

TEKNIK PENDETEKSIAN ZONA MATA AIR PANAS GEOTERMAL MENGUNAKAN CITRA SATELIT MULTISENSOR DAN OBSERVASI LAPANGAN

LAZUARDY FAJAR PRATAMA S¹, ASEP SAEPULOH¹, LANO ADHITYA PERMANA²

¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung (ITB), Jl. Ganesha No.10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia. Email: lazuardy.fps@gmail.com

²Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, ESDM, Jl Soekarno-Hatta No.444, Bandung, Jawa Barat, Indonesia.

Sari – Kegiatan eksplorasi geotermal pada area yang sangat luas akan membutuhkan waktu dan tenaga yang sangat banyak. Salah satu teknik pemetaan yang dapat digunakan untuk meminimalkan waktu dan tenaga di lapangan, yaitu dengan mengoptimalkan penggunaan teknologi penginderaan jauh. Makalah ini bertujuan untuk memaparkan teknik pendeteksian zona-zona yang memiliki potensi keterdapatan mata air panas geotermal menggunakan data citra multisensor dari *Landsat-8 Advanced Land Imager* (OLI), *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) *Thermal Infrared Radiometer* (TIR), dan *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Sentinel-1. Data-data citra tersebut dilakukan preparasi dan digunakan sesuai kegunaannya masing-masing, lalu diverifikasi dengan data lapangan berupa temperatur mata air panas dan struktur geologi. Kecamatan Baolan dan Kecamatan Galang, Kabupaten Tolitoli, Provinsi Sulawesi Tengah dipilih sebagai daerah penelitian untuk mengetahui efektivitas citra multisensor dengan kondisi lapangan yang tertutup vegetasi dan minim akses. Sedangkan daerah penelitian geologi berada di dalamnya atau tepatnya berada di selatan Kota Tolitoli dengan luas area sekitar 50 km². Pemetaan temperatur permukaan dilakukan menggunakan citra ASTER TIR dengan menghitung *Land Surface Temperature* (LST) dan dikombinasikan dengan pemetaan kebasahan lahan menggunakan Landsat-8 OLI. Sedangkan citra Sentinel-1 dan citra SRTM digunakan untuk memetakan kelurusan struktur geologi di permukaan sebagai jalur fluida mengalir dari bawah permukaan ke permukaan. Pembuktian lapangan dengan pemetaan keberadaan lokasi mata air panas dilakukan untuk memverifikasi hasil yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam interpretasi keterdapatan sistem geotermal di bawah permukaan. Hasil dari kombinasi citra multisensor yang diverifikasi dengan temperatur mata air panas di lapangan menunjukkan efektifitas tinggi dalam mempersempit area pencarian manifestasi permukaan. Selain itu, kelurusan struktur geologi yang dipetakan berdasarkan citra Sentinel-1 berhasil mengidentifikasi sesar geser mengiri naik dan sesar normal mengiri. Hasil analisis citra multisensor yang diverifikasi di lapangan menunjukkan bahwa komponen geotermal yang terdapat di daerah penelitian berupa zona *discharge* yang ditandai dengan keberadaan mata air panas dan sesar mengiri yang berperan sebagai zona rekahan permeabel.

Kata kunci Tolitoli, temperatur permukaan, penginderaan jauh, Landsat-8 OLI, Sentinel-1, ASTER TIR.

Abstract - *Geothermal exploration activities in a very large area require a lot of time and manpower. A mapping technique can be used to minimize time and manpower at field by optimizing the use of remote sensing technology. This paper is aimed to identify the availability of geothermal hot springs zones using multisensory images from Landsat-8 Advanced Land Imager (OLI), Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Thermal Infrared Radiometer (TIR), and Synthetic Aperture Radar (SAR) of Sentinel-1. The imagery data were prepared and used according to their respective uses, and then they will be verified by field geological data including location of hot springs and geological structures. Baolan Subdistrict and Galang Subdistrict, Tolitoli District, Central Sulawesi Province was selected as study area to obtain the effectiveness of multisensory technique under thick vegetation cover and limited access. The geological mapping area was focused in the south of Tolitoli City with coverage area about 50 km². Surface thermal anomaly detection was performed using ASTER TIR by calculating the Land Surface Temperature (LST) and combined with wetness detection using Landsat-8 OLI. In addition, the Sentinel-1 images were used to detect lineament related to geological structures on the surface served as fluid path flows from sub-surface to surface. Ground truthing was performed by mapping hot springs at field and served as verification to the remote sensing results. Then, geological interpretation of geothermal system availability under the study area was performed. The multisensory image analyses verified by field mapping of the hot springs zone showed high effectivity to localize the possible area for surface manifestations. Meanwhile, the lineament related to geological structures based on Sentinel-1 image detected successfully a sinistral strike slip and sinistral normal faults. Accordingly, the geothermal manifestation in the study area was a discharge zone presented by the existence of hot springs and strike-slip faults acted as fractures permeability.*

Key words: Tolitoli, surface temperature, remote sensing, Landsat-8 OLI, Sentinel-1, ASTER TIR.

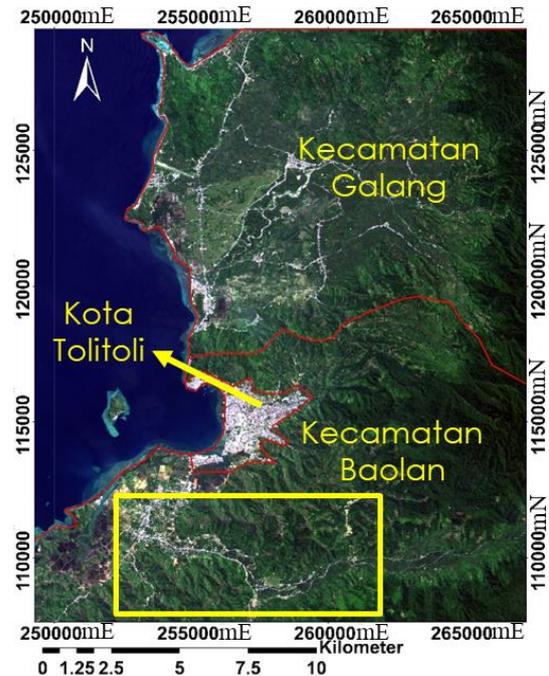
1. PENDAHULUAN

Badan Geologi (2018) menyebutkan bahwa hingga tahun 2018, Indonesia memiliki potensi energi geotermal sekitar 25 GWe, akan tetapi pemanfaatan untuk kebutuhan listrik baru mencapai 1948,5 MW. Pemerintah menargetkan bahwa pada tahun 2025, pengembangan pembangkit listrik yang berasal dari energi geotermal sekitar 7200 MW, seperti yang tertuang dalam Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional. Untuk dapat memenuhi target tersebut, dibutuhkan kegiatan-kegiatan eksplorasi sebagai usaha dalam menemukan sumber-sumber cadangan energi geotermal yang baru. Kegiatan eksplorasi khususnya pencarian data geologi untuk pemetaan manifestasi permukaan geotermal sering terkendala oleh medan yang sulit dan daerah kajian yang luas sehingga berimplikasi pada waktu yang lama dan jumlah tenaga yang dibutuhkan sangat banyak.

Penginderaan jauh atau *remote sensing* menjadi salah satu metode untuk mengatasi permasalahan di atas dengan memaksimalkan analisis mengenai kondisi lapangan yang akan diteliti sebelum dilakukan pengecekan dan observasi langsung di lapangan. Makalah ini bertujuan untuk mendemonstrasikan teknik dalam melakukan pendeteksian keterdapatn mata air panas di daerah penelitian berdasarkan citra multisensor dari Landsat-8 OLI (*Advanced Land Imager*), ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) TIR (*Thermal Infrared Radiometer*), SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 30 m dan Sentinel-1 yang digunakan untuk menentukan kebasahan lahan, temperatur permukaan, dan kelurusan struktur geologi (van der Meer dkk., 2014).

Daerah penelitian terbagi menjadi dua, yaitu daerah pemetaan geologi dan analisis penginderaan jauh. Daerah pemetaan geologi berada di Selatan Kota Tolitoli dan sekitarnya, sedangkan daerah penelitian *remote sensing* mencakup Kecamatan Galang dan Baolan (**Gambar 1**). Daerah ini dipilih sebagai target pemetaan karena memiliki tutupan vegetasi lebat, minim akses, dan terindikasi adanya

manifestasi geotermal sehingga bisa digunakan untuk mengetahui efektivitas citra multisensor.



Gambar 1. Daerah penelitian penginderaan jauh berada di Kabupaten Galang dan Baolan, dengan daerah pemetaan geologi dibatasi oleh kotak berwarna kuning di selatan Kota Tolitoli.

Secara fisiografi, daerah penelitian termasuk ke dalam Zona Gorontalo Lengan Utara Sulawesi (van Bemmelen, 1949). Zona ini memiliki arah fisiografi daratan barat-timur dan terletak di bagian tengah Lengan Utara Sulawesi (**Gambar 2**). Pada zona ini jarang ditemukan gunung api muda yang masih aktif.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Tolitoli, Sulawesi, Stratigrafi daerah penelitian terdiri dari lima satuan batuan yang tersingkap di permukaan dengan urutan dari tua ke muda batuan gunung api Tinombo yang menjari dengan Formasi Tinombo, batuan intrusif diorit dan granit, dan satuan termuda adalah satuan aluvium dan endapan pantai (Ratman, 1976).

Pulau Sulawesi memiliki kondisi geologi dan tektonik yang kompleks karena berada pada pertemuan tiga lempeng (*triple junction*) yaitu Lempeng Sangihe, Sulawesi, dan Sula (Hall dan Spakman, 2015). Berdasarkan sejarahnya, peristiwa tektonik yang memengaruhi batuan

di daerah penelitian berada pada tiga fase. Fase pertama berupa Tunjaman Paleogen yang mengakibatkan terbentuknya batuan beku intermediet dan terjadinya pengendapan batuan sedimen. Fase kedua berupa Tumbukan Neogen yang menyebabkan kemiringan lapisan batuan sedimen dengan pembentukan sesar naik dan sesar mendatar menganan. Fase ketiga berupa Ekstensi Miosen-Resen yang menyebabkan terbentuknya batuan beku granitoid, teraktifasinya sesar naik menjadi sesar normal, dan sesar mendatar-menganan menjadi sesar mengiri.



Gambar 2 Fisiografi Regional menunjukkan tujuh bagian fisiografi Pulau Sulawesi dan daerah penelitian berada pada fisiografi Lengan Utara Sulawesi (van Bemmelen, 1949).

2. PEMILIHAN DATA CITRA

Data citra satelit yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari citra sensor optis dan SAR (*Synthetic Aperture Radar*). Citra sensor optis berupa Landsat-8 OLI dan ASTER TIR, sedangkan citra sensor SAR berupa Sentinel-1 dan SRTM. Kriteria dalam pemilihan waktu akuisisi untuk data citra optis yaitu data terbaru dengan tutupan awan kurang dari 10%. Sedangkan untuk citra SAR Sentinel-1 selain data terbaru, juga cakupan diakuisisi dari dua orbit dengan arah melihat (*Line of Sight*) ke timur dengan orbit naik (*ascending*) dan ke barat dengan orbit turun (*descending*).

Data citra optis yang digunakan berasal dari sembilan waktu akuisisi terdiri dari 5 data Landsat dan 4 data ASTER untuk mendapatkan nilai rerata nilai piksel sehingga efek gangguan temporal dari lingkungan seperti cuaca dan aktivitas manusia bisa dikurangi. Citra Landsat-8 OLI yang digunakan pada tanggal akuisisi 6 Juli 2015, 24 September 2015, 10 Oktober 2015, 9 Agustus 2016, dan 31 Agustus 2018. Sedangkan citra ASTER 7 Juli 2001, 4 November 2004, 9 Juni 2014, dan 30 Juli 2015. Untuk citra SAR Sentinel-1A dengan orbit *descending* diakuisisi pada tanggal 3 Maret 2018 dan citra Sentinel-1B dengan orbit *ascending* diakuisisi pada tanggal 15 Maret 2018. Sedangkan, citra SRTM yang digunakan diakuisisi pada tanggal 11 Februari 2000. Semua data citra diunduh dari laman <https://earthexplorer.usgs.gov/> dengan detail ditunjukkan dalam Tabel 1 (USGS, 2015a; 2015b; 2015c; dan 2015d). Dalam analisis keterdapatan sistem geotermal, digunakan juga data primer berupa data litologi, struktur geologi, dan temperatur mata air panas yang diobservasi di lapangan. Data geologi lapangan ini juga digunakan untuk memverifikasi analisis citra satelit yang dilakukan.

Tabel 1. Data citra sensor optis dan SAR yang digunakan dalam pendeteksian zona mata air panas.

SATELIT	Sensor	Subsistem	Jumlah Kanal	Panjang Gelombang (µm)	Resolusi Spasial (m)
SRTM	Radar	-	1	5.6×10^4	30
SENTINEL 1	Radar	-	1	5.6×10^4	5-20
LANDSAT 8	Optis	Visible	4	0,43 - 0,67	30
		NIR	1	0,85 - 0,88	30
		SWIR	2	1,56 - 1,65 dan 2,1-2,29	30
		TIR	2	10,6 - 12,51	100
TERRA: ASTER	Optis	VNIR	4	0,52 - 0,86	15
		SWIR	5	1,6 - 2,43	30
		TIR	5	8,12 - 11,65	90

3. KOREKSI DAN PENGHITUNGAN TEMPERATUR PERMUKAAN

Pemrosesan citra yang dilakukan pada penelitian ini diawali dengan koreksi dan kalibrasi citra. Untuk citra dari sensor optis, dilakukan koreksi atmosfer dengan metode

FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) dari program ENVItm 5.4. Metode FLAASH mampu mengoreksi kontribusi partikel di atmosfer seperti uap air, aerosol, dan kabut tipis menggunakan kode transfer radiasi dari MODTRAN4 (Berk dkk., 1989). Koreksi radiometrik dilakukan untuk mengoreksi data citra optis dari distorsi radiometrik sehingga nilai-nilai piksel mewakili nilai *radiance* sensor dari pantulan permukaan. Koreksi atmosfer sebagai bagian dari koreksi radiometrik untuk menghilangkan efek atmosfer pada citra optis akibat interaksi gelombang elektromagnetik dengan partikel di atmosfer. Koreksi atmosfer FLAASH dilakukan untuk semua citra dari sensor optis secara temporal yang diikuti oleh koreksi geometrik. Koreksi geometrik dilakukan untuk menyamakan lokasi pada citra dengan lokasi yang sebenarnya di lapangan dengan menentukan GCPs (*Ground Control Points*). RMSE (*Root Mean Square Error*) dari proses koreksi geometrik dilakukan dengan kriteria nilai kurang dari 1 piksel. RMSE dari masing-masing citra yaitu 0,9 pada citra ASTER, 0,01 pada citra Landsat 8, 0,9 pada citra Sentinel-1A dan 0,9 pada citra Sentinel-1B. Pada data citra SAR Sentinel-1 hanya dilakukan koreksi geometrik karena sensitivitas saluran C yang minimal terhadap hamburan dari partikel di atmosfer. Setelah koreksi dan kalibrasi dilakukan, citra digunakan berdasarkan keperluannya masing-masing. Citra Landsat-8 OLI digunakan untuk mendeteksi kebasahan lahan dengan persamaan NDWI (*Normalized Difference Water Index*) yang ditulis sebagai berikut:

$$NDWI = \frac{(Green-NIR)}{(Green+NIR)} \quad (1)$$

dimana *Green* adalah saluran hijau (*band 3*) dan *NIR* adalah *near infrared* (*band 5*) untuk Landsat-8 OLI. NDWI cukup efektif untuk mengestimasi nilai kebasahan permukaan (McFeeters, 1996).

Data citra ASTER TIR digunakan untuk menghitung *Land Surface Temperature* (LST). tahapan yang dilakukan yaitu penghitungan *brightness temperature* menggunakan

persamaan Kealy dan Hook (1993) sebagai berikut:

$$T_R = \frac{C_2}{\lambda_R \ln \left[\left(\frac{\epsilon_R C_1}{L_R \lambda_R^5 \pi} \right) + 1 \right]} \quad (2)$$

dimana

- T_R = Temperatur pada saluran R (K)
- λ_R = Panjang gelombang saluran R (m)
- L_R = Radian saluran R (Wm^{-3})
- C_1 = Konstanta radiasi 1 ($=3.74 Wm^2$)
- C_2 = Konstanta radiasi 2 ($= 0.01 mK$)
- ϵ_R = Emisivitas saluran R

Normalisasi terhadap ketinggian dilakukan untuk meminimalkan efek elevasi, dengan menggunakan persamaan Malbêteau dkk. (2017) sebagai berikut:

$$T_{NK} = T_R + (m \times H) \quad (3)$$

T_{NK} = Temperatur setelah koreksi ketinggian topografi

m = Gradien temperatur terhadap ketinggian

H = Ketinggian pada piksel xy

Tahapan selanjutnya yaitu koreksi temperatur permukaan menggunakan data kebasahan lahan (NDWI) dari citra Landsat-8 OLI dan LST ASTER TIR. Teknik koreksi kebasahan dilakukan dengan menggunakan operasi aritmatika seperti penjumlahan, pengurangan, perkalian, dan pembagian pada nilai setiap pikselnya sampai menghasilkan korelasi antara temperatur mata air panas dengan nilai piksel pada citranya paling tinggi. Nilai piksel yang terdapat mata air panas ditargetkan berada pada anomali positif (tinggi).

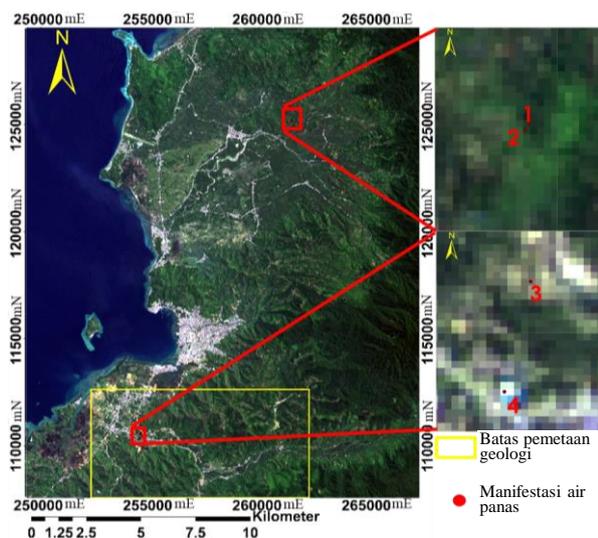
Citra Sentinel-1 digunakan sebagai dasar penarikan kelurusan yang diduga berkaitan dengan struktur geologi yang diperkirakan sebagai jalur permeabilitas fluida naik ke permukaan. Penarikan kelurusan visual dilakukan dengan cara digitasi kelurusan pada citra Sentinel-1.

Tahapan terakhir yaitu proses verifikasi dan pengambilan data di lapangan. Verifikasi dilakukan dengan mengorelasikan temperatur mata air panas di lapangan dengan temperatur

di piksel yang koordinatnya sesuai dengan lokasi mata air panas di lapangan. Lalu dibuat persamaan dari hasil citra satelit dengan di lapangan, kemudian dihasilkan algoritma baru dan diaplikasikan ke seluruh piksel di lokasi kajian.

4. OBSERVASI LAPANGAN

Pengamatan lapangan dilakukan pada tanggal 28 April s.d. 11 Mei 2018. Objek utama pada observasi lapangan yaitu manifestasi geotermal berupa mata air panas, batas litologi, dan struktur geologi. Hasil observasi menunjukkan terdapat empat lokasi mata air panas, yaitu dua di Buntuna dan dua di Tinigi (**Gambar 3**). Mata air panas di daerah Tinigi yang ditandai dengan nomor 1 dan 2 merupakan mata air panas yang keluar dari rekahan batuan granitoid di daerah tersebut. Sedangkan, mata air panas di daerah Buntuna yang ditandai dengan nomor 3 merupakan mata air panas yang keluar pada daerah aluvial di sekitar sungai Buntuna. Mata air panas yang sudah menjadi kolam pemandian ditandai dengan nomor 4 (**Gambar 4**). Temperatur mata air hasil pengukuran lapangan ditunjukkan dalam **Tabel 2**. Pengukuran temperatur mata air panas dilakukan menggunakan termometer digital.



Gambar 3 Lokasi mata air panas di lapangan terdapat di daerah Tinigi (nomor 1 dan 2) dan Buntuna (nomor 3 dan 4).

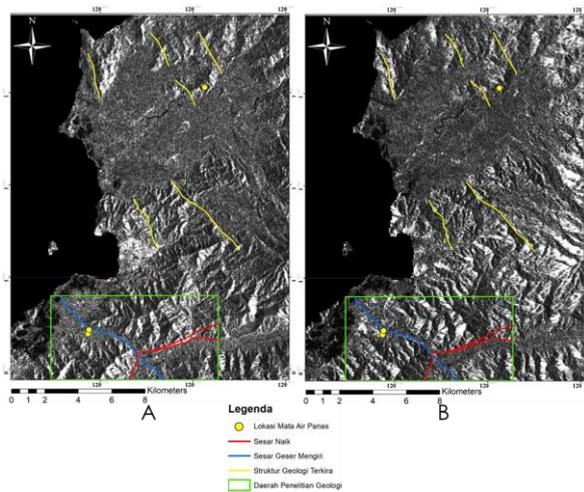


Gambar 4 Kenampakan mata air panas di lapangan untuk lokasi 1, 2, 3, dan kenampakan mata air panas Buntuna lokasi 4 (Google Earth, 2019).

Tabel 2. Temperatur mata air panas di daerah Tolitoli.

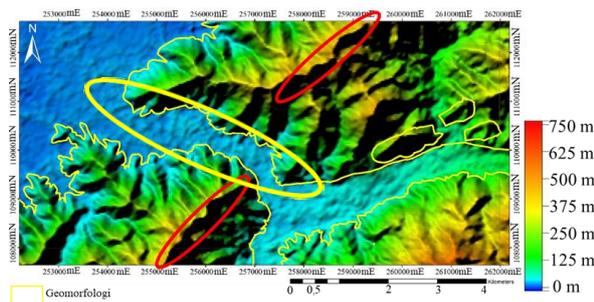
No.	Mata Air Panas	Temperatur (°C)
1	Tinigi 1	41,38
2	Tinigi 2	39,98
3	Buntuna 3	30,22
4	Buntuna 4	38,73

Struktur geologi dapat dideteksi menggunakan citra Sentinel-1 (**Gambar 5**). Pendeteksian dan interpretasi struktur geologi dilakukan dengan cara penarikan kelurusan yang berhubungan dengan struktur geologi lalu dibuat kemenerusannya secara visual. Untuk struktur geologi yang terletak di daerah Buntuna diverifikasi dengan data lapangan karena berada pada daerah penelitian geologi. Struktur geologi yang terdeteksi menggunakan citra satelit dan observasi lapangan berupa sesar normal mengiri dan sesar mengiri naik.



Gambar 5 Kelurusan struktur geologi daerah penelitian dengan Sentinel-1A orbit *descending* 3 Maret 2018 (A) dan Sentinel-1B orbit *ascending* 15 Maret 2018 (B).

Sesar mengiri naik yang terdeteksi dari kelurusan pada citra Sentinel-1 dan diobservasi dari peta berbayang DEM SRTM berupa pergeseran punggungan yang terpotong oleh lembahan (**Gambar 6**). Sedangkan sesar normal mengiri memiliki bukti di lapangan berupa bidang sesar yang membatasi litologi granodiorit pada *hanging wall* dan Batupasir-batulempung pada *footwall* (**Gambar 7**).



Gambar 6 Pergeseran pada satuan punggungan *hogback* (oval merah) mengiri dan terdapat lembahan (oval kuning) yang memisahkan punggungan di daerah penelitian pada citra berbayang DEM SRTM 30 m.

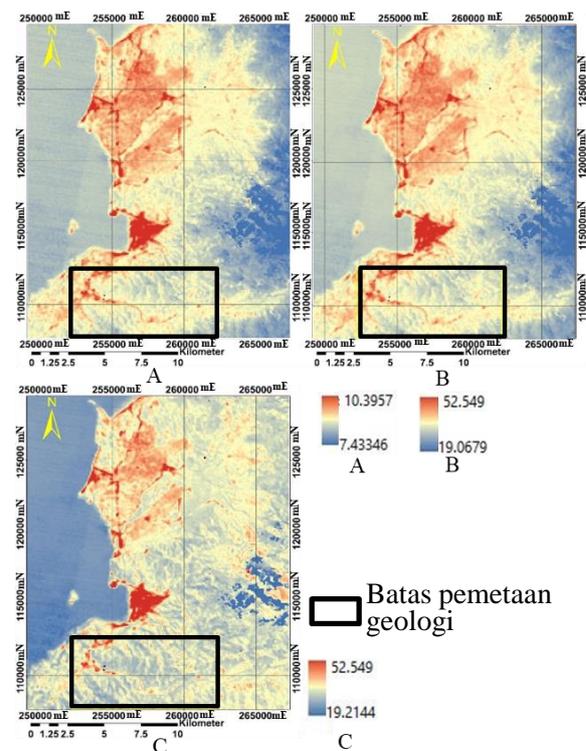


Gambar 7 Foto singkapan sesar normal mengiri menunjukkan bidang sesar yang membatasi litologi granit (*hanging wall*) dan batupasir-batulempung (*footwall*).

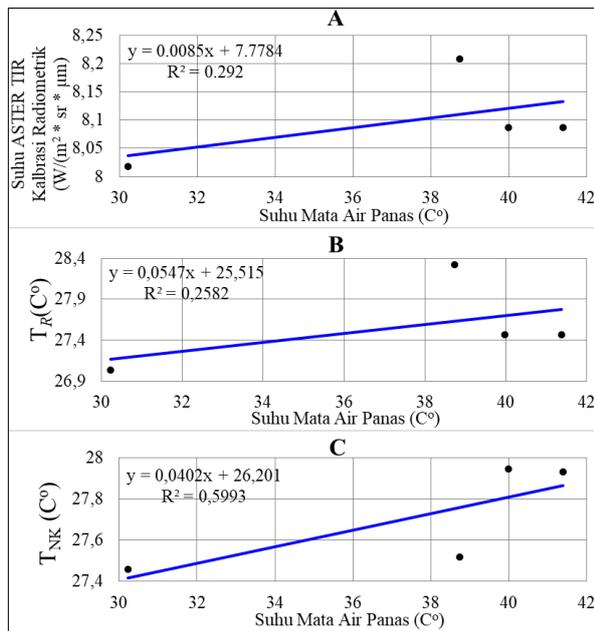
5. ANALISIS PENDETEKSIAN ANOMALI PANAS PERMUKAAN

Untuk membuat model temperatur permukaan dari citra, analisis korelasi dilakukan antara temperatur mata air panas di lapangan dengan temperatur yang terdeteksi menggunakan citra satelit ASTER TIR. Korelasi pertama dilakukan antara untuk temperatur mata air panas di lapangan dengan temperatur kecerahan ASTER TIR sebelum dan sesudah koreksi terhadap ketinggian topografi (**Gambar 8**). Kemudian parameter kebasahan lahan dari citra Landsat-8 OLI dijadikan sebagai faktor koreksi untuk mendapatkan nilai korelasi yang lebih tinggi. Setelah itu dilihat korelasi antara citra tersebut dengan temperatur mata air panas di lapangan.

Hasil korelasi antara temperatur mata air panas di lapangan dengan citra setelah koreksi ketinggian topografi memiliki korelasi yang lebih tinggi ($=0,6$) dibandingkan dengan citra yang hanya dikalibrasi radiometrik ($=0,3$) maupun konversi kecerahan temperatur ($=0,3$) (**Gambar 9**).



Gambar 8 ASTER TIR setelah dilakukan kalibrasi radiometrik (A), nilai kecerahan temperatur (B), dan koreksi ketinggian topografi (C).



Gambar 9 Grafik korelasi antara temperatur mata air panas dengan citra ASTER TIR setelah kalibrasi radiometrik (A), nilai kecerahan temperatur atau T_R (B), dan koreksi ketinggian topografi T_{NK} (C).

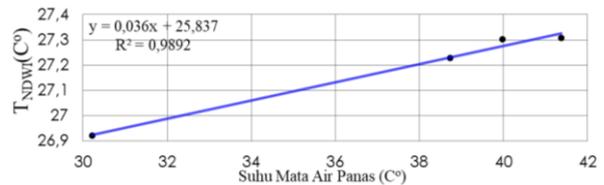
Karena koefisien determinasi R^2 yang didapat masih sedang ($=0,6$), sehingga model temperatur permukaan masih perlu ditingkatkan menggunakan parameter kebasahan lahan atau NDWI (*Normalized Different Wet Index*) dari citra Landsat-8 OLI.

Dari percobaan kombinasi penambahan parameter NDWI, didapat persamaan yang menghasilkan korelasi tinggi sebagai berikut:

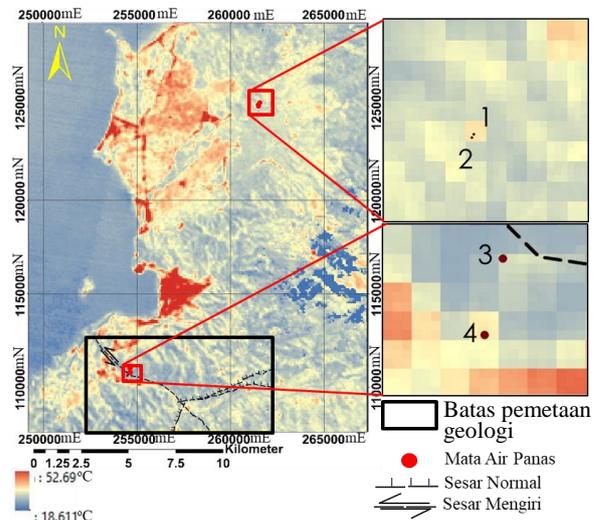
$$T_{NDWI} = (NDWI \times 1.6) + T_{NK} \quad (4)$$

dimana T_{NDWI} adalah temperatur permukaan setelah dikoreksi NDWI.

Korelasi temperatur mata air panas di lapangan memiliki koefisien determinasi yang sangat tinggi ($R^2=0,9$) terhadap temperatur anomali panas permukaan citra T_{NDWI} (Gambar 10). Berdasarkan nilai R^2 yang tinggi, maka Citra T_{NDWI} dijadikan sebagai basis analisis anomali temperatur permukaan (Gambar 11).



Gambar 10 Korelasi antara anomali panas permukaan terkoreksi kebasahan permukaan atau T_{NDWI} dengan temperatur mata air panas hasil pengukuran di lapangan.



Gambar 11 Peta T_{NDWI} menunjukkan anomali temperatur permukaan setelah dilakukan koreksi radiometrik, kecerahan temperatur, elevasi topografi, dan kebasahan permukaan.

6. DISKUSI

Hasil dari pemrosesan citra satelit ASTER TIR dan observasi lapangan menunjukkan kesesuaian antara lokasi mata air panas dengan T_{NDWI} (Gambar 11). Pada gambar tersebut terlihat mata air panas Tinigi 1, Tinigi 2, dan Buntuna 4, terdapat pada piksel berwarna kemerahan atau anomali temperatur tinggi. Sedangkan mata air panas Buntuna 3 berada pada piksel berwarna kuning terang atau pada temperatur yang sedang. Hal ini diketahui karena mata air panas Buntuna 3 memiliki temperatur yang paling rendah sekitar 30°C dengan luas sekitar $1,6 \text{ m}^2$. Dimensi yang lebih rendah dari resolusi citra ini menjadikannya sulit dideteksi oleh citra ASTER TIR dan Landsat-8 OLI yang memiliki resolusi spasial 90 dan 30 m. Keberadaan mata air panas yang mengalir ke permukaan diduga karena terletak relatif dekat dengan sesar geser mengiri naik yang terdeteksi dengan citra Sentinel-1, peta berbayang SRTM dan observasi di lapangan.

Sesar ini diduga berperan sebagai jalur fluida hidrotermal karena memiliki permeabilitas batuan yang tinggi. Hal tersebut didukung pula oleh **Gambar 11** yang menunjukkan peta T_{ndwi} ditumpangtindihkan dengan struktur geologi berupa sesar.

7. KESIMPULAN

Integrasi citra optis dan SAR cukup efektif digunakan sebagai teknik dalam mendeteksi zona mata air panas. Citra Landsat-8 OLI, ASTER TIR, Sentinel-1, dan DEM SRTM 30 m yang digunakan untuk mendeteksi kebasahan lahan, temperatur permukaan, dan struktur geologi cukup efektif untuk membantu dalam eksplorasi pencarian mata air panas di daerah bervegetasi seperti Tolitoli. Terdapat empat mata air panas di daerah penelitian yang terbagi ke dalam dua wilayah yaitu Tinigi dan Buntuna. Terdapat dua struktur geologi utama yang dapat dideteksi dengan citra Sentinel-1 dengan bantuan citra DEM SRTM 30 m yaitu sesar geser mengiri naik dan sesar normal mengiri. Untuk mata air Tinigi 1, Tinigi 2, dan Buntuna 4 terdapat pada citra anomali tinggi temperatur permukaan terkoreksi kebasahan permukaan (T_{NDWI}), sedangkan mata air panas Buntuna 3 tidak berada pada daerah anomali temperatur tinggi, hal ini dikarenakan mata air panas di daerah ini memiliki temperatur yang rendah dengan dimensi yang lebih kecil dari pada resolusi citra.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Geologi, 2018, Peta Distribusi dan Sumber Daya Panas Bumi Indonesia Status Desember 2018, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Berk A., Bernstein, L. S., dan Robertson, D. C., 1989, MODTRAN: a moderate resolution model for LOWTRAN7, GL-TR-89-0122, Air Force Geophysical Laboratory, Hanscom AFB, MA.
- van Bemmelen, R. W., 1949, *The Geology of Indonesia, vol. IA*, Government Printing Office, The Hague, p. 732.
- Google, 2019, Google Earth:, <https://earth.google.com> Diunduh pada tanggal 10 Maret 2018.
- Hall, R. dan Spakman W., 2015, Mantle structure and tectonic history of SE Asia, *Tectonophysics*, 658, 14-45.
- Kealy P.S. dan Hook S.J., 1993, Separating Temperature and Emissivity in Thermal Infrared Multispectral Scanner Data: Implication for Recovering LandSurface Temperature, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 31(6), 1154-1164.
- Malbêteau Y., Merlin O., Gascoïn J.P., Mattar C., Olivera-Guerra L., Khabba S., dan Jarlan L., 2017, Normalizing land surface temperature data for elevation and illumination effects in mountainous areas: A case study using ASTER data over a steep-sided valley in Morocco, *Remote Sensing of Environment*, 185, 25-39.
- van der Meer, F., Heckera, C., van Ruitenbeeka, F., van der Werffa, H., de Wijkersloothb, C., dan Wechslerb., C., 2014, Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 255-269
- Mcfeters, S.K., 1996, The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Ratman, N., 1976, *Peta Geologi Lembar Tolitoli, Sulawesi Utara, skala 1:250.000*, Bandung: Direktorat Geologi.
- Richter, A., 2018, Indonesia reaches 1,925 MW installed geothermal power generation capacity, <http://www.thinkgeoenergy.com/indonesia-reaches-1925-mw-installed-geothermal-power-generation-capacity/> Diunduh 10 Oktober 2018.
- USGS. 2015a. Citra SRTM daerah Tolitoli, citra diunduh dari <http://earthexplorer.usgs.gov>. Diunduh pada tanggal 10 Maret 2018.
- USGS. 2015b. Citra Landsat 8 OLI daerah Tolitoli, citra diunduh dari <http://earthexplorer.usgs.gov>. Diunduh pada tanggal 10 Maret 2018.
- USGS. 2015c. Citra ASTER TIR daerah

Tolitoli, citra diunduh dari <http://earthexplorer.usgs.gov>. Diunduh pada tanggal 11 Maret 2018.

USGS. 2015c. Citra SRTM daerah Tolitoli, citra diunduh dari <http://earthexplorer.usgs.gov>. Diunduh pada tanggal 11 Maret 2018.