primary data, National Digital Elevation Model (DEMNAS) images, are used to analyze the Fault Fracture Density (FFD) and slope analysis. Landsat-8 images perform Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) analysis, composite band analysis, and Land Surface Temperature (LST) analysis. FFD analysis determines indications of high permeability zones in the Dua Sudara geothermal system. Slope analysis is used to determine the location of surface water recharge. Indications of the geothermal source location and altered rock distribution are interpreted from LST analysis correlated with NDVI and composite band analysis. The dominant orientation of the analyzed lines is northwest-southeast and north-south. The heat source is interpreted to originate from Dua Sudara Mountain and Batu Angus Mountain. The outflow zone indication is located northwest of Dua Sudara Mountain, characterized by the distribution of several geothermal manifestations, such as hot springs with northwest-southeast orientation and hydrothermal alteration rock distribution. The recharge area is identified on the northwest slope of Dua Sudara Mountain and the northwest-northeast slope of Batu Angus Mountain.

1. Pendahuluan

Dua Sudara adalah salah satu daerah dengan potensi panas bumi yang terletak di wilayah Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara, berjarak sekitar 60 kilometer di sebelah timur Kota Manado, Sulawesi Utara. Daerah lain dengan potensi panas bumi di Sulawesi Utara seperti Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Lahendong, WKP Tompaso, WKP Kotamobagu, daerah potensi Kalawat, dan daerah potensi Wineru (Dirjen EBTKE ESDM, 2017). Penelitian mengenai potensi panas bumi Dua Sudara ini belum banyak dilakukan. Beberapa tahun belakangan, potensi panas bumi Dua Sudara ini mulai menarik perhatian untuk diteliti lebih lanjut terkait pengembangan dan pemanfaatan energi panas bumi secara langsung maupun tidak langsung sebagai pembangkit listrik tenaga panas bumi. Daerah potensi panas bumi Dua Saudara ini diperkirakan memiliki sumber daya spekulatif sebesar 22 MWe (Dirjen EBTKE ESDM, 2017). Penelitian ini berfokus pada analisis penginderaan jauh dengan mengintegrasikan citra Landsat-8 dan *Digital Elevation Model* (DEM) untuk menganalisis daerah potensi panas bumi berdasarkan bentuk topografi, kemiringan lereng, kelurusan lembah, pola pengaliran suhu permukaan, dan indeks kerapatan vegetasi. Tatanan tektonik regional lengan utara Sulawesi merupakan busur vulkanik Sangihe berumur Tersier yang merupakan produk proses subduksi antara lempeng samudra Maluku dengan lempeng benua Eurasia. Selanjutnya, busur vulkanik Sangihe mengalami proses kolisi dengan busur vulkanik Halmahera. Busur vulkanik Halmahera, sebelum mengalami proses kolisi, merupakan produk subduksi antara lempeng samudra Maluku dengan lempeng Filipina (Utami dkk., 2015). Dua Sudara merupakan produk busur kepulauan Sangihe. Potensi panas bumi Dua Sudara merupakan sistem panas bumi vulkanik pada lereng yang curam dan diindikasikan oleh keterdapatan beberapa manifestasi panas bumi mata air panas dengan suhu sekitar 60°C di sekitar lereng Gunung Dua Sudara dan Gunung Tangkoko yang merupakan dua gunungapi aktif berumur Kuartar, sehingga sistem panas bumi diduga berkaitan erat dengan aktivitas vulkanik tersebut (Zarkasyi dan Wahyuningsih, 2018). Daerah potensi panas bumi Dua Saudara sendiri tersusun oleh Batuan Gunungapi Muda (Qv) dengan litologi berupa lava, bom, lapilli, dan abu vulkanik, serta batuan andesit (Effendi dan Bawono, 1997). Indikasi struktur geologi yang dijumpai berupa kelurusan berarah timurlaut-baratdaya dan adanya struktur vulkanik berupa kaldera di Gunung Dua Sudara dan Gunung Batu Angus (Effendi dan Bawono, 1997).

2. Bahan dan Metode

2.1 Bahan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah citra *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS) dan citra *Landsat-8*. Citra DEMNAS dengan resolusi spasial 8-10 meter, digunakan sebagai data utama mendelineasi kelurusan lembah yang mencerminkan struktur geologi dan kenampakan melingkar (sirkuler) yang menggambarkan pusat-pusat erupsi vulkanik masa lampau maupun masa kini. Citra DEMNAS diolah dan dikonversi menjadi citra *hillshade* dengan derajat azimuth penyinaran 0°, 45°, 90°, dan 135°, serta kemiringan horizon cahaya pada sudut 45° dari bidang datar. Metode *hillshade* merupakan metode yang merepresentasikan relief suatu daerah dengan memberikan kesan 3D pada citra tersebut (ESRI, 2006 dalam Nugraha dkk., 2021). Metode *Fault Fracture Density* (FFD) untuk mendelineasi kelurusan-kelurusan di permukaan bumi dan menunjukkan nilai densitas dari kelurusan tersebut yang merepresentasikan besaran peran suatu rekahan pada suatu area imbuhan sebagai jalur infiltrasi air permukaan menuju bawah permukaan bumi (Soengkono, 1999). Area dengan nilai densitas yang tinggi merepresentasikan area reservoir yang potensial (Nugraha dkk., 2018)

Citra *Landsat-8* diakuisisi oleh satelit *Landsat-8*. Satelit *Landsat-8* merupakan satelit observasi bumi yang dipelopori oleh NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) dengan orbit polar tipe *sunsynchronous*, sudut inklinasi 98,2°, ketinggian 705 km di atas khatulistiwa, dan dengan dua buah sensor yaitu sensor OLI (*Operational Land Imager*) dan TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) (USGS, 2016 dalam Siombone, 2022). Data dari kedua sensor tersebut terdiri atas kanal-kanal *band* yang berbeda dan dapat digunakan dalam pemantauan kondisi permukaan bumi sesuai kegunaannya masing-masing. Data dari sensor OLI *Landsat-8* berupa *band-4* (cahaya tampak merah) dan *band-5* (inframerah dekat) akan

digunakan dalam penentuan tutupan lahan. Penentuan tutupan lahan didasarkan pada nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) yang menggambarkan seberapa rapat kondisi vegetasi suatu daerah (Azhari dkk., 2016). Suhu permukaan tanah ditentukan oleh analisis *Land Surface Temperature* (LST) melalui pemanfaatan data kanal *band-10* pada sensor TIRS. Citra *Landsat-8* pada daerah Kepahiang dan sekitarnya ini didapatkan dengan cara diunduh dari situs *USGS Explorer*. Citra *Landsat 8* yang diunduh ini dipilih dengan kriteria aspek tutupan awan pada citra ini kurang dari 10%, sehingga representatif untuk dilakukan analisis LST dan NDVI menggunakan perangkat lunak ENVI 5.3 dan ArcGIS 10.7.1.

2.2 Metode

2.2.1 Metode *Fault Fracture Density* (FFD)

Analisis penginderaan jauh menggunakan metode FFD menghasilkan peta densitas kelurusan di wilayah Dua Sudara, Provinsi Sulawesi Utara. Kelurusan-kelurusan diinterpretasikan sebagai sesar dan rekahan yang merupakan bidang lemah untuk jalur peresapan (infiltrasi) air permukaan dan jalur sirkulasi fluida panas bumi. Metode delineasi kelurusan secara otomatis menggunakan algoritma LINE dari Thannoun (2013) menggunakan perangkat lunak PCI Geomatica 2015 diterapkan pada penelitian ini. Parameter delineasi kelurusan secara otomatis antara lain *filter radius*, *gradient threshold*, *length threshold*, *line fitting error threshold*, *angular difference threshold*, dan *linking distance threshold* yang diatur dengan masing-masing nilai yang dijadikan acuan. Kelurusan yang telah diperoleh dari data DEMNAS kemudian dikelompokkan pada *grid* dengan ukuran 2 km x 2 km untuk menghasilkan kontur kerapatan kelurusan. Besaran 2 km dipilih bertujuan untuk mendapatkan kerapatan struktur regional sebagai tambahan untuk interpretasi sistem panas bumi. Hasil dari analisis dengan metode FFD ini adalah sebaran daerah yang memiliki kerapatan tinggi dan rendah. Daerah dengan nilai kerapatan yang tinggi diinterpretasikan mewakili daerah *upflow* dan *outflow* (Hakim dkk., 2017; Nugraha dkk., 2021).

2.2.2 Analisis Kelerengan dan Interpretasi Kenampakan Melingkar (Sirkuler)

Analisis kelerengan merupakan analisis yang digunakan untuk mengetahui tingkat kecuraman lereng pada topografi daerah yang memiliki perbedaan elevasi yang signifikan. Hasil dari analisis kelerengan berupa peta kelerengan yang mengacu pada klasifikasi besar sudut kelerengan yang dibuat oleh Van Zuidam (1985). Peta kelerengan diproses menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.7.1. Peta kelerengan ini diperlukan untuk mengetahui area tangkapan air dan area imbuan. Area tangkapan air adalah daerah tempat peresapan (infiltrasi) air yang dibatasi oleh lereng curam dan menjadi daerah pengumpul air hujan yang turun dan mengalir dari lereng yang curam menuju ke sungai dan selanjutnya dialirkan ke laut (Asdak, 1995 dalam Ramadhan, 2017). Kenampakan melingkar (sirkuler) diinterpretasikan sebagai sisa-sisa kegiatan vulkanisme di suatu daerah yang bisa menghasilkan anomali suhu permukaan. Daerah yang memiliki kenampakan melingkar dapat diinterpretasikan sebagai kenampakan kaldera yang berpotensi sebagai sumber panas (*heat source*) dari suatu sistem panas bumi vulkanik (Hakim dkk., 2017; Nugraha dkk., 2021).

2.2.3 Analisis *Land Surface Temperature* (LST)

Nilai *Land Surface Temperature* (LST) merupakan keadaan atau kondisi dari suhu permukaan rata-rata suatu daerah yang dikontrol oleh keseimbangan energi permukaan, atmosfer, sifat termal permukaan, dan media bawah permukaan tanah (Faridah dan Krisbiantoro, 2014 dalam Siombone, 2022). Peta LST dihasilkan dari salah satu band TIRS *Landsat-8* yaitu *band 10* dengan koreksi yang melibatkan band OLI, dalam hal ini band yang digunakan dalam *range spectral red* dan *near infrared* yaitu *band 4* dan *band 5*. Tahapan pembuatan peta LST, antara lain perhitungan *Top Atmospheric Spectral Radiance*, konversi pada *Radiance to At-Sensor Temperature*, perhitungan NDVI, proporsi vegetasi, *Land Surface Emissivity* (LSE), dan LST. (Avdan dan Jovanovska, 2016 dalam Nugraha dkk., 2021).

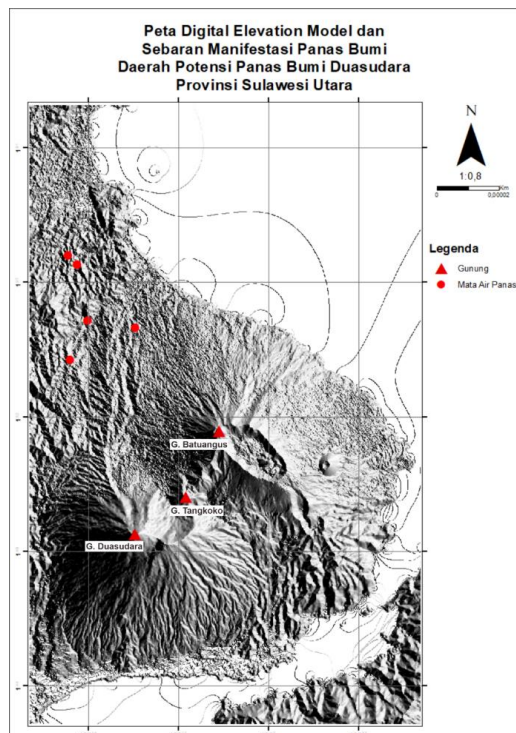
2.2.4 Analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Citra *Landsat-8* dari *band visible* dan *near infrared* digunakan untuk menghitung indeks vegetasi menggunakan transformasi yang disebut Analisis NDVI. Perhitungan NDVI penting karena keberadaan

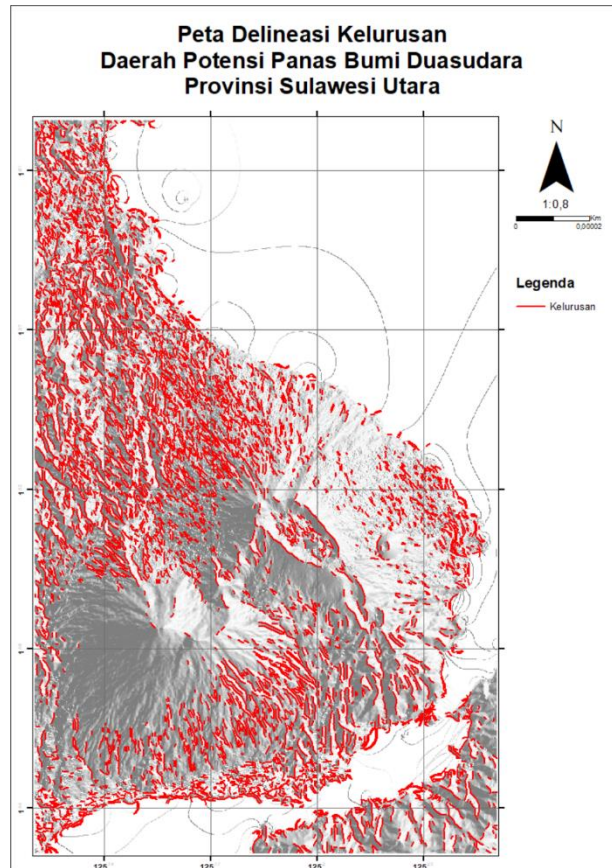
vegetasi merupakan faktor penting dalam penentuan suhu dan gambaran keberadaan vegetasi pada daerah tersebut. Tahapan sebelum melakukan perhitungan NDVI adalah koreksi radiometrik pada band 4 (*band visible*) dan band 5 (*near infrared*). Koreksi radiometrik bertujuan untuk mereduksi kesalahan perekaman nilai pantulan sinar matahari dengan cara mengubah nilai *Digital Number* (DN) menjadi nilai *Top of Atmosphere Reflectance*. Hasil ekstraksi dari algoritma NDVI yang diperoleh akan menghasilkan rentang nilai antara -1 sampai 1 yang digunakan untuk merepresentasikan kondisi tutupan lahan (kerapatan vegetasi) suatu kawasan. Klasifikasi nilai NDVI untuk analisis tingkat kerapatan vegetasi mengacu pada penelitian Mia, dkk. (2017), seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Tahapan selanjutnya dari perhitungan nilai NDVI adalah perhitungan nilai proporsi vegetasi (Nugraha dkk., 2021; Siombone, 2022).

3. Hasil dan Pembahasan

Analisis citra DEMNAS menggunakan empat arah sudut azimuth penyinaran yaitu 0°, 45°, 90°, dan 135° dengan sudut horizon cahaya penyinaran dari bidang datar yang konstan 45°. Keempat citra tersebut dianalisis lebih lanjut dengan cara menggabungkan citra-citra tersebut dan melakukan pembobotan nilai dengan *tool raster calculator* di perangkat lunak ArcGIS 10.7.1. Data lokasi gunung api, seperti Gunung Dua Sudara, Gunung Tangkoko, dan Gunung Batu Angus, serta lokasi mata air panas di daerah potensi panas bumi Dua Sudara yang mengacu pada penelitian Zarkasyi dan Wahyuningsih (2018) juga ditambahkan pada citra tersebut. Hasil transformasi citra DEMNAS menggunakan fungsi *hillshade* ditunjukkan oleh Gambar 1. Citra DEMNAS digabungkan dengan peta geologi regional juga digunakan untuk mengidentifikasi kenampakan melingkar yang mewakili bentukan suatu kaldera gunungapi. Kaldera yang berhasil diidentifikasi berjumlah dua yaitu kaldera Gunung Dua Sudara dan kaldera Gunung Batu Angus yang menjadi indikator sumber panas dari sistem panas bumi Dua Sudara. Selanjutnya, citra DEMNAS yang telah diolah tersebut digunakan dalam delineasi kelurusan secara otomatis menggunakan perangkat lunak PCI Geomatica 2015 dan dengan algoritma LINE. Standar nilai algoritma yang dijadikan acuan pada delineasi kelurusan ini adalah standar nilai yang dijelaskan oleh Abdullah, dkk. (2010). Kelurusan yang didelineasi didominasi oleh kelurusan berorientasi barat-laut-tenggara dan utara-selatan. Kelurusan ini merepresentasikan lembah-lembah dan aliran sungai. Peta delineasi kelurusan ditunjukkan oleh Gambar 2.

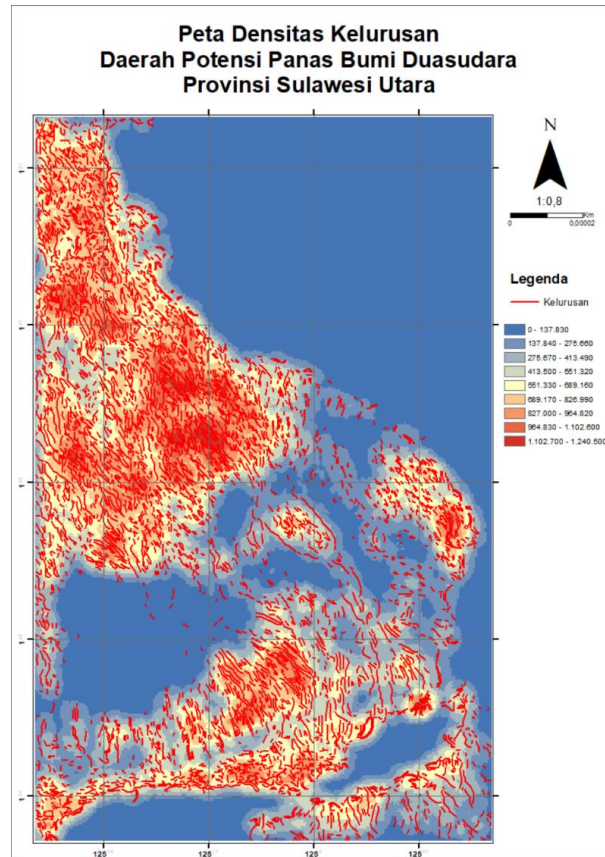


Gambar 1. Peta DEM dan sebaran manifestasi panas bumi di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.

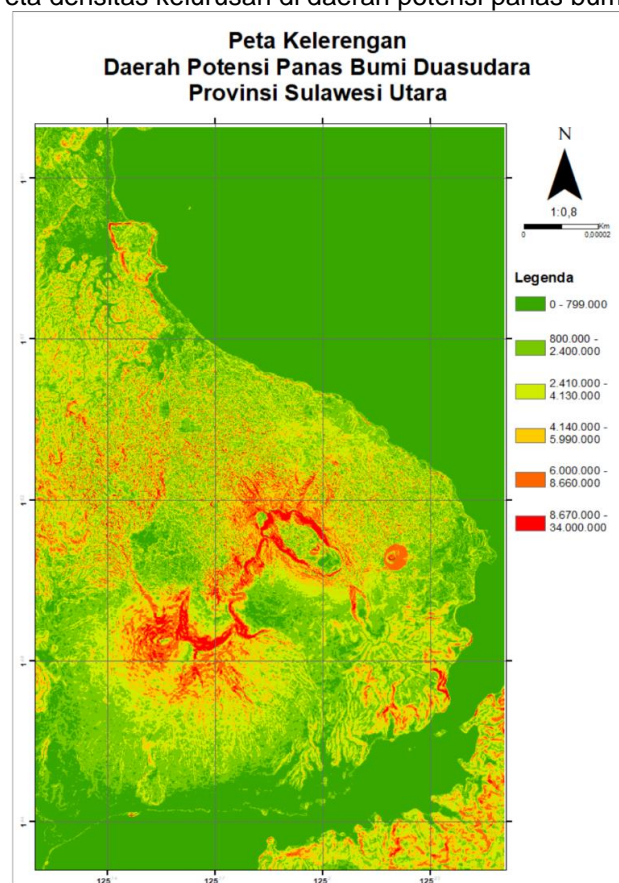


Gambar 2. Peta delineasi kelurusan di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.

Analisis FFD dengan data utama *shapefile* kelurusan yang telah didelineasi diproses pada perangkat lunak ArcGIS 10.7.1 dengan *tool line density*. *Tool line density* ini melakukan kalkulasi densitas berdasarkan radius dan kerapatan antara kelurusan berdasarkan data spasial serta melakukan interpolasi daerah-daerah dengan nilai densitas yang sejenis. Peta densitas kelurusan yang dihasilkan oleh *tool* ini selanjutnya diproses untuk menghasilkan visual yang lebih jelas dan memiliki resolusi tinggi. Peta densitas kelurusan yang dihasilkan ditampilkan dengan *shapefile* kelurusan untuk melihat sebaran daerah densitas tinggi. Daerah dengan densitas yang tinggi ditunjukkan pada area berwarna merah kekuningan yang dominan berada di bagian barat laut dari daerah potensi panas bumi Dua Sudara dan di sebelah selatan Gunung Tangkoko (lihat Gambar 3). Mata air panas ditunjukkan berada di bagian tepi dari daerah dengan nilai densitas kelurusan yang tinggi. Identifikasi dan interpretasi tingkat kecuraman lereng dan arah kelerengan dilakukan dengan analisis kelerengan. Analisis kelerengan diperlukan untuk mengetahui daerah yang memungkinkan menjadi daerah terkumpulnya air permukaan atau daerah tangkapan air. Peta kelerengan ditunjukkan oleh Gambar 4. Daerah dengan kelerengan yang curam ditunjukkan oleh daerah berwarna merah dan jingga yang terletak di daerah sebelah barat laut dari Gunung Dua Sudara, lereng sebelah selatan dari Gunung Dua Sudara dan gunung Tangkoko, serta lereng sebelah barat laut-utara-timurlaut dari Gunung Batu Angus.

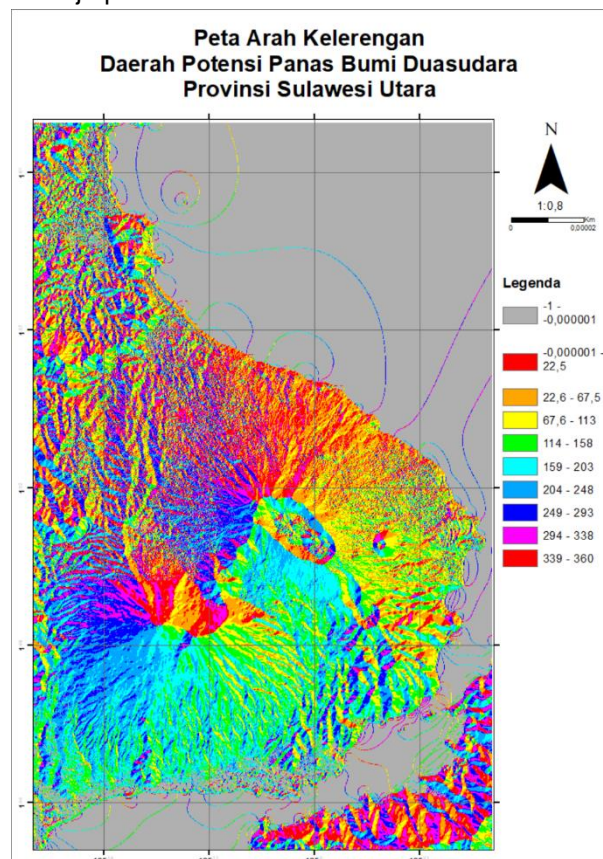


Gambar 3. Peta densitas kelurusan di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.



Gambar 4. Peta kelerengan di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.

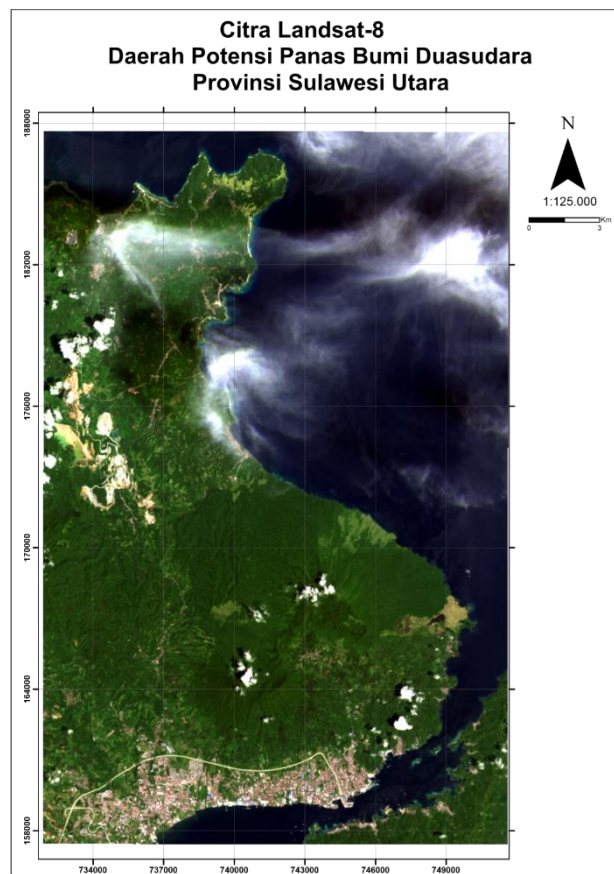
Lereng yang semakin curam semakin berpotensi menjadi daerah aliran air permukaan dan berkorelasi dengan keberadaan zona lemah karena aktivitas tektonisme berupa pensesaran, rekahan, maupun lipatan. Arah kelereng, dihubungkan dengan data sudut kelereng, juga menjadi tambahan informasi yang penting untuk mengetahui lokasi area tangkapan air secara lebih valid. Peta arah kelereng ditunjukkan oleh Gambar 5. Interpretasi dan informasi mengenai daerah tangkapan air menjadi penting untuk diketahui guna memahami arah aliran air permukaan dan siklus hidrologi yang berhubungan dengan keberlanjutan suatu sistem panas bumi. Lebih jauh lagi, penentuan lokasi sumur produksi, sumur injeksi, dan pembangunan fasilitas penanganan limbah suatu kegiatan perusahaan panas bumi memperhatikan dan mempertimbangkan dari arah aliran air permukaan dan siklus hidrologi ini. Daerah tangkapan air utama berada di lereng sebelah baratlaut dari Gunung Dua Sudara dan lereng sebelah baratlaut-utara-timurlaut dari Gunung Batu Angus. Daerah tangkapan air dihubungkan daerah dengan densitas kelurusan yang tinggi merupakan daerah yang berpotensi menjadi daerah imbuhan air bagi sistem panas bumi. Daerah imbuhan air di daerah potensi panas bumi Dua Sudara terletak sesuai dengan daerah tangkapan air, tetapi dengan luasan yang lebih kecil. Aliran air permukaan diinterpretasikan mengalir ke baratlaut-utara, terkumpul di area tangkapan air, dan terinfiltrasi di daerah imbuhan air. Interpretasi ini diperkuat dengan keberadaan mata air panas di sebelah baratdaya dari Gunung Dua Sudara, Gunung Tangkoko, dan Gunung Batu Angus. Disamping itu, sebaran lokasi mata air panas yang relatif baratlaut-tenggara menjadi salah satu bukti penguat adanya kemungkinan keberadaan sesar dengan orientasi yang sama yang bertindak sebagai jalur utama infiltrasi air permukaan menuju bawah permukaan dan jalur sirkulasi fluida hidrotermal menuju permukaan bumi.



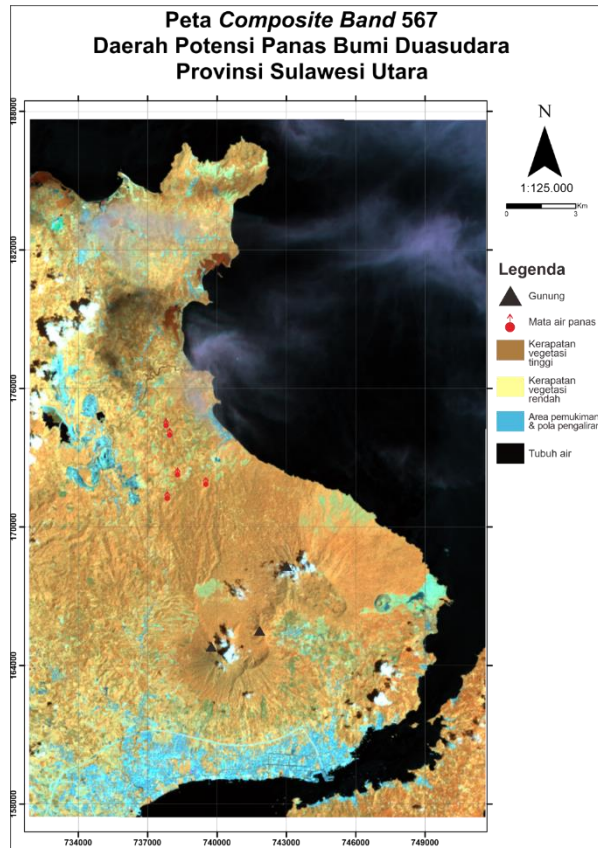
Gambar 5. Peta arah kelereng di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.

Analisis citra Landsat-8 pada penelitian ini menggunakan empat kombinasi band RGB citra Landsat-8 yaitu *natural color*, *false color*, *vegetation*, dan *atmospheric penetration*. Pada citra *natural color*, saluran warna merah ditempatkan pada *band 4*, saluran warna hijau di *band 3*, dan saluran warna biru ditempatkan di *band 2*. Citra *natural color* menunjukkan warna sebenarnya di permukaan bumi dari citra satelit (lihat Gambar 6). Pada citra *false color*, saluran warna merah ditempatkan di *band 5*, saluran warna hijau di *band 6*, dan saluran warna biru ditempatkan di *band 7*. Citra *false color* menunjukkan warna yang tidak sebenarnya di permukaan bumi dari citra satelit (lihat Gambar 7). Kombinasi band RGB di citra *false color*

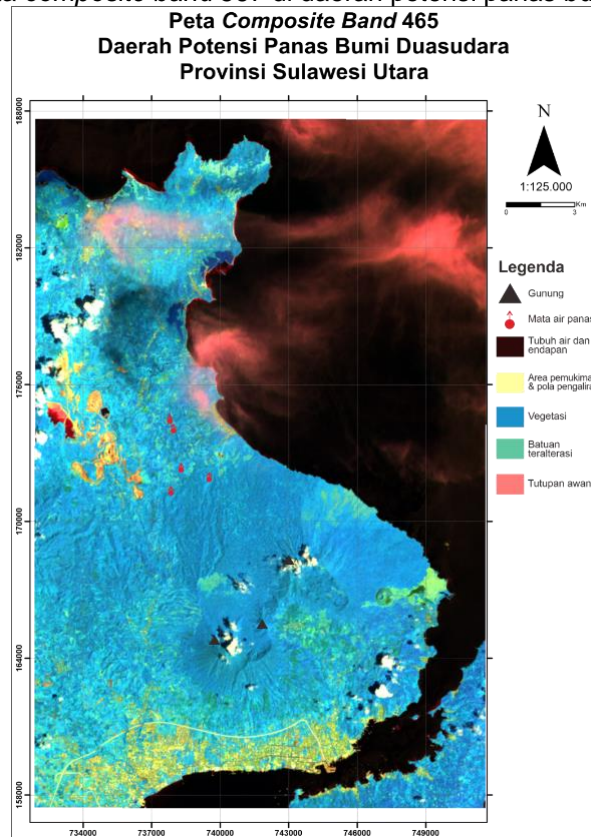
ini memudahkan untuk melakukan interpretasi kondisi geologi permukaan dibandingkan citra *natural color*. Daerah dengan vegetasi yang tidak rapat ditunjukkan warna kuning dan berangsur berubah menjadi coklat pada daerah dengan kerapatan vegetasi yang tinggi. Area pemukiman dan pola aliran air di permukaan ditunjukkan oleh warna biru muda dan tubuh air di permukaan bumi ditunjukkan oleh warna hitam. Analisis citra Landsat-8 untuk mengetahui persebaran batuan teralterasi di permukaan bumi menggunakan citra dari kombinasi *band 4* untuk saluran warna merah, *band 6* untuk saluran hijau, dan *band 5* untuk saluran warna biru (lihat Gambar 8). Daerah dengan vegetasi yang rapat ditunjukkan oleh warna biru tua dan berangsur menjadi warna biru yang lebih muda pada daerah dengan vegetasi yang tidak rapat. Tubuh air di permukaan bumi ditunjukkan oleh warna merah tua kehitaman, sedangkan area pemukiman dan pola aliran air di permukaan ditunjukkan oleh warna kuning. Sebaran batuan teralterasi di permukaan ditunjukkan oleh warna hijau muda kebiruan. Titik manifestasi panas bumi berupa mata air panas berkorelasi dengan keberadaan kenampakan batuan teralterasi di permukaan bumi seperti yang diidentifikasi dari citra Landsat-8 tersebut. Daerah di sebelah baratbaratlaut yang ditunjukkan dengan warna kuning tua merupakan daerah eksplorasi dan eksploitasi emas Toka Tindung (lihat Gambar 8). Tutupan awan yang terekam oleh citra Landsat-8 ditunjukkan oleh warna merah muda.



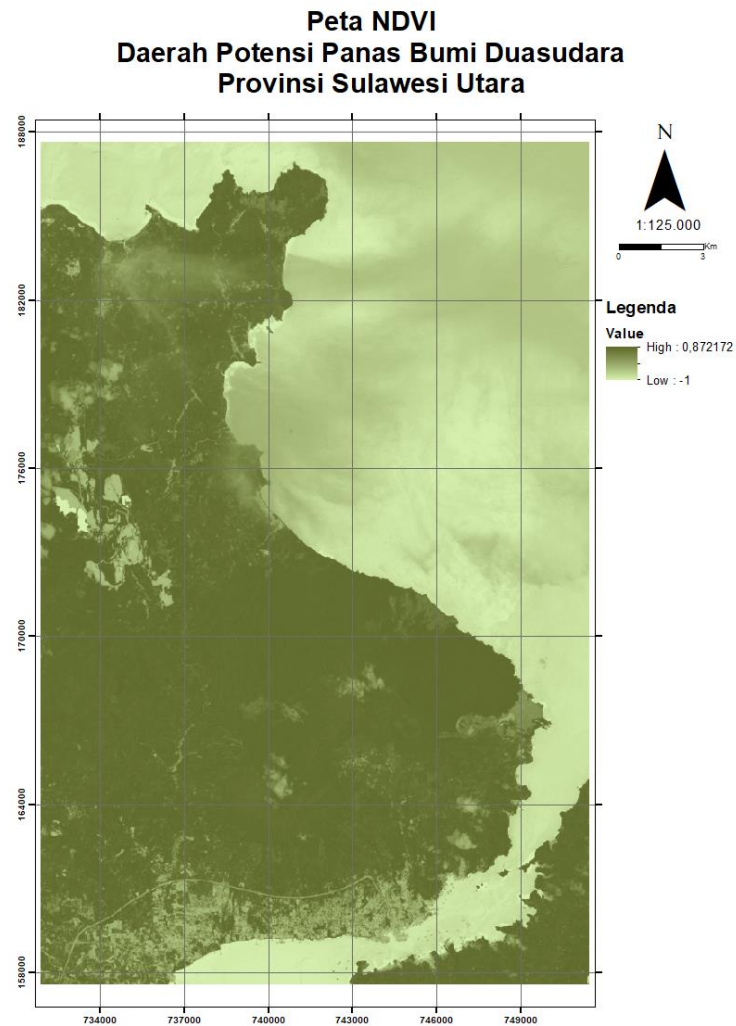
Gambar 6. Cintra Landsat-8 *natural color* di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.



Gambar 7. Peta composite band 567 di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.



Gambar 8. Peta composite band 465 di daerah potensi panas bumi Dua Sudara.



Nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggambarkan seberapa rapat kondisi vegetasi suatu daerah (Azhari dkk., 2016). Nilai NDVI berkisar dari 0,872 hingga -1. Pada peta NDVI, daerah yang ditunjukkan oleh warna hijau gelap menunjukkan nilai NDVI yang lebih tinggi, sedangkan daerah dengan warna hijau yang lebih muda menunjukkan nilai NDVI yang lebih rendah (lihat Gambar 9). Daerah yang memiliki nilai NDVI tinggi mencerminkan vegetasi yang lebih rapat karena bagian permukaan vegetasi merefleksikan radiasi lebih banyak pada spektrum gelombang inframerah dibandingkan pada spektrum cahaya kasatmata. Daerah dengan nilai NDVI yang lebih rendah menunjukkan kerapatan vegetasi lebih rendah dan/atau adanya keberadaan tubuh air dan tutupan awan. Kekurangan dari analisis NDVI adalah tidak bisa dijadikan satu-satunya acuan untuk membedakan daerah dengan vegetasi rapat atau tanpa vegetasi karena tidak adanya nilai ambang NDVI yang konsisten karena selalu berubah menurut musim (Winanti dkk., 2020). Daerah yang memiliki tutupan vegetasi yang lebih rapat umumnya berada pada elevasi daerah yang tinggi.

4. Kesimpulan

Penerapan metode analisis FFD pada hasil interpretasi kelurusan lembah dan/atau struktur geologi dari citra DEMNAS dapat digunakan untuk menentukan indikasi zona outflow sistem panas bumi. Integrasi pengolahan composite band dan anomali LST dari citra Landsat-8, serta interpretasi kenampakan sirkular sebagai cerminan kenampakan kaldera dari citra DEMNAS dapat digunakan untuk menentukan indikasi sumber panas dari sistem panas bumi di daerah penelitian yang berada di Gunung Dua Sudara dan

Gunung Batu Angus. Hasil analisis dan interpretasi citra DEMNAS dan Landsat-8 ini dapat menjadi alternatif untuk menentukan lokasi potensi panas bumi sebelum melakukan observasi lapangan.

Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan dengan melakukan analisis LST yang belum sempat dikerjakan pada penelitian ini, mengolah citra satelit lain dengan resolusi yang lebih baik, dan melakukan kegiatan pengecekan lapangan, serta survei geologi yang terkonsentrasi khususnya pada daerah di sebelah barat laut dari Gunung Dua Sudara dan Gunung Batu Angus untuk membuktikan adanya potensi panas bumi di daerah Bitung ini.

Daftar Pustaka (Format APA)

- Adi, A., Haryanto, A.D., Hutabarat, J., Gentana, D. (2021). Analisis Penginderaan Jauh dan Pemodelan 3D Fault Fracture Density (FFD) dalam Penentuan Zona Permeabilitas Permukaan di Wilayah Gunung Tampomas, Jawa Barat. *Bulletin Sumber Daya Geologi Vol. 16 No. 2, hal 99-118*
- Darmawan, I.G.B., Fahlevi, D.I., Yassar, M.F., Pramudya, F.A. (2021). Identifikasi Zona Reservoir Panas Bumi Berdasarkan Analisis Fault Fracture Density Citra Digital Elevation Model ALOS Palsar di Gunung Rajabasa. *Bulletin Sumber Daya Geologi Vol. 16 No. 2, hal 119-131*
- EBTKE. 2017. *Buku Potensi Panas Bumi Jilid 2*. Direktorat Panas Bumi, Dirjen EBTKE, hal 245-249
- Kamran, K.V., Pirnazar, M., Bansouleh V.F. (2015). Land Surface Temperature Retrieval from Landsat-8 TIRS – Comparison between Split Window Algorithm and SEBAL Method. *Proceedings SPIE – The International Society for Optical Engineering 2015*.
- Nugraha, H.S., Permana, L.A., Sukaesih. (2021). Analisis Citra Satelit Landsat 8 dan DEMNAS untuk Identifikasi Prospek Panas Bumi di Kabupaten Aceh Tengah, Provinsi Aceh. *Bulletin Sumber Daya Geologi Vol. 16 No. 3, hal 166-184*
- Nugroho, U.C., Susanto. (2015). Ekstraksi Kelurusan (Lineament) Secara Otomatis Menggunakan Data DEM SRTM: Studi Kasus Pulau Bangka. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX 2015, hal 775-780*.
- Ramadhan, R.D.S., Kurniawan, O., Wargaliyasa, G. (2017). Fault Fracture Density Analysis for Non-Volcanic Geothermal Potential to Determine Recharge Area: A Case Study in Lore Lindu, Central Sulawesi. *ITB International Geothermal Workshop*, Bandung: Indonesia
- Siombone, S.H. (2022). Analisis Suhu Permukaan dan Kondisi Geomorfologi Kawasan Geothermal Tehoru Menggunakan Landsat-8 dan DEM. *Jurnal Geofisika Eksplorasi Vol. 8, No. 3, hal 210-224*
- Soengkono, S., (1999). *Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assessment of Geothermal System*. Geothermal Institute, University of Auckland.
- Utami, P., Widarto, D.S., Atmojo, J.P., Kamah, Y., Browne, P.R.L., Warmada, I.W. (2015). Hydrothermal Alteration and Evolution of The Lahendong Geothermal System, North Sulawesi. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- Van Zuidam, R.A., (1999). *Guide to Geomorphologic Aerial Photography Interpretation and Mapping*. Enschede: Netherlands
- Winanti, S.S., Latuconsina, N., Herdani, A.N., Kumara, D.A. (2020). Application of Remote Sensing for Determination of Power Plant Area: Case Study of Lumut Balai, South Sumatera. *ITB International Geothermal Workshop*, Bandung: Indonesia
- Zarkasyi, A., Wahyuningsih, R. (2018). Pemodelan Reservoir Panas Bumi Daerah Dua Saudara, Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara dengan Menggunakan Inversi 2-D Data Magnetotelurik. *Bulletin Sumber Daya Geologi Vol. 13 No. 2, hal 118-127*