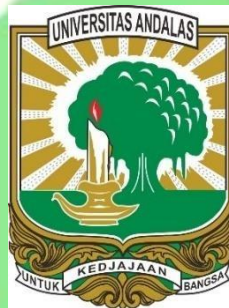


**INTEGRASI DATA GRAVITASI SATELIT GGMPLUS DAN
CITRA LANDSAT 9 BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI
ZONA PROSPEK PANAS BUMI DI KAWASAN GUNUNG
TALANG**

SKRIPSI



**Diajukan Oleh :
GUSTI FIONA
2110445001**

Dosen Pembimbing:

Ardian Putra S.Si, M.Si, dan Rudi Cahyadi S.Si, M.T

DEPARTEMEN FISIKA

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN
ALAM UNIVERSITAS ANDALAS**

PADANG

2026

**INTEGRASI PARAMETER GGMPLUS, LANDSAT 9, DAN DEM SRTM
BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI PROSPEK PANAS BUMI DI
KAWASAN GUNUNG TALANG**

SKRIPSI

**Karya tulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
dari Universitas Andalas**



Gusti Fiona

2110445001

DEPARTEMEN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS ANDALAS

PADANG

2026

PERNYATAAN KEASLIAN NASKAH

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Gusti Fiona

NIM : 2110445001

Departemen/Program Studi : Fisika/ S1

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dengan ini menyatakan bahwa naskah SKRIPSI yang berjudul “INTEGRASI PARAMETER GGMPLUS, LANDSAT 9, DAN DEM SRTM BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI PROSPEK PANAS BUMI DI KAWASAN GUNUNG TALANG” merupakan hasil pemikiran dan karya saya sendiri, bebas dari plagiat terhadap karya orang lain. Apabila dikemudian hari terbukti bahwa dalam naskah ini terkandung plagiat dan bentuk – bentuk peniruan lainnya yang dianggap melanggar peraturan, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya untuk dipergunakan sebagaimana mestinya.

Padang, 04 Agustus 2026

Gusti Fiona

SKRIPSI

**INTEGRASI PARAMETER GGMPLUS, LANDSAT 9, DAN DEM SRTM
BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI PROSPEK PANAS BUMI DI
KAWASAN GUNUNG TALANG**

disusun oleh:

Gusti Fiona

2110445001

**Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 26 Agustus 2026**

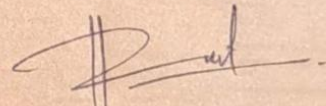
Tim Penguji

Pembimbing Utama



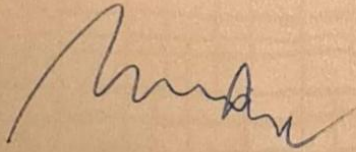
Ardian Putra S.Si, M.Si
NIP.198304222005011002

Pembimbing Pendamping



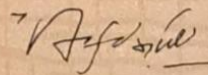
Rudi Cahyadi S.Si, M.T
NIP. 110199306202405101

Penguji I



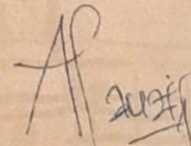
Dr. Elvaswer, M.Sc.

Penguji II



Afdal, M.Si

Penguji III



Ahmad Fauzi Pohan,
M.Sc

NIP.197005121998021001 NIP.197601062000031001 NIP.199001122019031011

INTEGRASI PARAMETER GGMPLUS, LANDSAT 9, DAN DEM SRTM BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI PROSPEK PANAS BUMI DI KAWASAN GUNUNG TALANGABSTRAK

Penelitian yang berlokasi di Kawasan Gunung Talang, Solok, Sumatera Barat, dimana daerah yang terletak zona aktif pegunungan dan berpotensi tinggi panas bumi. Penelitian ini bertujuan mendelineasi zona prospek panas bumi di kawasan Gunung Talang pada cakupan regional sekitar 35-40 km melalui integrasi dari parameter data gravitasi satelit GGMPlus dan citra Landsat 9 berbasis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dalam Sistem Informasi Geografis. Parameter utama terdiri atas Anomali Bouguer Lengkap (ABL) berbobot 30%, *Fault and Fracture Density* (FFD) 30%, *Land Surface Temperature* (LST) 25%, dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) 15%. Hasil Pengolahan menunjukkan FFD 0-2,958 km/km², LST 10,0001-26,1835 °C, NDVI -0,74-0,92, ABL 12,5-36,7 mGal, anomali regional 19,4-47,9 mGal, dan amplitudo anomali residual 0-25,5 mGal. Hasil dari kombinasi parameter tersebut menggunakan AHP terbagi menjadi lima kelas yaitu 1,000-1,890 tidak berprospek, 1,890-2,494 prospek rendah, 2,494-3,023 prospek menengah, 3,023-3,596 prospek sedang dan 3,596-4,845 prospek tinggi. Area berprospek tinggi mengikuti sesar berarah dominan barat laut-tenggara, perpotongan rekahan di sekitar Gunung Talang dan jalur menuju bagian selatan-tenggara yang berdekatan dengan manifestasi mata air panas dengan FFD tinggi bernilai 1,229-2,958 km/km², LST bernilai 26,1835 °, NDVI bernilai rendah 0,22-0,65, yang menunjukkan lahan terbuka, sedangkan kontras ABL regional dan residual bernilai tinggi menunjukkan perubahan densitas dangkal. Kesesuaian parameter tersebut menandai zona jalur fluida, alterasi, dan kemungkinan *upflow-outflow*, tetapi belum membuktikan reservoir produktif. Dengan metode ini yang menghasilkan peta AHP berfungsi sebagai *preliminary assessment* yang dapat digunakan sebagai acuan awal identifikasi prospek panas bumi untuk eksplorasi lanjutan di daerah dalam kondisi *remote area*

Kata Kunci: *Analytical Hierarchy Process*, GGMPlus, Gunung Talang, Landsat 9, Panas Bumi.

**INTEGRATION OF GGMPLUS, LANDSAT 9 IMAGERY, AND DEM SRTM
USING THE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (AHP) FOR
GEOTHERMAL PROSPECT ZONE DELINEATION IN THE MOUNT
TALANG AREA**

ABSTRACT

This study aims to delineate the geothermal prospect zone in the Mount Talang area with a regional coverage of approximately 35-40 km through the integration of GGMPlus satellite gravity data parameters and Landsat 9 imagery based on the Analytical Hierarchy Process (AHP) in a Geographic Information System. The main parameters consist of Complete Bouguer Anomaly (ABL) weighted at 30%, Fault and Fracture Density (FFD) at 30%, Land Surface Temperature (LST) at 25%, and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) at 15%. The processing results show FFD 0-2,958 km/km², LST 10,0001-26,1835 °C, NDVI -0,74-0,92, ABL 12,5-36,7 mGal, regional anomalies 19,4-47,9 mGal, and residual anomaly amplitude 0-25,5 mGal. The results of the combination of these parameters using AHP are divided into five classes, namely 1,000-1,890 no prospect, 1,890-2,494 low prospect, 2,494-3,023 medium prospect, 3,023-3,596 medium prospect and 3,596-4,845 high prospect. The high-prospect area follows the dominant northwest-southeast trending fault, the intersection of fractures around Mount Talang and the path towards the south-southeast adjacent to the manifestation of hot springs with high FFD values of 1,229-2,958 km/km², LST values of 26.1835 °, low NDVI values of 0.22-0.65, which indicate open land, while the regional ABL contrast and high residual values indicate shallow density changes. The suitability of these parameters marks the fluid path zone, alteration, and possible upflow-outflow, but has not yet proven a productive reservoir. With this method that produces an AHP map functions as a preliminary assessment that can be used as an initial reference for identifying geothermal prospects for further exploration in areas in remote area conditions.

Keywords: Analytical Hierarchy Process, Geothermal, GGMPlus, Gunung Talang, Landsat 9.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan penulis kemudahan sehingga dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan judul “INTEGRASI PARAMETER GGMPLUS, LANDSAT 9, DAN DEM SRTM BERBASIS AHP UNTUK DELINEASI PROSPEK PANAS BUMI DI KAWASAN GUNUNG TALANG”. Pelaksanaan dan penulisan laporan tugas akhir ini bertujuan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Strata-I pada Departemen Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas

Tujuan Penulis menyusun laporan ini adalah untuk memenuhi salah satu persyaratan akademik, yaitu dalam menyelesaikan mata kuliah tugas akhir di Departemen Universitas Andalas. Dalam laporan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Ardian Putra S.Si, M.Si, selaku dosen pembimbing satu dan bapak Rudi Cahyadi S.Si, M.T, selaku dosen pembimbing dua tugas akhir penulis.
2. Orang tua beserta keluarga yang selalu mendukung dan mendoakan penulis dalam keadaan apapun sehingga skripsi ini bisa diselesaikan.
3. Seluruh pihak yang memberikan ide baik secara langsung maupun tidak langsung dalam menyelesaikan penelitian

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih jauh dari kata sempurna dan masih banyak terdapat kesalahan serta kekurangan didalamnya. Kritikan dan saran yang bersifat membangun dapat disampaikan melalui email: fionagusti879@gmail.com. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat. Terima kasih.

Gusti Fiona

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN NASKAH	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Manfaat Penelitian	3
1.4. Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian	4
1.5. Hipotesis	4
BAB II	6
2.1. Geologi dan Geografi Gunung Talang	6
2.2. Panas Bumi	7
2.2.1. Sistem dan Energi Panas Bumi	8
2.2.2. Manifestasi Panas Bumi	9
2.3. Gravitasi	10
2.3.1. Gravitasi Bumi	10
2.3.2. Metode Gravitasi	10
2.3.3. <i>Global Gravity Model Plus (GGMPlus)</i>	11

2.3.4. Koreksi Pada Gravitasi	12
2.4. Metode Penginderaan Jarak jauh (<i>Remote Sensing</i>).....	15
2.5. Landsat 9.....	16
2.5.1. Sensor Landsat 9.....	17
2.5.2. <i>Land Surface Temperature</i> (LST)	18
2.5.3. <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI).....	19
2.6. <i>Digital Elevation Model</i> (DEM).....	21
2.7. <i>Fault Fracture Density</i> (FFD)	21
2.8. Metode <i>Analytical Hierarchy Process</i> (AHP).....	21
2.9. <i>Weighted Linear Combination</i> (WLC).....	24
BAB III	26
3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian.....	26
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	26
3.3. Teknik Penelitian.....	27
3.4. Pengumpulan Data.....	29
3.5. Pengolahan Data Citra Satelit.....	30
4.8.1 Pengolahan Data Landsat 9 dan DEM SRTM.....	30
4.8.2 Pengolahan Data GGMPlus.....	33
4.8.3 Pembobotan Parameter dengan <i>Analytical Hierarchy Procees</i> (AHP).....	34
BAB IV	37
4.1. Peta DEMNAS (<i>Hillshade</i>)	37
4.2. <i>Fault and Fracture Density</i> (FFD)	38
4.3. <i>Land Surface Temperature</i> (LST) dan <i>Normalized Difference Vegetation Index</i> (NDVI).....	39
4.3.1. <i>Land Surface Temperature</i> (LST)	39

4.3.2. <i>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</i>	41
4.4. Anomali Bouguer Lengkap (ABL).....	43
4.5. <i>Radial Average Power Spectrum (RAPS)</i>	44
4.6. Anomali Regional.....	46
4.7. Anomali Residual	48
4.8. Pembobotan Parameter AHP	49
4.8.1 Menentukan Kriteria Penilaian	49
4.8.2 Menyusun Hierarki dan Matriks Perbandingan berpasangan.....	50
4.8.3 Normalisasi dan Penentuan Bobot Prioritas	51
4.8.4 Perhitungan Nilai Eigen dan Uji Konsistensi	52
4.9. Pemetaan Zona Prospek Panas Bumi	52
BAB V.....	56
5.1. Kesimpulan.....	56
5.2. Saran	56
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN.....	63



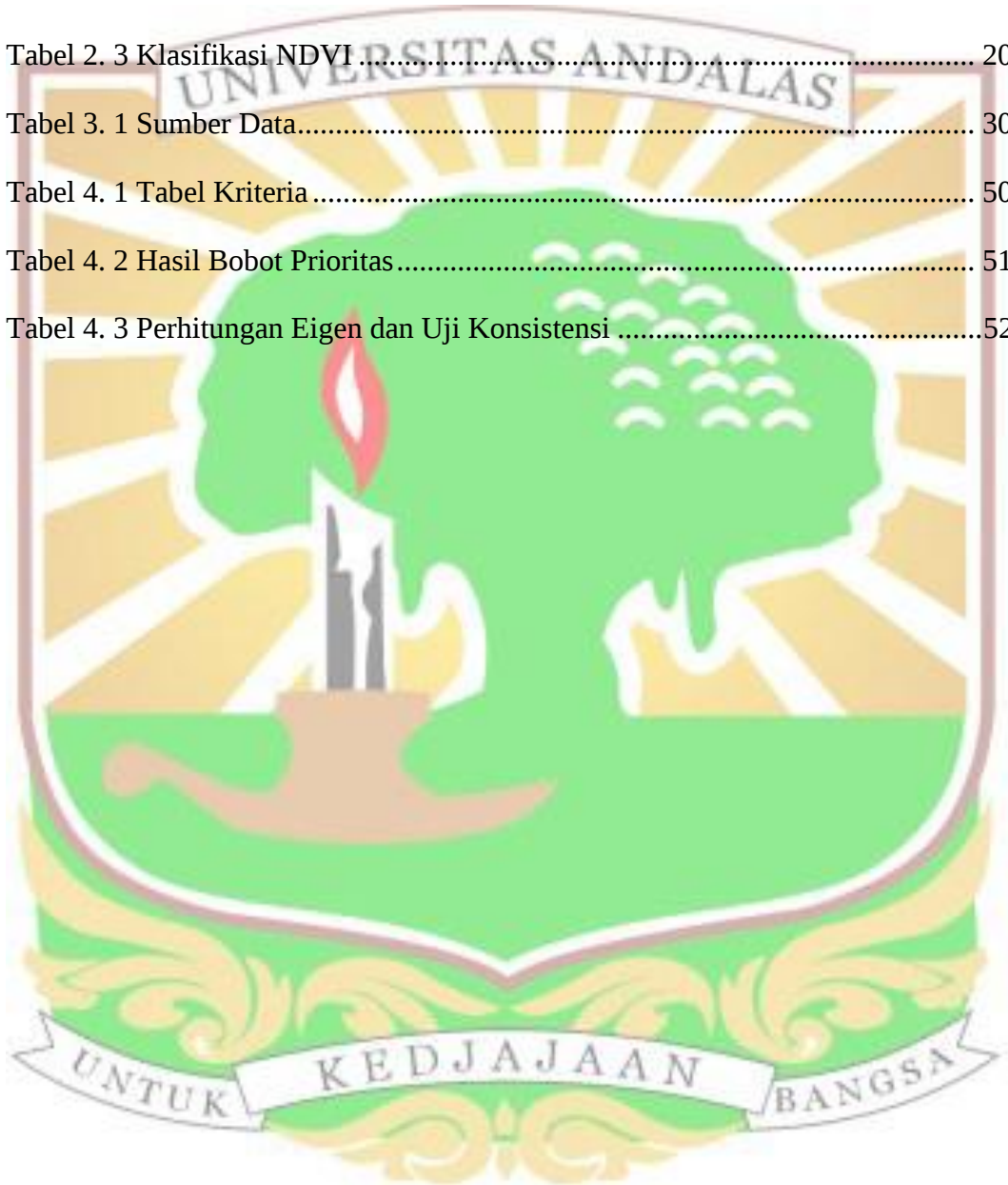
DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1Peta Geologi Gunung Talang	6
Gambar 2. 3 Model sistem panas bumi (Toth dkk, 2017).....	8
Gambar 2. 4 Ilustrasi dua benda yang saling tarik-menarik dengan gaya gravitasi (Blakely, 1996).....	11
Gambar 2. 5 Landsat 9 (USGS, 2020)	16
Gambar 3. 1Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 4. 1 Citra <i>hillshade</i> kawasan Gunung Talang dan sebaran titik manifestasi panas bumi.	37
Gambar 4. 2 Peta Fault and Fracture Density (FFD) kawasan Gunung Talang ...	38
Gambar 4. 3 Peta Land Surface Temperature (LST) kawasan Gunung Talang....	40
Gambar 4. 4 Peta Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) kawasan Gunung Talang.....	41
Gambar 4. 5 Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL) kawasan Gunung Talang..	43
Gambar 4. 6 Grafik Radial Average Power Spectrum, regresi, dan cutoff.....	45
Gambar 4. 7 Peta anomali regional kawasan Gunung Talang.	47
Gambar 4. 8 Peta Anomali Residual Kawasan Gunung Talang	48
Gambar 4. 9 Peta delineasi zona prospek panas bumi kawasan Gunung Talang.	53



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Pita Spektral Pada Sensor OLI-2 dan TIRS-2, pada Landsat 9	17
Tabel 2. 2 Kombinasi Band Landsat 9	18
Tabel 2. 3 Klasifikasi NDVI	20
Tabel 3. 1 Sumber Data	30
Tabel 4. 1 Tabel Kriteria	50
Tabel 4. 2 Hasil Bobot Prioritas	51
Tabel 4. 3 Perhitungan Eigen dan Uji Konsistensi	52



DAFTAR LAMPIRAN

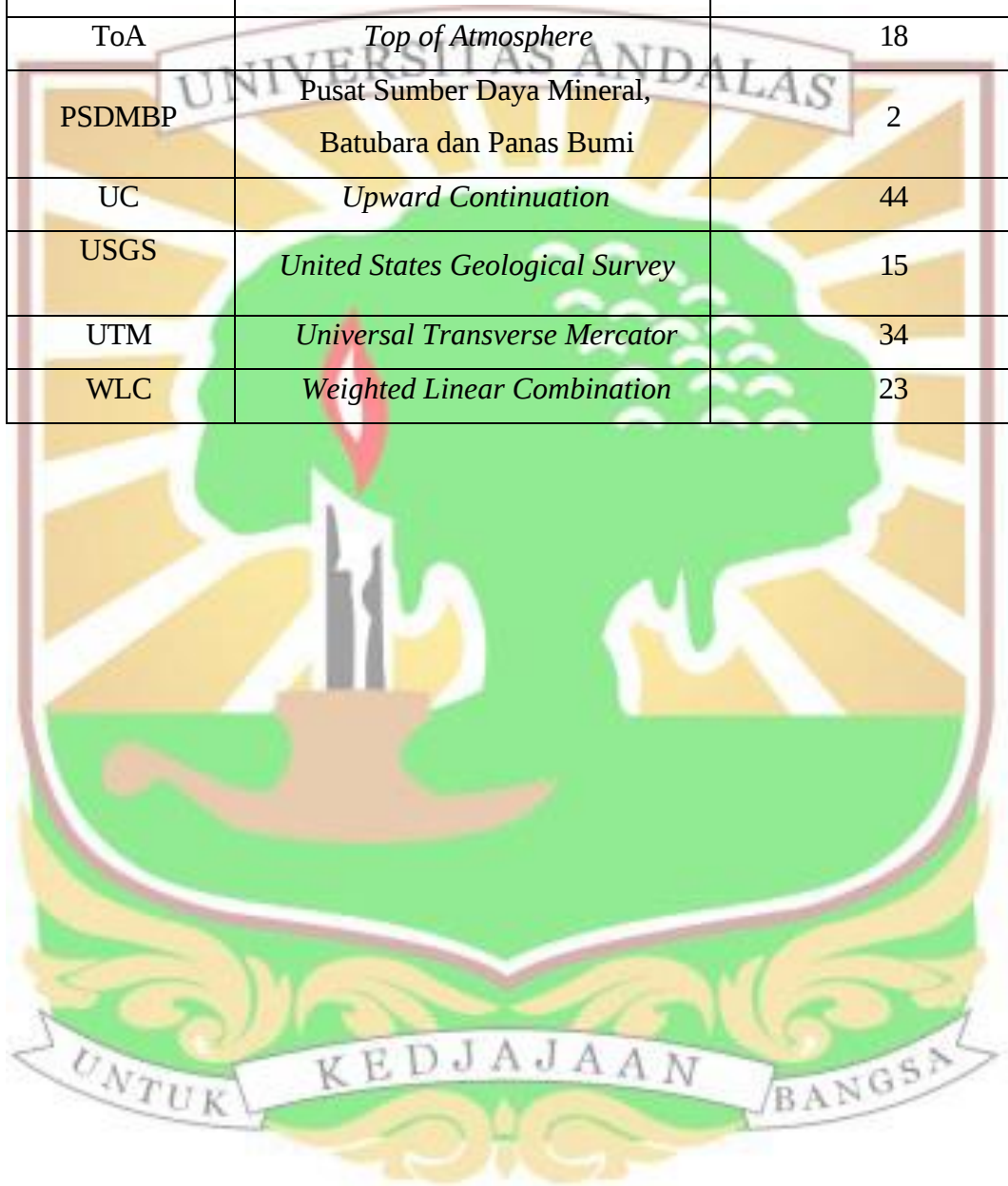
Lampiran A Skrip Kode dan hasil keluaran dari data citra Landsat 9 LST dan DEM SRTM.....	63
Lampiran B Skrip Kode dan hasil keluaran dari data citra Landsat 9 NDVI dan output	66
Lampiran C Skrip MATLAB test acces data ggmlus	69
Lampiran D Skrip MATLAB ggmlus2013_v4 untuk tahapan ekstraksi nilai anomali gravitasi satelit.....	72
Lampiran E Penarikan lineament pada hillshade	81
Lampiran F Data pengolahan GGMLus pada Oasis Montaj.....	81
Lampiran G Pembobotan AHP pada Excel.....	63
Lampiran H Pengolahan WLC pada Arcgis	82



DAFTAR SINGKATAN

Singkatan (Akronim)	Keterangan Akronim	Pemakaian Pertama Kali pada Halaman
ABL	Anomali Bouguer Lengkap	2
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i>	2
BGI	<i>Bureau Gravimetrique International</i>	12
BT	<i>Brightness Temperature/Suhu</i> Kecerahan	30
DEM SRTM	Digital Elevation Model <i>Shuttle Radar Topography</i>	4
DN	<i>Digital Number</i>	30
FAA	<i>Free Air Anomaly</i>	13
FFD	<i>Fault Fracture Density/Kerapatan</i> Kelurusan	2
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>	13
GGM	<i>Global Gravity Model</i>	2
G _{obs}	<i>Gravity Acceleration Observation</i>	13
GOCE	<i>Gravity field and steady-state</i> <i>Ocean Circulation Exploration</i>	12
GPM	<i>Geothermal Prospect Map</i>	23
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate</i> <i>Experiment</i>	12
LST	<i>Land Surface Temperature/Suhu</i> Permukaan	2
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation</i> Index	2
NIR	<i>Near infrared</i>	17
OLI	<i>Operational Land Imager</i>	15
PV	<i>Proportional Vegetation/Vegetasi</i> <i>Propositional</i>	19

QWIP	<i>Quantum-well-infrared photodetector</i>	16
SIG	Sistem Informasi Geografis	4
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>	2
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>	20
ToA	<i>Top of Atmosphere</i>	18
PSDMBP	Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi	2
UC	<i>Upward Continuation</i>	44
USGS	<i>United States Geological Survey</i>	15
UTM	<i>Universal Transverse Mercator</i>	34
WLC	<i>Weighted Linear Combination</i>	23



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia dianugerahi cadangan energi geotermal yang masif akibat posisinya yang melintasi jalur *Pacific Ring of Fire* yang dipicu oleh desakan Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia sehingga membentuk busur vulkanik serta Sesar Besar Sumatera (Welayaturromadhona dkk., 2013). Dinamika tektonik ini memicu pembentukan patahan dan remahan batuan yang meningkatkan permeabilitas formasi geologi, di mana jaringan struktur tersebut berfungsi sebagai saluran migrasi fluida hidrotermal dari interior bumi menuju zona dangkal sebagai elemen pengontrol sistem geotermal (Sari dkk., 2020). Salah satu wilayah di Provinsi Sumatera Barat yang menyimpan indikasi sumber daya tersebut adalah area Gunung Talang di Kabupaten Solok, di mana gunung berapi aktif ini dikendalikan oleh Sesar Besar Sumatera serta memperlihatkan manifestasi permukaan berupa mata air panas, fumarola, dan solfatara yang membuktikan sirkulasi hidrotermal di bawah permukaan (Pusat Sumber Daya Geologi, 2011; Sari dkk., 2020). Berbagai karakteristik geologi tersebut menempatkan kawasan Gunung Talang sebagai zona yang sangat prospektif untuk dieksplorasi dan dikembangkan sebagai sumber energi terbarukan berbasis panas bumi.

Tahap awal eksplorasi panas bumi kerap terkendala oleh medan yang terjal, aksesibilitas yang terbatas, serta tingginya biaya survei geofisika dan pengeboran, yang secara kolektif meningkatkan risiko teknis maupun investasi (Noor dkk., 2019). Metode eksplorasi konvensional yang mengandalkan survei lapangan umumnya hanya mampu menggambarkan kondisi di sekitar manifestasi permukaan sehingga belum dapat menjelaskan keterkaitan antara struktur geologi regional dan sistem panas bumi secara menyeluruh (PSDMBP, 2013). Oleh sebab itu, dibutuhkan metode penyelidikan pendahuluan yang lebih hemat biaya, berdaya guna tinggi, serta sanggup memetakan kondisi bawah permukaan secara komprehensif pada cakupan area yang luas.

Penentuan batasan zona prospek merupakan salah satu tahapan krusial dalam rangkaian penyelidikan pendahuluan. Delineasi yaitu penentuan batas wilayah berdasarkan tertentu untuk mengidentifikasi area yang memiliki potensi panas bumi paling tinggi. Delineasi ini bertujuan mempersempit wilayah kajian dari skala regional menjadi zona target yang lebih spesifik sehingga dapat mengurangi ketidakpastian geologi serta menekan risiko kegagalan pada tahap pemboran. Melalui proses delineasi, zona reservoir, jalur aliran fluida hidrotermal (*upflow* dan *outflow*), serta struktur pengontrol sistem panas bumi dapat diidentifikasi secara lebih sistematis.

Studi terdahulu telah memanfaatkan teknologi penginderaan jauh guna mendeteksi indikasi cadangan geotermal lewat indikator suhu permukaan tanah (*Land Surface Temperature* atau LST), tingkat kerapatan vegetasi (*Normalized Difference Vegetation Index* atau NDVI), serta pola kelurusan struktur geologi (Adivadilah, 2024; Khairunnisa, 2025). Berbagai variabel tersebut dinilai mampu menyajikan data terkait kemunculan manifestasi panas bumi di zona superfisial. Meskipun demikian, riset-riset sebelumnya umumnya masih membatasi analisis pada informasi permukaan, diaplikasikan dalam cakupan lokal, serta belum memadukan data kondisi bawah tanah yang bersumber dari anomali gravitasi satelit. Di samping itu, penggabungan secara kuantitatif di antara beragam variabel geospasial guna mewujudkan peta potensi yang bersifat objektif masih sangat terbatas.

Menanggapi permasalahan tersebut, riset ini menawarkan sebuah kerangka kerja analitis yang memadukan informasi bawah tanah dengan berbagai variabel permukaan secara menyeluruh. Rekaman anomali gravitasi satelit *GGMPPlus* mempunyai tingkat ketelitian spasial yang memadai guna mencerminkan variasi densitas formasi batuan di dalam bumi yang bertautan dengan tatanan struktur geologi, pola patahan, serta estimasi letak dapur panas. Di sisi lain, pemanfaatan citra *Landsat 9* menyajikan data terkait temperatur permukaan tanah (*Land Surface Temperature*), tingkat kerapatan vegetasi lewat indeks *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), serta interpretasi kelurusan struktur yang selanjutnya diolah untuk mengukur tingkat kerapatan sesar dan rekahan (*Fault and Fracture*

Density atau *FFD*). Seluruh variabel tersebut dievaluasi di dalam platform Sistem Informasi Geografis dengan menerapkan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*). Teknik ini memfasilitasi proses penentuan bobot kepentingan antarvariabel melalui mekanisme perbandingan berpasangan sesuai kontribusinya terhadap kemunculan zona prospek, serta dilengkapi evaluasi rasio konsistensi guna memastikan objektivitas hasil pembobotan yang diperoleh. Melalui pendekatan ini diharapkan dapat dihasilkan peta delineasi zona prospek panas bumi yang lebih representatif pada skala regional, khususnya dalam radius 35–40 km dari Gunung Talang, sehingga mampu menggambarkan keterkaitan antara struktur geologi regional, kondisi bawah permukaan, dan manifestasi hidrotermal di permukaan.

Penelitian ini bertujuan mendelineasi zona prospek panas bumi Gunung Talang melalui integrasi data gravitasi GGMPlus dan citra Landsat 9 menggunakan metode *AHP*. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi kajian awal (*preliminary assessment*) yang lebih objektif dan efisien dalam menentukan target eksplorasi panas bumi serta mendukung perencanaan eksplorasi tahap lanjut di kawasan Gunung Talang

1.2. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi serta mendelineasi zona prospek panas bumi di Kawasan Gunung Talang, guna menghasilkan peta potensi geotermal melalui integrasi data gravitasi satelit GGMPlus dan citra Landsat 9 menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*).

1.3. Manfaat Penelitian

Studi ini diproyeksikan mampu menyumbangkan pembaruan signifikan bagi pengembangan metodologi penyelidikan pendahuluan energi geotermal lewat penggabungan data anomali gravitasi satelit bersolusi tinggi dan citra optik penginderaan jauh yang didasarkan pada sistem pengambilan keputusan multikriteria. Keluaran dari riset ini berupa peta delineasi wilayah potensial panas bumi di sekitar Gunung Talang diyakini mampu menyajikan estimasi awal yang bersifat objektif serta menyeluruh mengenai cadangan energi terbarukan di daerah tersebut, sehingga layak dijadikan acuan fundamental dalam perumusan strategi

eksplorasi lanjutan sekaligus rujukan ilmiah bagi kajian serupa pada kawasan yang memiliki kemiripan kondisi geologis.

1.4. Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Guna menjaga ketajaman fokus serta menjamin ketercapaian sasaran akademik, cakupan serta pembatasan masalah dalam riset ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Area penelitian dibatasi pada kawasan Gunung Talang beserta zona penyangga dalam radius 35 sampai 40 kilometer yang secara administratif berada dalam teritori Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat.
2. Data gravitasi yang dimanfaatkan bersumber dari rekaman satelit *GGMPlus* yang diproses guna menghasilkan peta Anomali Bouguer Lengkap sebagai pencerminan variasi densitas formasi bawah tanah.
3. Aspek permukaan dikaji menggunakan data optik dari satelit *Landsat 9* yang didukung oleh pemanfaatan data *DEM SRTM* untuk mengevaluasi temperatur permukaan tanah (*Land Surface Temperature*), indeks kerapatan vegetasi (*Normalized Difference Vegetation Index*), serta interpretasi kelurusan struktur.
4. Penggabungan seluruh parameter dikerjakan dalam platform Sistem Informasi Geografis dengan menerapkan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* untuk memetakan zona prospek geotermal.
5. Penelitian ini berbasis data sekunder, dimana tidak adanya kegiatan survei lapangan detail, pengukuran geofisika terestris, maupun pemboran eksplorasi, sehingga hasil penelitian ini bersifat kajian awal (*preliminary assessment*).

1.5. Hipotesis

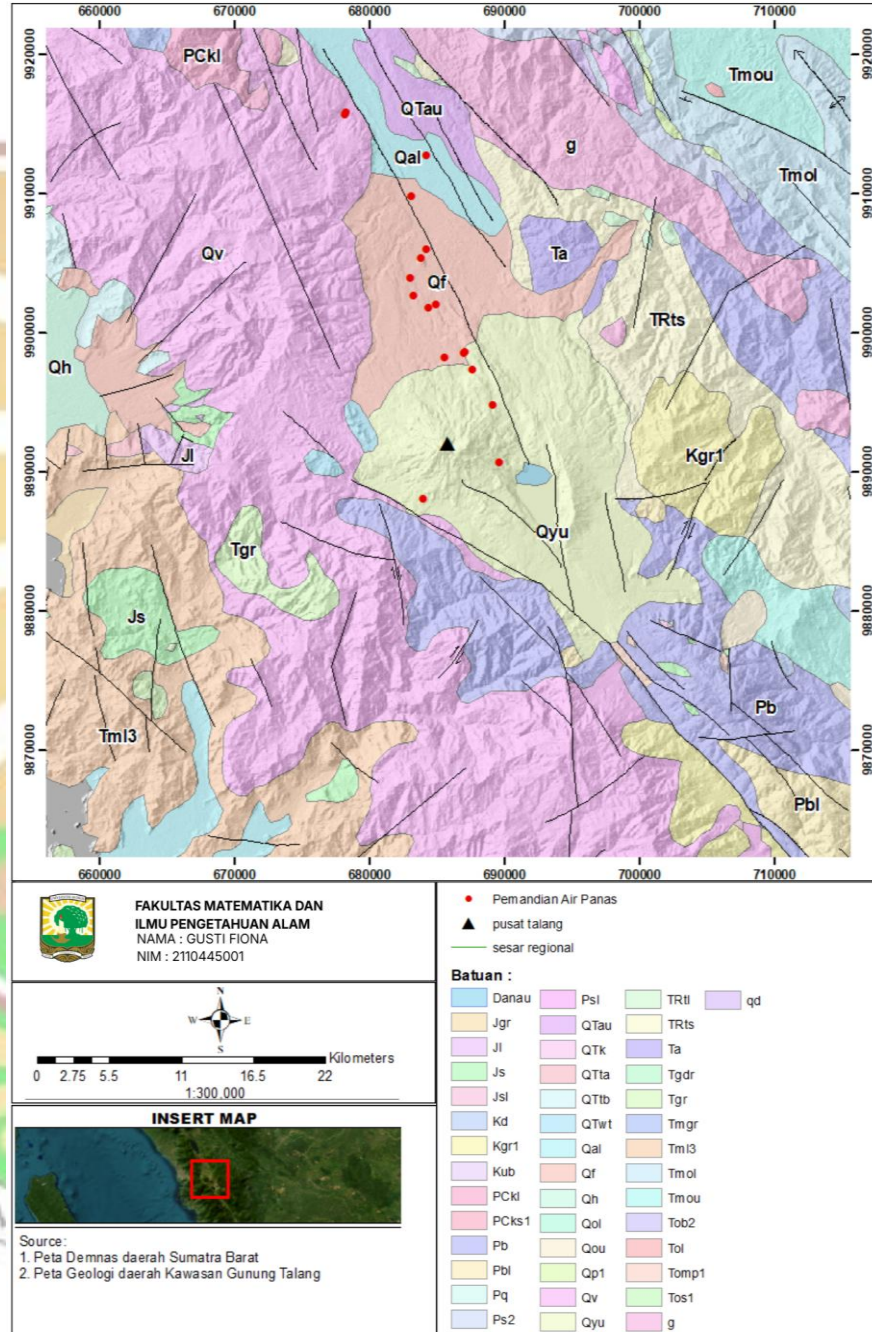
Integrasi data gravitasi satelit *GGMPlus* dan parameter penginderaan jauh berbasis citra *Landsat 9* dengan menggunakan metode *Analytical Hierarchy*

Process (AHP) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG), metode ini mampu mengidentifikasi hubungan antara kondisi bawah permukaan dan indikator permukaan yang mengatur keberadaan sistem panas bumi, sehingga menghasilkan delineasi zona prospek panas bumi yang lebih representatif di kawasan Gunung Talang.



BAB II LANDASAN TEORI

2.1. Geologi dan Geografi Gunung Talang



Gambar 2. 1Peta Geologi Gunung Talang

Kawasan Gunung Talang dicirikan oleh kondisi iklim tropis basah dengan tingkat curah hujan intensif yang berperan vital sebagai zona imbuhan bagi sirkulasi hidrotermal di dalam tanah, serta didominasi oleh topografi perbukitan curam dan

keberadaan danau vulkanik seluas kira-kira 5 kilometer persegi. Bentang alam tersebut terbentuk sebagai manifestasi dari dinamika tektonik regional Pulau Sumatera akibat proses penunjaman Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia. Aktivitas konvergen ini memicu deformasi batuan secara besar-besaran akibat tekanan tektonik yang massif (Andreastuti dkk., 2018) sekaligus membentuk Busur Vulkanik Sumatera dan zona Sesar Besar Sumatera (*Great Sumatran Fault*), keadaan tersebut terbentuknya zona lemah (*weak zones*) yang dicirikan oleh tingginya densitas rekahan dan sistem sesar struktur inilah yang berperan krusial sebagai jalur konveksi fluida panas bumi, (*heat source*).

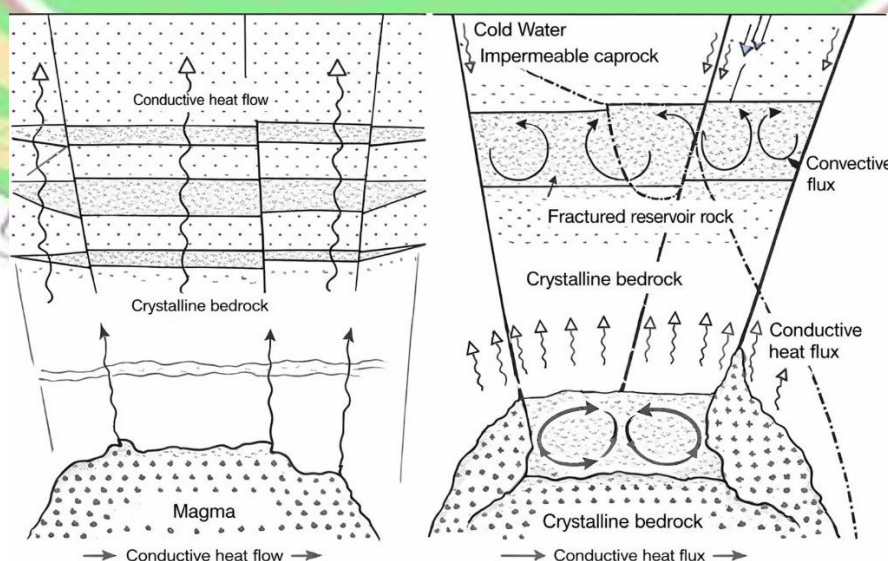
Secara geologi pada daerah Kawasan Gunung Talang berpusat pada kawah dan kaki Gunung Talang di dominasi oleh batuan vulkanik berumur Kuartar (diindikasikan oleh satuan Qyu dan Qv) yang sekaligus mengonfirmasi adanya aktivitas magmatisme, pada daerah yang memiliki manifestasi terletak pada struktur batuan vulkanik dengan kode Qf. Pemunculan manifestasi yang masif pada satuan Qf dan berasosiasi kuat dengan kelurusan sesar di area tersebut mengindikasikan bahwa formasi batuan tersebut memiliki permeabilitas sekunder yang sangat tinggi, sehingga berfungsi sangat efektif sebagai zona lepasan (*discharge area*) sekaligus zona prospek utama bagi aliran fluida hidrotermal.

2.2. Panas Bumi

Berdasarkan Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang Panas Bumi, energi panas bumi didefinisikan sebagai potensi kalor yang tersimpan dalam fluida cair, uap air, batuan, serta mineral ikutan, sementara istilah *geothermal* sendiri diturunkan dari gabungan kosakata bahasa Yunani yaitu *geo* yang berarti bumi dan *thermal* yang bermakna panas, sehingga mencerminkan tenaga kalor yang bersumber dari interior bumi (Royana, 2013). Potensi tersebut baru memiliki nilai ekonomis yang layak apabila akumulasi cadangan yang terdeteksi mampu dieksploitasi serta diaplikasikan baik secara langsung pada lokasi sumbernya untuk keperluan pengeringan komoditas perkebunan seperti teh dan pemanfaatan fasilitas wisata pemandian air panas, maupun secara tidak langsung melalui konversi energi menjadi pembangkit tenaga listrik.

2.2.1. Sistem dan Energi Panas Bumi

Mekanisme perpindahan panas alami yang mengalir dari bagian mantel serta kerak menuju permukaan bumi melalui proses hantaran dan aliran fluida dikenal sebagai sistem panas bumi. Fenomena ini lazimnya berkaitan erat dengan dinamika kegunungapian, di mana energi termal ditransmisikan dari dapur magma sebagai pusat kalor menuju zona penampungan. Transfer energi tersebut berlangsung melalui dua cara utama, yaitu konduksi yang merambat melintasi media batuan padat serta konveksi yang timbul akibat pergerakan sirkulasi fluida bersuhu tinggi (Mayangsari, 2014). Eksplorasi panas bumi pada dasarnya difokuskan pada pemetaan kondisi bawah permukaan. Sebuah sistem panas bumi yang ideal dikontrol oleh tiga elemen utama secara geologi, yaitu keberadaan sumber panas (*heat source*), batuan penyimpan fluida (*reservoir*), dan lapisan batuan kedap air (*caprock*) (Dickson dkk., 2004). Adanya manifestasi di permukaan, seperti anomali temperatur tanah maupun perubahan kerapatan vegetasi, merupakan indikasi sekunder (*outflow*) yang terbentuk akibat naiknya fluida hidrotermal melalui zona permeabel atau bidang sesar. Oleh sebab itu, dalam tahap penilaian awal (*preliminary assessment*), identifikasi struktur bawah permukaan dan anomali fisik batuan menjadi prioritas utama untuk mereduksi ketidakpastian eksplorasi, sebelum mengkorelasikannya dengan proksi data permukaan



Gambar 2. 2 Model sistem panas bumi (Toth dkk, 2017)

1. Sumber panas (*heat source*)

Sumber panas bertindak sebagai penggerak utama yang berasal dari intrusi magmatik bersuhu tinggi (500-1000°C), mentransfer panas secara konduktif ke batuan sekitarnya. (Gupta dkk., 2007).

2. Lapisan batuan penudung (*caprock*)

Lapisan batuan penudung (umumnya mineral lempung) yang berfungsi sebagai penyekat hidrolik dan termal untuk menjaga akumulasi tekanan dan temperatur dalam batuan.

2.2.2. Manifestasi Panas Bumi

Kehadiran manifestasi panas bumi dipahami sebagai penampakan di permukaan tanah yang mencerminkan secara langsung eksistensi sirkulasi sistem hidrotermal aktif di bagian bawah bumi. Distribusi spasial manifestasi dikontrol secara ketat oleh struktur geologi (sistem sesar dan rekahan) yang berfungsi sebagai jalur konveksi vertikal, sehingga densitas kelurusan (*Fault Fracture Density*) dapat digunakan sebagai proksi untuk melokalisasi zona prospek. Secara fisik, pelepasan energi termal dan emisi gas vulkanik di area manifestasi memicu terbentuknya anomali suhu permukaan yang terdeteksi melalui parameter *Land Surface Temperature* (LST), serta menyebabkan gangguan fisiologis pada vegetasi sekitarnya yang teridentifikasi melalui penurunan nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Beberapa manifestasi permukaan menunjukkan gejala sebagai berikut:

1. *Fumorol*

Fumorol merupakan celah emisi uap panas dan gas vulkanik (seperti H₂S) yang mengindikasikan keberadaan aktivitas magmatik di bawah permukaan.

2. Mata Air Panas

Keluaran air tanah yang terpanaskan melalui konduksi atau konveksi, diklasifikasikan menjadi air hangat (<50°C) dan panas (>50°C) yang muncul melalui jalur rekahan batuan.

3. Permukaan tanah beruap (*steaming ground*)

Fenomena evaporasi persisten dari lapisan tanah dangkal akibat tingginya fluks panas konduktif yang memanaskan air tanah hingga fase uap.

4. *Neutral hot spring*

Manifestasi fluida ber-pH 6-7 yang merepresentasikan lepasan langsung (*direct discharge*).

5. Geyser

Geyser adalah semburan hidrotermal intermiten yang terjadi akibat siklus akumulasi dan pelepasan tekanan uap secara eksplosif melalui sistem konduit alamiah.

2.3. Gravitasi

2.3.1. Gravitasi Bumi

Bidang ekuipotensial gravitasional yang melingkupi planet bumi atau yang umum dikenal sebagai geoid, sekilas tampak licin kendati faktanya memiliki ketidakraturan akibat fluktuasi kekuatan gaya tarik di berbagai wilayah. Secara konseptual, geoid dipahami sebagai bidang kesetimbangan potensial gravitasi yang mencerminkan kondisi *mean sea level* pada situasi tenang. Bentuk permukaan tersebut tidak rata secara sempurna, melainkan mengalami undulasi atau kegelombangan yang dipicu oleh variasi sebaran massa serta rapat massa batuan di dalam bumi. Berhubung arah vektor gaya tarik bumi senantiasa bersikap ortogonal terhadap bidang ini, maka geoid ditetapkan sebagai acuan dasar dalam pengukuran tinggi serta penentuan posisi vertikal (Blakely, 1996).

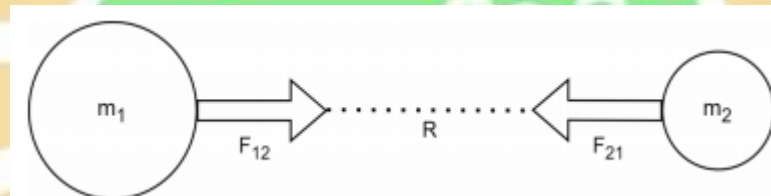
2.3.2. Metode Gravitasi

Teknik penyelidikan geofisika yang memanfaatkan pengukuran fluktuasi medan gravitasi bumi sebagai dampak dari ketidaksamaan rapat massa formasi batuan di dalam tanah dikenal sebagai metode gravitasi. Landasan utama teknik ini bersandar pada Hukum Gravitasi Newton, di mana kemunculan anomali gaya berat dipicu oleh adanya kontras densitas antara struktur target geologi dan batuan di sekitarnya (Telford dkk., 1990). Pendekatan tersebut telah menjadi prosedur baku dalam investigasi geotermal guna mengenali jalur patahan serta memetakan keberadaan sebaran intrusi magma. Besaran gaya tarik bumi itu sendiri diatur oleh

hukum fisika di mana interaksi gaya antara dua titik partikel bermassa m_1 dan m_2 sebanding dengan hasil kali massanya serta berbanding terbalik dengan kuadrat jarak yang memisahkan pusat massa keduanya (Blakely, 1996), yang kemudian dirumuskan secara matematis ke dalam Persamaan 2.1 berikut:

$$\vec{F} = G \frac{M m}{r^2} \hat{r} \quad (2.1)$$

dimana, $\vec{F}$ adalah gaya gravitasi antara dua benda, M dan m adalah massa kedua benda, r adalah jarak antara pusat massa kedua benda, dan G adalah konstanta gravitasi universal yang bernilai ($6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$).



Gambar 2. 3 Ilustrasi dua benda yang saling tarik-menarik dengan gaya gravitasi (Blakely, 1996)

Percepatan massa yang jatuh bebas dalam medan gravitasi memiliki kaitan dengan gaya gravitasi melalui hukum II Newton. Melalui hukum II Newton maka, dapat di rumuskan sebagai berikut:

$$F = m \cdot g \quad (2.2)$$

Pada massa pertama (m) terdapat gaya yang bekerja karena adanya interaksi Tarik menarik dari massa kedua (M) dari suatu jarak kedua benda (r) sehingga nilai percepatan gravitasi dirumuskan sebagai Persaman 2.3.

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (2.3)$$

2.3.3. *Global Gravity Model Plus (GGMPlus)*

Global Gravity Model Plus (GGMPlus) adalah model satelit gravitasi bumi dengan resolusi tinggi hasil kolaborasi Universitas Curtin dan TU Munich, yang dalam penelitian ini diposisikan sebagai sumber data primer untuk mengatasi keterbatasan survei terestris. Keunggulan utama GGMPlus terletak pada resolusi

spasialnya yang mencapai ~200 meter, jauh lebih baik dibandingkan model global lain seperti TOPEX (1.800 m) atau BGI (3.600 m) (Hirt dkk., 2013). Data ini merupakan hasil integrasi data satelit (GRACE/GOCE) dan topografi (SRTM), yang sangat efektif untuk mendelineasi struktur geologi regional dan konfigurasi batuan dasar (*basement*) secara akurat dan efisien tanpa memerlukan pengukuran lapangan langsung. Data ini bisa diakses melalui website: <https://ddfe.blazejbuch.com/models/GGMplus/>

2.3.4. Koreksi Pada Gravitasi

1. Anomali *Bouguer* Lengkap

Penerapan koreksi Bouguer berfungsi untuk memperhitungkan pengaruh massa material batuan yang terletak di antara titik stasiun pengukuran dan bidang referensi yang sebelumnya diabaikan dalam koreksi udara bebas (*free air correction*), di mana hasil akhir berupa Anomali Bouguer Lengkap merepresentasikan besaran fluktuasi gravitasi setelah serangkaian koreksi diterapkan pada data pengamatan lapangan. Sebelum tahap perhitungan anomali tersebut dirampungkan, proses koreksi Bouguer sederhana wajib diselesaikan terlebih dahulu dengan mengacu pada Persamaan 2.4.

$$SBA = \delta g - BC \quad (2.4)$$

Setelah data satelit diolah dengan koreksi di atas maka diperoleh nilai ABL (Anomali *Bouguer* Lengkap), secara umum ditulis dengan Persamaan 2.4 (Telford dkk., 1990).

$$g_{ABL} = g_{OBS} - g_N + g_{FAA} - g_B + g_{KT} \quad (2.5)$$

yang mana g_{ABL} menyatakan nilai anomali Bouguer lengkap, sementara g_{OBS} adalah data gravitasi hasil pengamatan, g_{FAA} melambangkan koreksi udara bebas, g_B merupakan koreksi Bouguer, serta g_{KT} menunjukkan

koreksi medan. Mengingat dataset satelit yang dimanfaatkan telah mengalami reduksi hingga mencapai tingkat Anomali Udara Bebas (g_{FAA}), maka penjabaran matematis tersebut disederhanakan ke dalam Persamaan 2.6.

$$g_{ABL} = g_{FAA} - g_B + g_{KT} \quad (2.6)$$

2. Koreksi Terrain

Koreksi medan (*Terrain Correction*) diterapkan untuk mengompensasi efek deviasi topografi di sekitar titik amat yang tidak terakomodasi oleh asumsi lempeng datar *Bouguer* (Hinze dkk., 2013). Metode perhitungan standar menggunakan pendekatan kompartemen lingkaran konsentris (*Hammer chart*) yang membagi area menjadi sektor-sektor radial. Efek gravitasi untuk setiap sektor tunggal dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$KP = 0.049 \frac{\rho}{n} |(r_2 - r_1) + \sqrt{(r^2 - z^2)} - \sqrt{r^2 + z^2}| \quad (2.7)$$

3. Analisis Spektrum Radial dan *Upward Continuation*

Analisis spektrum radial adalah metode kuantitatif transformasi fourier yang di gunakan dalam memperkirakan kedalaman rata-rata sumber penyebab anomaly bawah permukaan, metode ini mengisolasi data anomaly gravitasi dari domain spasial (x,y) ke domain frekuensi atau gelombang (*wavenumber*) (Kebede.H., 2018). Spektrum amplitudo dihitung dalam domain bilangan gelombang dengan mentransformasikan data anomaly gravitasi dari domain spasial ke domain bilangan gelombang menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Analisis spektral secara teoritis dapat mengidentifikasi diskontinuitas litosfer berdasarkan perubahan mendadak yang tercermin dari kemiringan data yang diamati (Awaliyah dkk., 2024).

Perhitungan kedalaman lapisan dasar magnetic diperkirakan menggunakan metode puncak spektral dan metode sentroid, pendekatan puncak spectral menentukan ketebalan sedimen dan lapisan dasar.

Analisis didasarkan pada persamaan transformasi Fourier 2D, dan hasilnya ditampilkan dalam skala logaritmik sebagai fungsi dari bilangan gelombang radial (kr). Amplitudo radial dihitung sebagai nilai rata-rata spektrum amplitudo Fourier 2D dan diberikan oleh Persamaan 2.8 (Tchoukeu dkk., 2021).

$$A = |F| = [Re(F)^2 + Im(F)^2]^{1/2} \quad (2.8)$$

Dengan sepanjang *ring* berjari jari $k_r = [k_x^2 + k_y^2]^{1/2}$ yg berpusat $k_x = k_y = 0$. Dilakukan Transformasi Fourier dari data medan potensial dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai Persamaan 2.9.

$$F = Ce^{-hk} \quad (2.9)$$

Dimana $\log\left(\frac{F}{C}\right) = -hk$. Kedalaman h dari sumber anomali di lapisan atas diwakili oleh garis tangensial yang sesuai dengan bagian linier dari spektrum amplitudo.

4. Pemisahan Anomali Residual dan Regional

Anomali regional merepresentasikan karakteristik panjang gelombang panjang (frekuensi rendah), sedangkan anomali residual dengan sumber dangkal yang memiliki panjang gelombang pendek dan frekuensi tinggi (Telford dkk., 1990). Pemisahan spektrum dilakukan menggunakan metode *Upward Continuation*, yang berfungsi sebagai *low-pass filter* untuk mengisolasi tren regional dengan memproyeksikan medan ke elevasi lebih tinggi. Selisih antara anomali total dengan respon regional inilah yang menghasilkan anomali residual sebagai representasi struktur geologi lokal (Chasanah dkk., 2021). Berikut adalah Persamaan Pemisahan anomali regional.

$$G_R(k_x, k_y) = G_B(k_x, k_y)e^{-k\Delta z} \quad (2.10)$$

$G_R(k_x, k_y)$ adalah spektrum anomali regional setelah dilakukan *Upward Continuation*, $G_B(k_x, k_y)$ adalah spektrum anomali Bouguer

lengkap sebelum dilakukan *Upward Continuation*, k_x bilangan gelombang (*wavenumber*) pada arah x, k_y adalah bilangan gelombang (*wavenumber*) pada arah y.

Setelah anomali regional diperoleh, anomali residual dihitung menggunakan Persamaan 2.11.

$$\Delta g_{res} = \Delta g_B - \Delta g_R \quad (2.11)$$

Dimana Δg_{res} anomali residual, dalam satuan mGal, Δg_B anomali Bouguer lengkap, dalam satuan mGa, dan Δg_R anomali regional hasil *Upward Continuation*, dalam satuan mGal.

5. Interpretasi 2D

Penyusunan representasi bawah tanah secara dua dimensi dijalankan sebagai kerangka konseptual guna memperlihatkan struktur fisik interior bumi yang dipicu oleh keberadaan massa anomali berciri khas tertentu. Prosedur pemodelan ke depan (*forward modelling*) kerap diterapkan sebagai instrumen untuk menghitung besaran respons teoretis serta pola persebaran sifat fisik dari sumber anomali mengacu pada himpunan data pemodelan. Khusus dalam ranah eksplorasi gaya berat, pelaksanaan pemodelan ke depan tersebut ditempuh dengan mengalkulasi fluktuasi medan gravitasi yang ditimbulkan oleh kombinasi topografi serta sebaran densitas massa di dalam bumi (Nurul dkk., 2020).

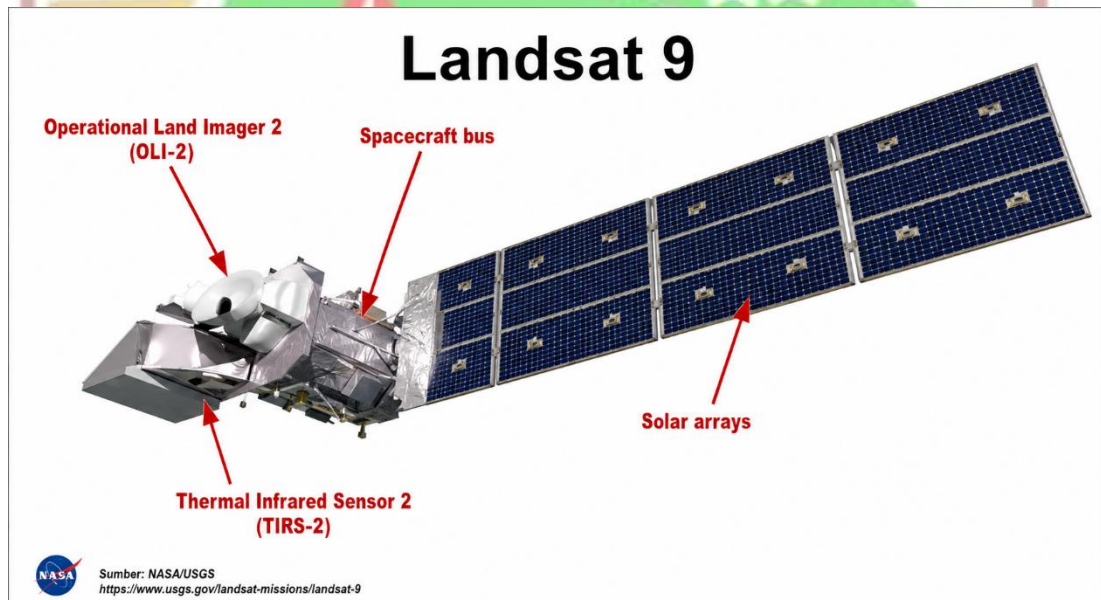
2.4. Metode Penginderaan Jarak jauh (*Remote Sensing*)

Penginderaan jauh digunakan sebagai metode prospeksi awal dalam eksplorasi panas bumi untuk menemukan anomali permukaan yang terkait dengan sistem hidrotermal aktif. Parameter fisik permukaan diidentifikasi melalui analisis spektral citra Landsat 9. Pada penelitian fokus utamanya adalah pemetaan suhu permukaan tanah (LST) dengan sensor termal (TIRS-2) untuk mengukur distribusi panas permukaan, dan analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

dengan sensor optik (OLI-2) untuk menentukan pola stres vegetasi yang sering terjadi di daerah manifestasi panas bumi.

2.5. Landsat 9

Landsat merupakan salah satu program satelit observasi bumi tak berawak pertama, dan Landsat 9 adalah generasi terbaru dari program tersebut yang dikembangkan oleh NASA untuk mengumpulkan data sumber daya planet. Landsat 9, yang diluncurkan pada 27 September 2021 melalui kolaborasi USGS dan NASA, menawarkan resolusi radiometrik lebih tinggi dibandingkan pendahulunya, Landsat 8, dengan 14-bit berbanding 12-bit. Ini meningkatkan kemampuan sensor untuk mendeteksi perbedaan halus di area gelap seperti air dan hutan.



Gambar 2. 4 Landsat 9 (USGS, 2020)

Landsat 9 ditempatkan pada orbit 705 km, Landsat 9 melakukan pengamatan setiap 16 hari dan bekerja sama dengan Landsat 8 untuk menjaga resolusi temporal. Misi Landsat bertujuan mengumpulkan gambar multispektral untuk pemantauan global yang komprehensif, dengan akses publik gratis dan tersimpan dalam arsip nasional Amerika.

2.5.1. Sensor Landsat 9

2.5.1.1. *Sensor Operational Land Imager-2 (OLI-2)*

Sensor *Operational Land Imager-2* (OLI-2) pada Landsat 9 meningkatkan resolusi radiometrik menjadi 14-bit, dan memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dalam mendeteksi variasi spektral permukaan dibandingkan pendahulunya (Landsat 8). Instrumen ini mengakuisisi data dengan resolusi spasial 30 m pada saluran multispektral. Dalam konteks analisis vegetasi (NDVI), OLI-2 menyediakan saluran spektral kunci, yakni Band 4 (*Red*: 0.64–0.67 μm) untuk serapan klorofil dan Band 5 (*Near Infrared*: 0.85–0.88 μm) untuk pantulan struktur daun (USGS, 2020).

2.5.1.2. *Sensor Thermal Infrared 2 (TIRS-2)*

Sensor *Thermal Infrared Sensor 2* (TIRS-2) pada Landsat 9 merupakan instrumen termal yang dirancang dengan perbaikan signifikan pada mitigasi *stray light* (cahaya nyasar) untuk meningkatkan akurasi radiometrik dibandingkan pendahulunya (TIRS-1). Sensor ini mengakuisisi data menggunakan detektor *Quantum Well Infrared Photodetector* (QWIP) dengan kuantisasi 14-bit, yang menyediakan sensitivitas termal tinggi. TIRS-2 beroperasi pada dua saluran spektral inframerah termal utama, yaitu Band 10 (10.6 – 11.19 μm) dan Band 11 (11.5 – 12.51 μm), dengan resolusi spasial akuisisi 100meter yang esensial untuk perhitungan *Land Surface Temperature* (NASA, 2020)

Tabel 2. 1 Pita Spektral Pada Sensor OLI-2 dan TIRS-2, pada Landsat 9

Spectral Band	Panjang Gelombang (μm)	Resolusi (meter)	Penerapan
<i>Band 1 – Ultra Blue (Coastal/Aerosol)</i>	0,435 – 0,451	30	Pesisir & Aerosol Cahaya Tampak
<i>Band 2 – Blue</i>	0,452 – 0,512	30	
<i>Band 3 -Green</i>	0,533 - 0,590	30	
<i>Band 4 -Red</i>	0,636 - 0,673	30	

Band 5 – Near Infrared (NIR)	0,851 – 0,879	30	
Band 6 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1,566 – 1,651	30	Analisis Vegetasi
Band 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2,107 – 2,294	30	
Band 8 – Panchromatic	0,503 – 0,676	15	Resolusi Baik
Band 9 -Cirrus	1,363 - 1,384	30	Analisis Awan
Band 10 – TIRS 1	10.6 - 11.19	100	
Band 11 – TIRS 2	11.5 – 12.51	100	Pemetaan Suhu dan Permukaan

Tabel 2. 2 Kombinasi Band Landsat 9

Kombinasi Band	Aplikasi
432	<i>Natural Color</i>
764	<i>False Color</i>
543	<i>Color Infrared</i>
652	<i>Agriculture</i>
765	<i>Atmospheric Penetration</i>
562	<i>Healthy Vegetation</i>
564	<i>Land Water</i>
753	<i>Natural with Atmospheric Removal</i>
754	<i>Shortwave Infrared</i>
654	<i>Vegetation Analysis</i>

2.5.2. Land Surface Temperature (LST)

Land Surface Temperature (LST) merupakan pengukuran permukaan berdasarkan variasi emisi konduktivitas termal batuan. Nilai LST diekstraksi dari citra satelit dilakukan melalui tiga tahap koreksi radiometrik. Koreksi radiometric dilakukan untuk mengonversi nilai DN menjadi nilai reflektansi yang terekam oleh sensor cahaya, koreksi ini berfungsi sebagai proses penghilangan efek perubahan yang di sebabkan oleh koreksi radiometric akibat posisi matahari pada saat

pengambilan data citra. Hal tersebut bertujuan untuk menghitung variasi intensitas cahaya yang tercatat di permukaan bumi. Koreksi ToA dilakukan menggunakan Persamaan 2.12.

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL \quad (2.12)$$

Dimana $L\lambda$ adalah radiansi spektral radian TOA, Q_{cal} adalah nilai piksel (*Digital Number*), serta M_L dan A_L merupakan konstanta kalibrasi dari metadata citra. Hasil dari Persamaan 2.12 dikonversikan menjadi suhu kecerahan menggunakan konstanta termal. Data yang diubah menjadi suhu kecerahan merupakan suhu efektif yang diperoleh dari sensor satelit dengan asumsi emisivitas yang tergantung dengan suhu permukaan yang diamati. Nilai radiansi ini kemudian dikonversi menjadi Suhu Kecerahan (*Brightness Temperature*) menggunakan Persamaan 2.13 (Ngene dkk., 2022).

$$BT(^{\circ}C) = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda}\right) + 1} - 273,15 \quad (2.13)$$

Dimana K_2 dan K_1 sebagai konstanta dari metadata citra. Selanjutnya, suhu kecerahan dikonversi menjadi LST dengan memperhitungkan emisivitas permukaan menggunakan persamaan 2.14.

$$LST = \frac{BT}{1 + \left(\frac{K_1}{L\lambda}\right) \ln(\varepsilon)} - 273,15 \quad (2.14)$$

Dimana λ sebagai panjang gelombang efektif dan ε sebagai emisivitas permukaan tanah (Hidayat dkk., 2023).

2.5.3. *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan parameter spektral yang menggunakan data citra satelit untuk mengukur tingkat kerapatan dan kesehatan vegetasi yang diperoleh oleh nilai dari gabungan dari beberapa

spektral band. Rasio reflektansi saluran Inframerah Dekat (*Band 5*) dan Merah (*Band 4*) (Ngene dkk., 2022), sesuai persamaannya sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2.15)$$

NDVI adalah indeks kerapatan vegetasi, NIR adalah cahaya inframerah pada *band 5*, RED adalah radiasi cahaya merah *band 4*. Nilai NDVI digunakan untuk mengidentifikasi tipe kawasan vegetasi, dengan pengelompokan berdasar pada rentang nilai tertentu yang tercantum dalam Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Klasifikasi NDVI

Kelas	NDVI	Keterangan
1	-1 s/d-0.03	Lahan tidak bervegetasi
2	0.03 s/d 0.15	Kehijauan sangat rendah
3	0.15 s/d 0.25	Kehijauan rendah
4	0.26 s/d 0.35	Kehijauan sedang
5	0.36 s/d 1.00	Kehijauan tinggi

(Hidayat dkk., 2023)

PV (Proportion of Vegetation) berfungsi sebagai parameter koreksi emisivitas (ϵ) untuk meningkatkan akurasi dari *Land Surface Temperature* (LST) pada piksel campuran (tanah dan vegetasi). PV dikuantifikasi sebagai fraksi tutupan (skala 0-1) berdasarkan normalisasi rentang NDVI dengan rumus:

$$PV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \quad (2.16)$$

Dimana nilai NDVI indeks kerapatan vegetasi, PV vegetasi Proporsional, dan $NDVI_{min}$, $NDVI_{MAX}$ adalah indeks kerapatan vegetasi minimum dan maksimum. Nilai PV selanjutnya disubstitusikan ke dalam Persamaan 2.17 untuk menentukan emisivitas permukaan total, yang krusial untuk menghasilkan data termal yang representatif di area heterogen (Sagita dkk., 2022).

$$\varepsilon = \varepsilon \times PV + \varepsilon_g \times (1 - PV) \quad (2.17)$$

2.6. *Digital Elevation Model (DEM)*

Digital Elevation Model (DEM) digunakan untuk menganalisis topografi dan identifikasi struktur geologi basis data spasial tiga dimensi. Melalui metode visualisasi *Triangular Irregular Network (TIN)*, data ini diolah untuk mengekstraksi atribut morfometri seperti kelerengan (*slope*) yang esensial dalam interpretasi bentang alam (Augusty dkk., 2023). Pola kelurusan (*lineament*) pada punggung dan lembah juga ditemukan dengan menggunakan analisis DEM. Pola ini merefleksikan jejak struktur patahan atau kekar yang mengontrol sistem panas bumi di area penelitian.

2.7. *Fault Fracture Density (FFD)*

Fault Fracture Density (FFD) merupakan metode kuantitatif untuk memetakan intensitas deformasi batuan yang menghitung akumulasi panjang kelurusan struktur per satuan luas. Nilai FFD berfungsi sebagai pengukur utama permeabilitas sekunder dalam sistem panas bumi, di mana tingginya densitas rekahan berkorelasi kuat dengan zona permeabel yang merupakan jalur migrasi fluida hidrotermal (*fluid flow pathways*) (Kurniawan, 2022). Analisis FFD dilakukan menggunakan metode *gridding* 1 km x 1 km untuk menghitung total panjang lineamen di setiap sel. Hasil perhitungan kemudian diklasifikasikan dari interval rendah hingga sangat tinggi. Area dengan anomali FFD tinggi dianggap memiliki porositas efektif yang besar dan dapat berfungsi sebagai area resapan (Sihotang dkk., 2021).

2.8. *Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)*

Penerapan *Analytical Hierarchy Process (AHP)* diandalkan sebagai pendekatan pengambilan keputusan multikriteria guna mengurai persoalan rumit yang belum terstruktur ke dalam susunan berjenjang. Melalui riset ini, mekanisme *AHP* difungsikan untuk memadukan data geosains secara teratur demi meminimalisasi unsur subjektivitas analisis kualitatif ke dalam bentuk bobot

numerik terukur, di mana tingkat keabsahannya dipastikan lewat uji rasio konsistensi dengan nilai *CR* kurang dari sepuluh persen serta perumusan bobot prioritas objektif via perbandingan berpasangan (Saaty T. L., 2000), sehingga efektivitas metode ini terbukti optimal dalam pemetaan potensi geotermal (Macharia dkk., 2018). Proses penetapan peringkat kepentingan tersebut diawali dengan membandingkan tiap komponen secara berpasangan ke dalam susunan matriks khusus, yang fondasi matematisnya berpedoman pada aksioma mutlak bahwa seluruh elemen diagonal utama selalu bernilai satu sebagai representasi kesetaraan bobot apabila suatu parameter dikomparasikan terhadap dirinya sendiri. Selanjutnya, vektor eigen diekstraksi dari matriks ternormalisasi guna menghitung nilai bobot akhir setiap kriteria yang mencerminkan arah serta besar prioritas utama dari keseluruhan jenjang keputusan, sebagaimana bentuk formulasi matematis matriks perbandingan berpasangan *AHP* menurut Falatehan (2016) berikut ini:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{1n} \\ 1/a_{12} & a_{22} & a_{2n} \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dimana $a_{11} = 1$, dan $a_{ij} = a$ maka $a_{ij} = 1/a$. Evaluasi tingkat konsistensi penilaian memegang peranan esensial dalam perumusan keputusan guna mencegah risiko ketidakpastian yang bersumber dari pertimbangan dengan tingkat keselarasan rendah (Kusrini, 2007). Sementara itu, nilai perbandingan antar-kriteria menggunakan prinsip *reciprocal*, yaitu

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (2.19)$$

Tahap normalisasi matriks perbandingan berpasangan dijalankan dengan membagi setiap elemen di dalam kolom menggunakan total penjumlahan nilai kolom tersebut, yang perhitungannya dijabarkan melalui Persamaan 2.20.

$$n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (2.20)$$

Selanjutnya, penentuan bobot prioritas didapatkan dengan merata-rata seluruh nilai pada tiap baris di dalam matriks yang telah dinormalisasi tersebut, melalui penerapan Persamaan 2.21.

$$n_{ij} = \frac{\sum_{j=1}^n n_{ij}}{n} \quad (2.21)$$

Perhitungan Bobot Prioritas (*Eigenvector*) di rumuskan dengan Persamaan 2.22 berikut.

$$T_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} \quad (2.22)$$

Dimana T_i adalah penjumlahan dan P_{ij} pada baris ke- i . Setelah dilakukan perhitungan menggunakan Persamaan 2.22 hasil yang di dapatkan disebut λ_{maks} , dan dilakukan perhitungan dari dapat ditentukan dengan Persamaan 2.23.

$$\lambda_{maks} = \frac{\sum_{j=1}^n A_i}{n} \quad (2.23)$$

Dimana n adalah jumlah kriteria, dan setelah mendapatkan λ_{maks} maka perlu menghitung *Consistency Index (CI)* dengan Persamaan 2.24 berikut.

$$CI = \frac{(\lambda_{maks} - n)}{n - 1} \quad (2.24)$$

Dimana λ_{maks} adalah *eigen value* maksimum, dan n adalah banyaknya kriteria, lalu di lakukan perhitungan untuk Hitung Rasio Konsistensi/*Consistency Ratio (CR)* dengan Persamaan 2.25 berikut.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.25)$$

Dimana CR adalah *Consistency Ratio* (Rasio konsistensi), CI adalah *Consistency Index* (Indeks konsistensi) dan RI adalah *Random Index Consistency* (Indeks random).

2.9. *Weighted Linear Combination (WLC)*

Weighted Linear Combination (WLC) adalah metode yang sering digunakan dalam analisis spasial untuk menentukan nilai kesesuaian suatu lokasi berdasarkan beberapa kriteria yang telah ditentukan. WLC merupakan teknik hampiran linier yang mengalikan bobot prioritas setiap parameter (W) dengan skor kelas spasialnya (S), kemudian menjumlahkan keseluruhan hasil kali tersebut untuk menghasilkan indeks kesesuaian akhir. Pendekatan WLC merupakan teknik analisis multikriteria spasial yang mengkalkulasi nilai kesesuaian lahan dengan menjumlahkan hasil kali antara bobot prioritas masing-masing parameter dengan skor klasifikasi standarnya.

Persamaan matematis untuk menghasilkan Peta Prospek Panas Bumi (*Geothermal Prospect Map / GPM*) menggunakan WLC dirumuskan Persamaan 2.26.

$$GPM = \sum_{j=1}^n (W_j \cdot X_{ij}) \quad (2.26)$$

Untuk parameter yang digunakan pada pemodelan ini, persamaan di atas diekspansikan menjadi Persamaan 2.27.

$$GPM = (W_{gb} \cdot S_{gb}) + (W_{ffd} \cdot S_{ffd}) + (W_{lst} \cdot S_{lst}) + (W_{ndvi} \cdot S_{ndvi}) \quad (2.27)$$

Dimana *GPM* adalah indeks komposit prospek panas bumi, *W* adalah Bobot prioritas (*Weight*) yang diekstraksi dari vektor eigen matriks AHP (Gravitasi = 0.30, FFD = 0.30, LST = 0.25, NDVI = 0.15), *S* adalah skor klasifikasi (*Score*) dari setiap *pixel* data spasial (menggunakan interval kelas 1 hingga 5, di mana 5 menunjukkan probabilitas keterdapatan panas bumi tertinggi).

Parameter anomali gaya berat dan *Fault and Fracture Density* (FFD) ditetapkan sebagai kriteria utama dengan bobot kepentingan tertinggi dan setara. Hal ini merujuk pada studi Noorollahi dkk., (2008) yang menegaskan bahwa data geofisika dan geologi struktural merupakan representasi langsung dari keberadaan reservoir dan pengontrol permeabilitas, sehingga krusial dalam delineasi zona prospek. Parameter penginderaan jauh yang terdiri atas *Land Surface Temperature* (LST) dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) diposisikan sebagai kriteria pendukung. Meskipun mampu mendeteksi manifestasi termal dan stres vegetasi di permukaan, data optis dan termal memiliki tingkat kerentanan yang tinggi terhadap *noise* lingkungan, seperti variasi topografi, kelembapan, dan tutupan awan, oleh karena itu kedua parameter permukaan tersebut diletakkan pada hierarki pembobotan yang lebih rendah dibandingkan data bawah permukaan (El-Taher dkk., 2025).

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan November 2025 sampai dengan Februari 2026. Lokasi yang menjadi objek penelitian adalah Daerah sekitar Gunung Talang (35-40km) dengan luas wilayah $\pm 2.504 \text{ km}^2$. Penelitian menggunakan data sekunder dari satelit dengan koordinat $0^{\circ}43'40''\text{S}$ $100^{\circ}28'33''\text{E}$ dan $1^{\circ}10'42''\text{S}$ $100^{\circ}55'28''\text{E}$. Pengolahan data dilakukan di Laboratorium Fisika Bumi Universitas Andalas.

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu:

1. Perangkat keras

Perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, laptop yang berfungsi untuk mengakses *software* dan platform yang digunakan dalam pengumpulan dan pengolahan data selama penelitian berlangsung.

2. Perangkat lunak

A. *Arcgis* digunakan untuk analisis data.

B. *MATLAB* digunakan untuk pengekstrakan data.

C. *Microsoft Excel* digunakan untuk mengolah data gravitasi.

D. *Global Mapper* digunakan untuk membuat peta pengambilan.

E. *Surfer* digunakan untuk mengkonversi data gravitasi serta membuat *grid* wilayah internal dan eksternal penelitian.

F. *Oasis Montaj* digunakan untuk mengkoreksi data dan pemodelan 2D struktur bawah permukaan.

G. *Google Earth Engine*, digunakan sebagai *platform* berupa *cloud computing*, yang digunakan untuk pengumpulan, pengolahan, dan pemrosesan data satelit.

H. *Software QGIS*, digunakan untuk analisis spasial dan pembuatan *layout* peta.

Berikut adalah beberapa bahan penelitian yang digunakan pada penelitian ini, yaitu berupa data-data yang berisi informasi mengenai wilayah penelitian sebagai berikut:

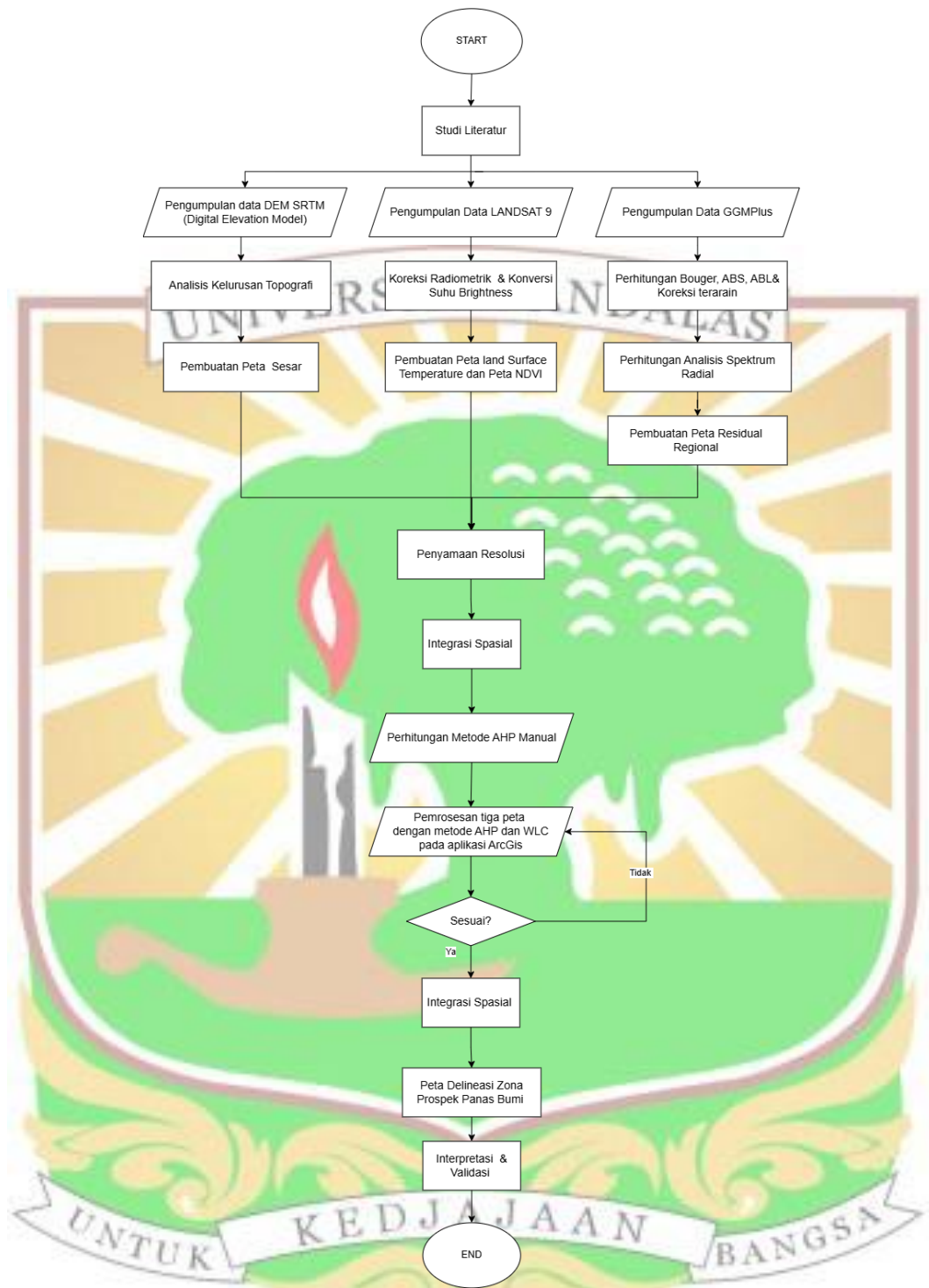
1. Data gravitasi GGMPlus digunakan untuk analisis bawah permukaan dengan resolusi grid spasial ~200 meter yang sudah terkoreksi *free air anomaly* dan data topografi pada daerah penelitian.
2. Data SRTM yang di gunakan untuk koreksi topografi.
3. Data citra *Landsat 9 OLI/TIRS*, dengan resolusi spasial 30 meter, dimanfaatkan untuk mendeliniasi kelurusan struktur (*lineaments*) dan batas litologi permukaan dengan tingkat fidelitas spasial yang tinggi. untuk anomali suhu permukaan analisa pemilihan data yang digunakan, yaitu data pada wilayah Gunung Talang, Sumatra Barat, dengan periode Juli (2025) hingga September (2025).
4. Data *Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)* data ini menyediakan informasi mengenai topografi wilayah dan, digunakan untuk mendukung analisis struktur geologi (FFD) dalam mengidentifikasi indikasi potensi panas bumi di daerah Kawasan Gunung Talang
5. Data geologi wilayah Kawasan Gunung Talang. Data ini memuat informasi mengenai litologi, formasi batuan, struktur geologi seperti sesar dan lipatan, serta kondisi geomorfologi yang menjadi dasar untuk memahami karakteristik geologi daerah penelitian.

3.3. Teknik Penelitian

Eksplorasi indikasi potensi energi panas bumi di wilayah Kawasan Gunung Talang, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat, ini mengandalkan pemanfaatan rangkaian dataset sekunder yang meliputi GGMPlus, Landsat 9, DEM SRTM, serta DEMNAS. Rangkaian pelaksanaan riset ini dibagi ke dalam beberapa tahapan utama, mulai dari inventarisasi data yang mencakup citra penginderaan jauh Landsat 9, informasi medan berat GGMPlus, dan data elevasi; dilanjutkan dengan

tahap pengolahan untuk mengekstraksi variabel suhu permukaan daratan (*Land Surface Temperature* / LST) serta indeks vegetasi (*Normalized Difference Vegetation Index* / NDVI) dari citra Landsat 9, sekaligus menyusun Peta Kerapatan Kelurusan (*Lineament Density* / FFD) serta Anomali Bouguer Lengkap berbasis data gravitasi; hingga tahap sintesis data melalui penerapan metode *AHP* serta teknik tumpang susun (*overlay*) di dalam perangkat Sistem Informasi Geografis guna memetakan sebaran wilayah prospek, di mana keseluruhan kerangka kerja tersebut dijabarkan ke dalam diagram alir penelitian pada Gambar 3.1.





Gambar 3. 1Diagram Alir Penelitian

3.4. Pengumpulan Data

Tahap ini merupakan pengumpulan data sekunder. Data yang dikumpulkan berupa kumpulan data yang diakses melalui platform Google Earth Engine dan platform <https://ddfe.blazejbucha.com/models/GGMplus/> untuk mengakses

kumpulan data gravitasi dan SRTM. Tahap ini dilakukan untuk memastikan kembali ketersediaan jenis kumpulan data yang akan digunakan. Beberapa data dan sumber yang digunakan dapat dilihat di tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Sumber Data

Data	Sumber	Tahun
Data Batas Administrasi	https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/	2019
Peta Geologi	https://geologi.esdm.go.id	2017
GGMPlus	https://ddfe.blazebucha.com/models/GGMplus/	2024
SRTM DEM	GEE (USGS)	2014
Landsat 9	GEE (USGS)	2025

3.5. Pengolahan Data Citra Satelit

4.8.1 Pengolahan Data Landsat 9 dan DEM SRTM

Berikut merupakan tahapan dalam pengolahan Data Landsat 9 dan DEM SRTM, antara lain;

1. Pengolahan data *Landsat 9*

Peta anomali suhu permukaan (LST) dan peta kerapatan vegetasi (NDVI) diperoleh dari data *Landsat 9* yang diunduh dari USGS pada *Google Earth Engine* (Hidayat dkk., 2023) melalui tahapan sebagai berikut:

A. Anomali Suhu Permukaan (LST)

Pengolahan data LST menggunakan software QGIS yang dilengkapi dengan processing tools Landsat imagery. Berikut penjelasan secara detail mengenai pengolahan data LST:

- 1) Pengambilan data citra Landsat 9 diperoleh melalui website <https://earthexplorer.usgs.gov>, kemudian mengatur geometry daerah penelitian dengan memasukkan koordinat daerah penelitian.
- 2) *Regulate cloud cover* memilih tingkat tutupan awan dengan kriteria data di bawah 15% sehingga dengan kriteria tersebut dapat memilih data yang minim tutupan awan pada persentase terkecil.

- 3) Pemilihan data setelah mengatur persentase tutupan awan yang minim maka, dilakukan pemilihan data yang sesuai dengan daerah penelitian dan waktu akuisisi yang memiliki kualitas data citra yang bagus dengan kriteria tutupan awan paling sedikit yaitu $<15\%$. Data citra yang bagus ialah minim dengan tutupan awan sehingga bagian permukaan dapat diinterpretasikan.
- 4) Koreksi radiometrik ToA data citra yang dipilih akan dilakukan koreksi radiometrik ToA yang bertujuan untuk menghilangkan efek dari perubahan intensitas cahaya yang terekam pada permukaan bumi. Algoritmanya adalah data citra Landsat 9 masih bersifat DN sehingga dengan koreksi radiometrik ToA menghasilkan reflektansi.
- 5) Konversi ToA menjadi BT Koreksi Radiometrik ToA masih dalam radian spektral sehingga diperlukan konversi menjadi suhu kecerahan menggunakan konstanta termal pada *band 10*.
- 6) Pembuatan data NDVI Pembuatan data NDVI bertujuan untuk merepresentasikan indeks kepadatan vegetasi pada daerah penelitian. Perhitungan NDVI melibatkan perbandingan antara reflektansi cahaya inframerah dekat (*Near Infrared*) dan reflektansi cahaya merah (*Red*).
- 7) Perhitungan PV perhitungan vegetasi proporsional diperoleh melalui estimasi NDVI. Sederhananya, perhitungan PV dilakukan dengan melibatkan perbandingan indeks keseluruhan vegetasi yang dikurang indeks minimum vegetasi terhadap pengurangan indeks maksimum dan minimum vegetasi yang dilihat dari feature properties data NDVI, dimana perbandingan tersebut dikuadratkan.
- 8) Pembuatan data LST nilai BT yang terkonversi dengan ToA dapat diekstraksi dengan nilai emisivitas untuk memperoleh data LST. Pembuatan data LST pada penelitian ini, melibatkan algoritma estimasi nilai emisivitas berdasarkan data NDVI, kemudian dihitung menggunakan nilai BT pada *band 10*.
- 9) *Raster ClipFormat* data pada pengolahan data citra Landsat 9 bersifat raster sehingga perlu dipotong menggunakan raster clip tool berdasarkan kawasan penelitian. Tujuannya agar data tersebut fokus

pada daerah penelitian secara detail sehingga yang bukan daerah penelitian dapat dihilangkan.

- 10) *Layouting maps data* citra yang sudah dipotong dapat dilakukan *layouting maps* dengan tujuan untuk memudahkan pembaca melihat peta berdasarkan hasil yang telah diperoleh agar dapat membaca informasi di dalam peta. Peta yang di layout adalah peta NDVI, dan LST.

B. Peta *Fault Fracture Density* (FFD) diperoleh dari pengolahan data DEM SRTM yang diunduh dari USGS pada *Google Earth Engine* melalui tahapan sebagai berikut:

- 1) Pengambilan data citra DEM SRTM dan DEMNAS pada wilayah Gunung Talang dilakukan untuk memperoleh informasi ketinggian dan bentuk morfologi permukaan yang berhubungan dengan struktur geologi. Data ini digunakan untuk menganalisis pola sesar dan rekahan (FFD) yang menjadi jalur potensial migrasi fluida panas bumi. DEM SRTM yang digunakan memiliki resolusi spasial 30 m, sehingga satu piksel mewakili area $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ atau seluas 900 m^2 ($0,0009\text{ km}^2$). Dengan luas wilayah Kawasan Gunung Talang yang diambil sebesar $\pm 2.504\text{ km}^2$, jumlah piksel DEM secara teoritis mencapai sekitar 2.752.911 piksel.
- 2) Visualisasi *hillshade* dengan variasi azimuth untuk meningkatkan visualisasi morfologi permukaan pada data citra DEM wilayah penelitian menggunakan *hillshade tools* pada QGIS.
- 3) Penarikan pola kelurusan atau *lineament* secara manual pada *hillshade*.
- 4) Penggunaan *line density tools* pada QGIS untuk menentukan nilai kerapatan struktur geologi (FFD) pada wilayah penelitian.
- 5) Pemetaan FFD dengan QGIS, yang berkorelasi dengan anomali termal untuk menentukan keterkaitan antara struktur geologi dan aktivitas panas bumi

C. Integrasi Data Geospasial

Tahap ini bertujuan untuk mengintegrasikan berbagai analisis geospasial guna menghasilkan peta potensi panas bumi. Proses integrasi ini

menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk memberikan bobot pada setiap parameter berdasarkan signifikansinya dalam mengidentifikasi potensi panas bumi. Parameter kunci yang dipertimbangkan meliputi:

- 1) NDVI & PV – Nilai NDVI yang rendah menunjukkan degradasi vegetasi akibat aktivitas hidrotermal, yang berfungsi sebagai indikator potensi panas bumi. Analisis ini membantu mengidentifikasi perubahan vegetasi yang mungkin diakibatkan oleh panas bawah permukaan.
- 2) Anomali Suhu Permukaan (LST) – Diperoleh dari citra Landsat 9 TIRS, parameter ini berkorelasi dengan keberadaan sistem panas bumi di wilayah Gunung Talang. Peningkatan suhu permukaan dapat mengindikasikan aktivitas panas bumi yang mendasarinya.
- 3) Struktur geologi berupa sesar dan rekahan diidentifikasi menggunakan DEM SRTM dan digunakan sebagai indikator jalur migrasi fluida panas bumi. Bobot setiap parameter ditentukan berdasarkan tingkat signifikansinya dalam mendeteksi potensi panas bumi. Skor dan bobot akhir disajikan pada Tabel 4.4.

Penyeragaman resolusi spasial dilakukan sebelum tahap integrasi untuk mengatasi perbedaan ukuran data. Data GGMPlus (~200 m) di-*resample* menjadi 30 m menggunakan metode *Bilinear Interpolation* agar setara dengan resolusi Landsat 9 dan DEM SRTM. Hal ini memastikan posisi piksel saling sejajar (*grid alignment*) secara akurat saat dilakukan analisis *overlay*.

4.8.2 Pengolahan Data GGMPlus

Data yang didapat dari web GGMplus berupa data gravitasi yang sudah terkoreksi *free air anomaly* dan data topografi. Data tersebut diproses melalui koreksi Bouguer, koreksi terrain lokal, pembentukan CBA, analisis spektrum radial, upward continuation, dan pengurangan grid untuk memperoleh residual. Interpretasi akhir dilakukan berdasarkan peta regional dan residual.

1. Koreksi Data Gravitasi

Data gravitasi berupa data *longitude*, *latitude*, dan *FAA* dari *GGMplus* diekstrak menggunakan *software MATLAB* dan dibuka menggunakan *Microsoft Excel*, dicocokkan dengan elevasi *DEMNAS*, dan dikonversi ke UTM Zona 47S sebelum koreksi dilakukan.

2. Koreksi *Terrain*

Data koordinat hasil unduhan menggunakan satuan koordinat *geodetic degree*, sedangkan pada tahap koreksi medan dan pengolahan data seterusnya menggunakan koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Data koordinat yang didapat dikonversi menjadi UTM menggunakan *software* Global Mapper. Pada tahap koreksi *terrain* dibutuhkan data Bujur, Lintang dan ketinggian daerah sekitar penelitian yang didapatkan pada *software* Global Mapper dalam satuan UTM menggunakan *SRTM* wilayah penelitian. Data lokasi penelitian (Lintang, bujur, topografi) dan data sekitar lokasi (Bujur, Lintang dan Ketinggian) diolah menggunakan *software Oasis Montaj* dan *Surfer* sehingga didapat nilai koreksi medannya.

3. Koreksi anomali Bouguer

Data *gravity*, koreksi Bouguer, dan *terrain correction* lokal diolah di *Oasis Montaj* untuk membentuk CBA. Grid CBA kemudian dibuat dengan ukuran sel 200 m dan digunakan untuk analisis spektrum radial serta pemisahan regional-residual.

4. Pemisahan Anomali Residual & Regional

Grid CBA 200 m yang telah terbentuk masih memuat komponen regional, residual, dan frekuensi tinggi. Pengolahan dilakukan di *Oasis Montaj* melalui *Prepare Grid*, *Forward FFT*, *Radial Average Spectrum*, dan pengujian regresi di Excel. Cutoff utama diperoleh sebesar 0,128874 cycles/km. Selanjutnya dilakukan uji *upward continuation* pada 1.000, 1.500, dan 2.000 m. Tinggi 1.500 m dipilih sebagai regional utama berdasarkan kestabilan pola dan penurunan standar deviasi, sedangkan residual dihitung dengan Grid Math: CBA - Regional.

4.8.3 Pembobotan Parameter dengan Analytical Hierarchy Procees (AHP)

Integrasi dari keempat parameter dilakukan dengan memberikan bobot pengaruh masing-masing parameter menggunakan metode *Analytical Hierarchy*

Process (AHP). Penentuan bobot diawali dengan penyusunan matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*) berskala 1 hingga 9. Nilai 1 pada diagonal utama matriks merupakan aksioma logis yang menunjukkan bahwa suatu parameter memiliki tingkat kepentingan yang sama secara absolut (*equal importance*) ketika dibandingkan dengan dirinya sendiri. Penentuan skala perbandingan antar-parameter didasarkan pada hierarki kontrol sistem panas bumi. Parameter bawah permukaan, yaitu anomali Gaya Berat dan FFD, ditetapkan sebagai kriteria kontrol utama dengan nilai kepentingan tertinggi dan setara. Keberadaan sumber panas dan jalur permeabilitas merupakan syarat mutlak yang mengontrol sistem panas bumi secara langsung. Sebaliknya, parameter penginderaan jauh yang terdiri atas LST dan NDVI diposisikan sebagai parameter pendukung dengan hierarki yang lebih rendah. Manifestasi optis dan termal di permukaan rentan terhadap distorsi lingkungan (*noise*) seperti variasi topografi, tingkat kelembapan, dan tutupan awan. Di antara parameter permukaan tersebut, NDVI diberikan bobot terendah karena memiliki tingkat ambiguitas yang tinggi, mengingat stres vegetasi dapat disebabkan oleh faktor eksternal di luar aktivitas panas bumi.

Bobot akhir dari setiap parameter diperoleh melalui perhitungan komputasi matematis berupa nilai *Eigenvector* dari matriks perbandingan yang telah dinormalisasi. Untuk memastikan bahwa justifikasi perbandingan antar-parameter bersifat logis dan rasional, dilakukan pengujian validitas matematis melalui perhitungan *Consistency Ratio* (CR). Nilai CR dihitung dengan membandingkan *Consistency Index* (CI) terhadap *Random Index* (RI), jumlah parameter yang diintegrasikan dalam penelitian ini adalah sebanyak empat kriteria ($n=4$) nilai *Random Index* (RI) 0.90, syarat mutlak keberterimaan pembobotan dalam metode AHP adalah nilai $CR < 0.1$. Setelah bobot parameter AHP tervalidasi oleh uji konsistensi (dengan syarat $CR < 0.1$), tahapan selanjutnya adalah integrasi spasial (*spatial overlay*) menggunakan algoritma *Weighted Linear Combination* (WLC) di dalam perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Persamaan matematis WLC yang diaplikasikan untuk menghasilkan Peta Prospek Panas Bumi (*Geothermal Prospect Map*).

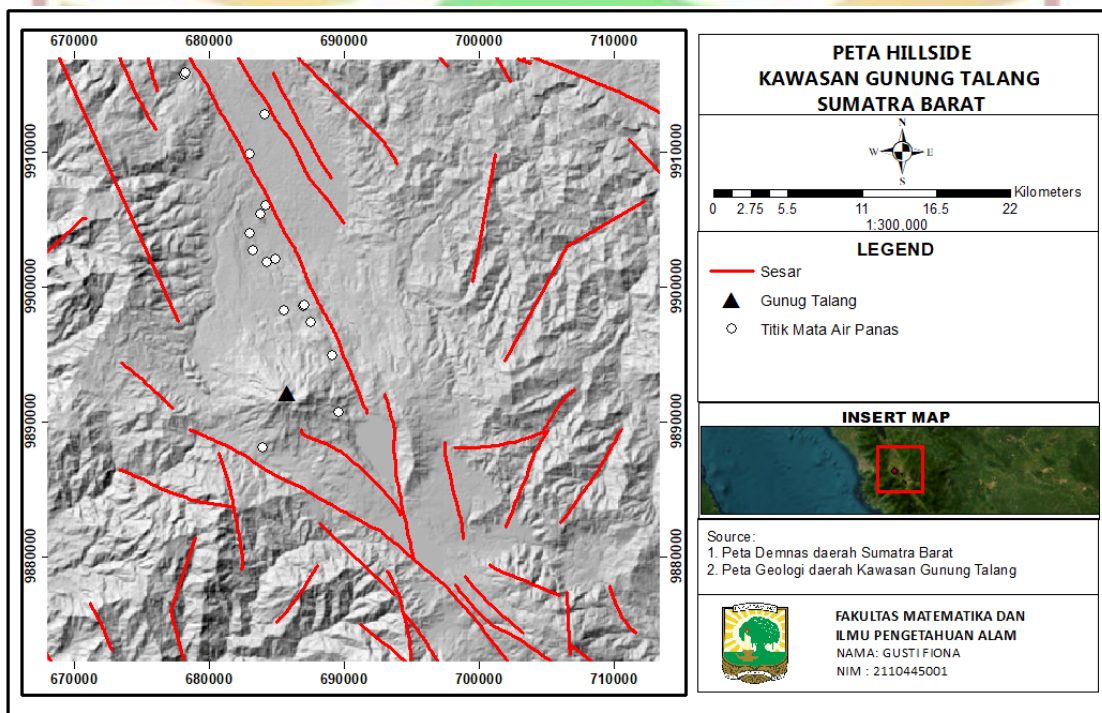


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Peta DEMNAS (*Hillshade*)

Peta visualisasi pada Gambar 4.1. berikut menampilkan morfologi permukaan kawasan Gunung Talang berbasis citra *hillshade*, lengkap dengan lokasi titik-titik manifestasi panas bumi yang teridentifikasi di area penelitian. Citra *hillshade* ini dimanfaatkan sebagai acuan dasar dalam ekstraksi kelurusan, khususnya di wilayah yang berdekatan dengan titik manifestasi tersebut.



Gambar 4. 1 Citra *hillshade* kawasan Gunung Talang dan sebaran titik manifestasi panas bumi.

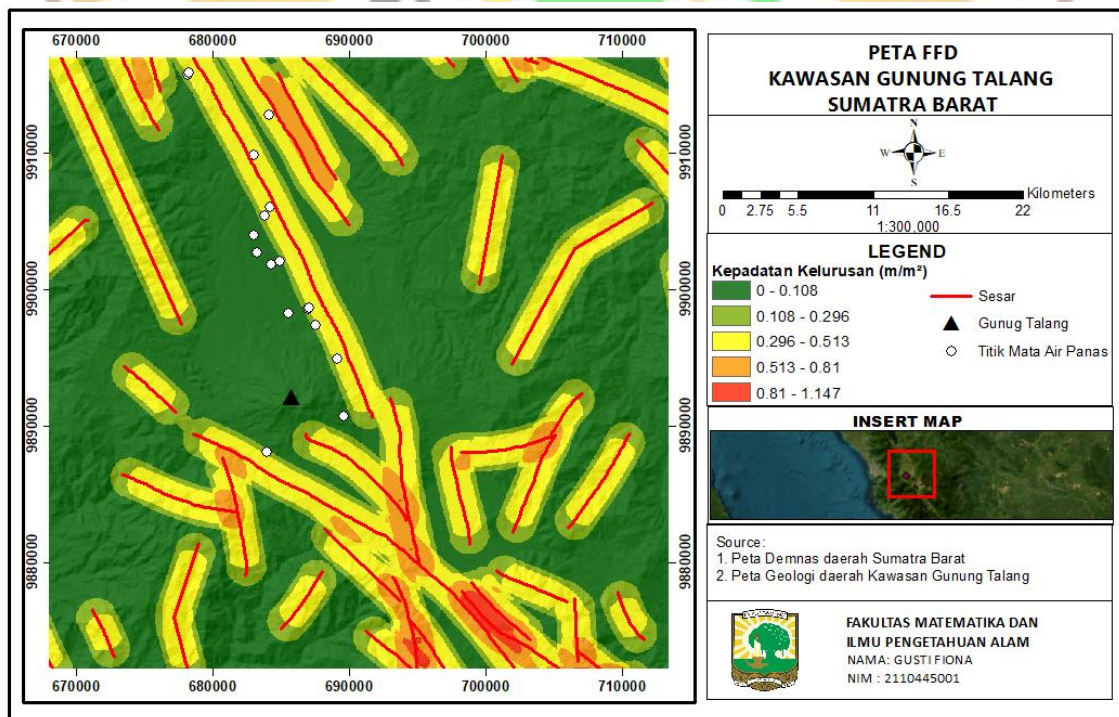
Gambar 4.1 menampilkan hasil citra *hillshade* pada koordinat 670000-710000 mE dan 9880000-9910000 mN. Pola relief menunjukkan adanya punggung, lembah, dan depresi yang membentuk kelurusan dominan di area barat laut-tenggara (NW-SE), disertai kelurusan sekunder di area barat daya-timur laut (SW-NE) dan utara-selatan (N-S). Titik manifestasi panas bumi berupa mata air panas pada bagian kawasan Gunung Talang dan berada dekat dengan zona kelurusan. Hidayat dkk. (2023) juga memperoleh orientasi kelurusan dominan NW-

SE pada prospek Bukit Kili-Gunung Talang dan mengaitkannya dengan struktur geologi regional. Kesamaan arah tersebut memperkuat bahwa pola *hillshade* penelitian ini merepresentasikan kendali morfostruktur regional, meskipun penarikan kelurusan tetap dipengaruhi resolusi DEM dan arah penyinaran.

Secara geologi, hubungan ini penting karena kelurusan morfologi dapat merepresentasikan sesar, rekahan, atau batas litologi yang menjadi jalur permeabel bagi migrasi atau zona *upflow* fluida hidrotermal. Area yang menunjukkan perpotongan kelurusan dan manifestasi diperlakukan sebagai kandidat jalur fluida, kemudian dilakukan uji lebih lanjut menggunakan FFD, LST, NDVI, ABL, anomali regional, dan anomali residual.

4.2. Fault and Fracture Density (FFD)

Analisis *Fault and Fracture Density* (FFD) dilakukan untuk mengidentifikasi distribusi kepadatan struktur geologi yang mengontrol permeabilitas batuan dan jalur migrasi fluida hidrotermal pada sistem panas bumi Gunung Talang.



Gambar 4. 2 Peta *Fault and Fracture Density* (FFD) kawasan Gunung Talang

FFD dihitung dari hasil interpretasi kelurusan pada citra *hillshade* DEMNAS dan dikorelasikan dengan struktur geologi regional. Parameter ini penting dikarenakan dalam sistem panas bumi vulkanik, keberadaan sesar dan rekahan bukan hanya menunjukkan kerusakan batuan, tetapi juga menyediakan jalur naiknya fluida panas dari kedalaman menuju zona dangkal dan manifestasi permukaan.

Gambar 4.2 menunjukkan lima kelas FFD, yaitu 0-0,108 km/km², 0,108-0,296 km/km², 0,296-0,513 km/km², 0,513-0,81 km/km², dan 0,81-1,147 km/km². Kelas tinggi hingga sangat tinggi berpusat pada area perpotongan struktur di sekitar Gunung Talang serta beberapa segmen di bagian barat sampai utara. FFD bernilai tinggi dikarenakan total panjang kelurusan per satuan luas lebih besar, yang mencerminkan deformasi, rekahan, atau sesar yang lebih rapat. Sebaliknya FFD rendah mendominasi area di luar struktur sesar dan menunjukkan batuan yang relatif lebih utuh atau kelurusan yang tidak terekam jelas pada DEMNAS.

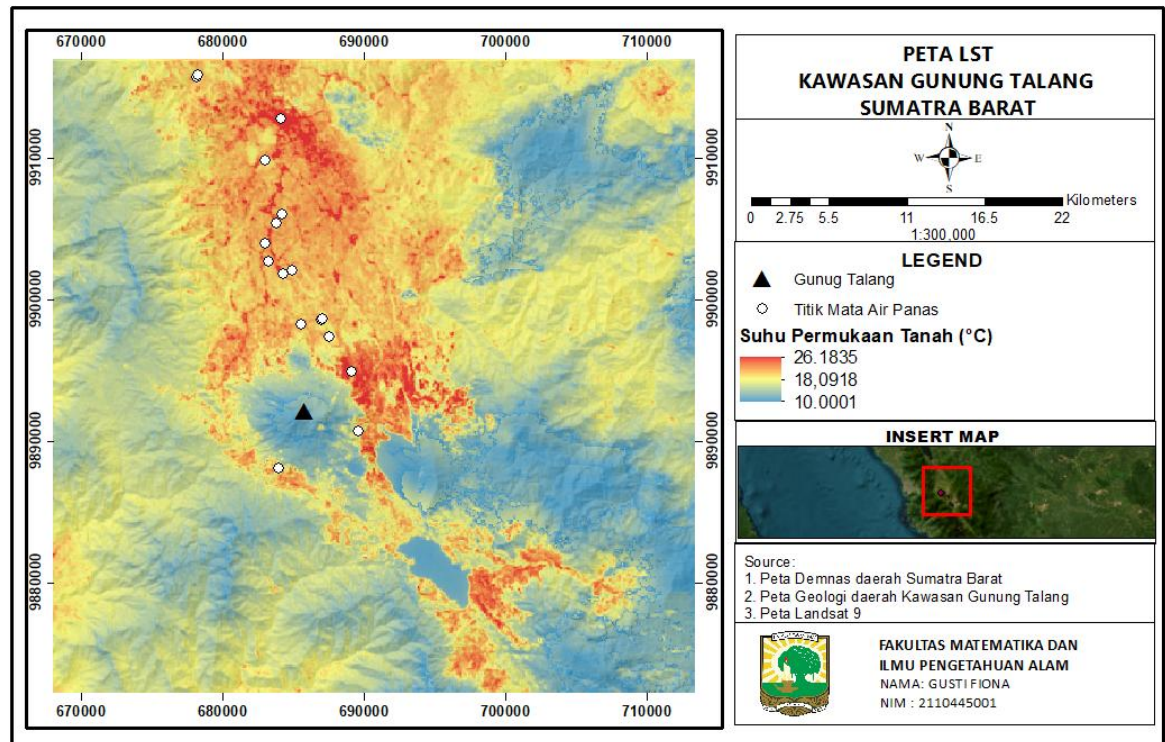
Dalam sistem panas bumi, FFD 0,81-1,147 km/km² merupakan indikator peluang permeabilitas sekunder, bukan bukti langsung reservoir. Hidayat dkk. (2023) menafsirkan potensi Bukit Kili-Gunung Talang melalui hubungan antara FFD, LST, dan manifestasi panas bumi. Oleh karena itu, kelas FFD tinggi pada penelitian ini baru dianggap semakin signifikan apabila berimpit dengan LST relatif tinggi, NDVI rendah di luar badan air, anomali gravitasi residual, sesar, dan manifestasi.

4.3. Land Surface Temperature (LST) dan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

4.3.1. Land Surface Temperature (LST)

Berdasarkan hasil pengolahan citra Landsat 9, distribusi nilai *Land Surface Temperature* (LST) di kawasan Gunung Talang dimanfaatkan untuk memetakan variasi suhu permukaan. Variasi tersebut dapat dipengaruhi oleh pelbagai faktor, seperti tutupan lahan, kondisi topografi, keberadaan badan air, hingga aktivitas

termal di bawah permukaan.



Gambar 4. 3 Peta *Land Surface Temperature* (LST) kawasan Gunung Talang

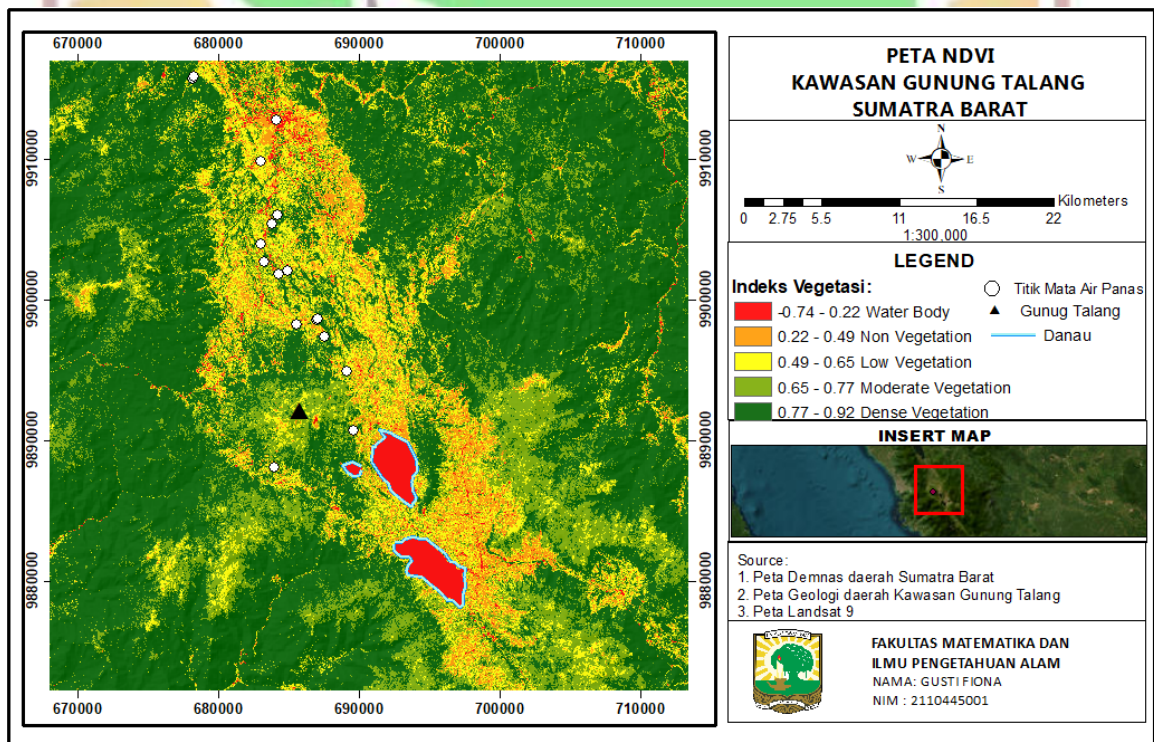
Gambar 4.3 memperlihatkan LST sebesar 10,0001-26,1835 °C. Nilai yang mendekati 26,1835 °C terutama berkembang pada area tengah-utara yang berdekatan dengan beberapa pemandian mata air panas dan pada jalur selatan-tenggara. Advilah (2024) memperoleh LST 14,98-24,48 °C pada Bukit Kili-Gunung Talang. Perbedaan hasil rentang suhu yang didapat dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya yaitu perbedaan waktu perekaman, tutupan awan, koreksi citra, musim, elevasi, dan batas wilayah. Walaupun hasil yang didapatkan berbeda, kedua penelitian menunjukkan bahwa anomali suhu tinggi di sekitar manifestasi lebih relevan dibandingkan suhu tinggi yang berdiri sendiri.

Nilai tinggi dapat disebabkan oleh lahan terbuka, kadar air permukaan rendah, singkapan batuan vulkanik, perbedaan elevasi dan penyinaran, maupun pelepasan panas hidrotermal dangkal. Nilai mendekati 10,0001 °C terdapat pada tubuh Gunung Talang hal tersebut dapat terjadi dikarenakan adanya elevasi tinggi, badan air, area lembap, dan sebagian yang terletak pada area sisi timur-tenggara.

Anomali LST menjadi indikator penting untuk panas bumi apabila nilai tinggi berimpit dengan nilai FFD tinggi, NDVI rendah, sesar, dan manifestasi. Kombinasi tersebut menunjukkan permukaan hangat pada zona terekahkan dengan vegetasi jarang atau terganggu. Jika LST tinggi berdiri sendiri pada FFD rendah dan jauh dari manifestasi, penyebab non-geothermal seperti lahan terbuka dan pemanasan matahari atau radiasi matahari, sebaliknya jika LST rendah pada puncak atau badan air tidak memungkinkan adanya sistem panas bumi dikarenakan elevasi, kelembapan, tutupan vegetasi, dan tutupan awan lebih dari $\pm 15\%$ yang dapat menutupi respons termal permukaan.

4.3.2. *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) pada kawasan Gunung Talang Gambar 4.4 parameter ini digunakan untuk menilai variasi kerapatan vegetasi berdasarkan respons spektral kanal merah dan inframerah dekat pada citra Landsat 9.

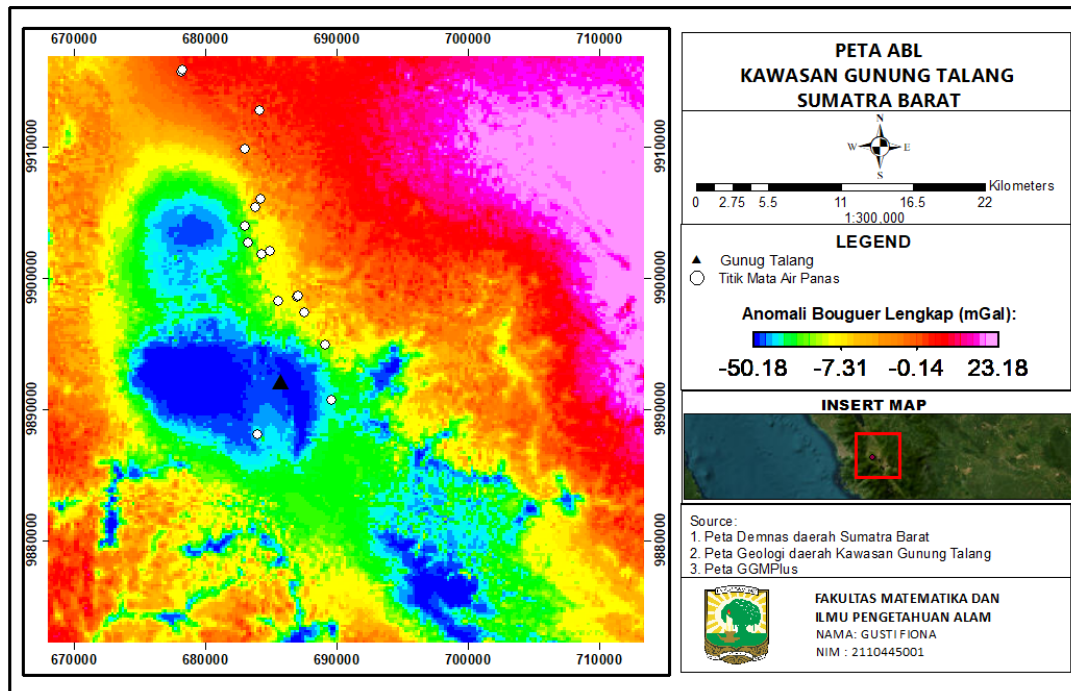


Gambar 4. 4 Peta *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* kawasan Gunung Talang

Gambar 4.4 membagi NDVI menjadi lima kelas, yaitu -0,74-0,22 sebagai badan air, 0,22-0,49 sebagai nonvegetasi, 0,49-0,65 sebagai vegetasi rendah, 0,65-0,77 sebagai vegetasi sedang, dan 0,77-0,92 sebagai vegetasi rapat. Kelas non vegetasi 0,22-0,65 membentuk area pada tengah-utara hingga selatan-tenggara dan muncul beberapa di sekitar lahan terbuka permukiman, sedangkan kelas 0,77-0,92 mendominasi kawasan berhutan di bagian luar. NDVI rendah dapat disebabkan oleh singkapan batuan, material vulkanik, penggunaan lahan, kekeringan, atau alterasi hidrotermal. Penggunaan NDVI sebagai pengontrol LST sesuai dengan Hidayat dkk. (2023) dan Advillah (2024) pada Bukit Kili-Gunung Talang, yang menunjukkan bahwa tutupan vegetasi rendah dapat menimbulkan suhu permukaan tinggi meskipun tidak berkaitan langsung dengan manifestasi panas bumi.

NDVI 0,22-0,65 yang berimpit dengan LST tinggi, FFD tinggi, dan jalur sesar memperkuat dugaan zona pelepasan panas, alterasi, atau migrasi fluida. NDVI rendah tanpa LST dan FFD yang mendukung lebih mungkin berkaitan dengan lahan terbuka atau aktivitas manusia. NDVI tinggi 0,77-0,92 bersama LST rendah menunjukkan vegetasi sehat dan dapat berkaitan dengan area *recharge*, tetapi bukan target utama manifestasi termal permukaan. Karena itu, arah hubungan NDVI dengan prospek bersifat terbalik nilai lebih rendah diberi skor lebih tinggi hanya setelah badan air dan penyebab non-geotermal disaring.

4.4. Anomali Bouguer Lengkap (ABL)



Gambar 4. 5 Peta Anomali Bouguer Lengkap (ABL) kawasan Gunung Talang.

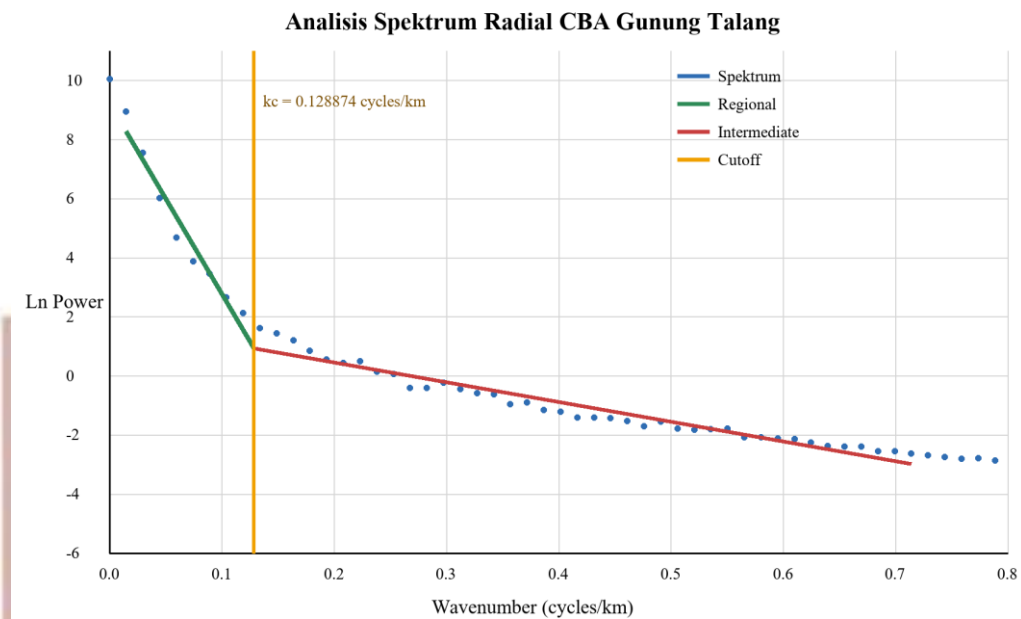
Gambar 4.5 menunjukkan nilai ABL yang di dapatkan sebesar -50,18 mGal dan 23,18 mGal, dengan nilai acuan kelas pada -7,31 mGal dan -0,14 mGal. Anomali rendah hingga sangat rendah, yang ditampilkan dengan warna biru-biru muda, membentuk depresi utama di sekitar Gunung Talang dan memanjang ke arah barat, serta membentuk zona depresi di utara Gunung Talang dan bagian tenggara. Anomali nilai menengah berwarna hijau-kuning mengelilingi zona depresi tersebut, sedangkan anomali relatif tinggi berwarna jingga-merah-merah muda mendominasi bagian utara, timur laut, dan tepi timur.

Secara fisis, anomali ABL relatif tinggi mencerminkan kecenderungan massa batuan yang lebih padat, seperti batuan vulkanik yang tersusun rapat, batuan basement, atau adanya intrusi, sedangkan anomali negatif yang rendah dapat berkaitan dengan material vulkanik yang kurang rapat, depresi, batuan terekahkan, atau zona alterasi. Titik mata air panas pada peta berkembang pada sisi utara hingga timur laut dan mengikuti depresi ABL utama dan mengikuti zona perubahan warna biru-hijau-kuning. Posisi pada tepi anomali ini menunjukkan bahwa adanya gradien densitas dan struktur pembatas lebih relevan bagi migrasi fluida dibandingkan pusat

anomali saja. Pola tersebut sejalan dengan Idral (2011), yang melaporkan anomali Bouguer dan residual rendah di sekitar kompleks mata air panas Cupak dan Gabuo, serta dengan Adivadilah (2024), yang menghubungkan pola gravitasi Gunung Talang-Bukit Kili dengan kelurusan struktur regional. ABL tetap tidak digunakan secara langsung untuk menetapkan reservoir karena respons berbagai kedalaman masih saling bertumpuk.

4.5. Radial Average Power Spectrum (RAPS).

Pemisahan kelompok sumber dilakukan menggunakan *Radial Average Power Spectrum* (RAPS). Grid ABL ditransformasikan dari domain spasial ke domain bilangan gelombang dengan *Fast Fourier Transform*, kemudian spektrum daya dirata-ratakan secara radial. Cahyati (2025) menggunakan spektrum radial untuk mengenali perubahan kemiringan kurva sebagai batas kelompok sumber gravitasi. Sumber panjang yang berada lebih dalam umumnya menghasilkan respons gravitasi yang menyebar pada area lebih luas dan berubah secara bertahap di permukaan. Respons tersebut dicirikan oleh gelombang panjang dan frekuensi spasial rendah. Sebaliknya, sumber yang lebih dangkal menghasilkan respons yang lebih terlokalisasi dan mengalami perubahan nilai dalam jarak pendek, sehingga dicirikan oleh panjang gelombang pendek dan frekuensi spasial tinggi. Hubungan tersebut digunakan dalam analisis spektrum untuk membedakan kelompok sumber regional, intermediate, dan dangkal. (Njinju dkk., 2019; Tchoukeu dkk., 2021).



Gambar 4. 6 Grafik *Radial Average Power Spectrum*, regresi, dan *cutoff*

Grafik RAPS pada Gambar 4.6 dibagi menjadi tiga domain. Domain regional berada pada bilangan gelombang 0,014881-0,119048 siklus/km, dengan *slope* (ukuran kemiringan garis regresi) -64,4324, *intercept* 9,2326, koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9559, dan kedalaman ekuivalen 5,127 km. Domain *intermediate* berada pada 0,133929-0,714286 siklus/km, dengan *slope* -6,6974, *intercept* 1,7921, R^2 sebesar 0,9455, dan kedalaman ekuivalen 0,533 km. Domain dangkal berada pada 0,729167-2,291670 siklus/km, dengan *slope* -1,4308, *intercept* -2,0041, R^2 sebesar 0,9696, dan kedalaman ekuivalen sekitar 0,114 km.

Kedalaman 5,127 km merepresentasikan kedalaman rata-rata sumber regional sebagai kedalaman pasti sumber panas. Kedalaman 0,533 km mewakili sumber *intermediate* atau dangkal-menengah, sedangkan kedalaman sekitar 0,114 km dapat merepresentasikan sumber sangat dangkal, variasi litologi permukaan, dan *noise*. Perpotongan regresi regional dan *intermediate* menghasilkan nilai *cutoff* 0,128874 siklus/km atau panjang gelombang 7,7595 km. Batas *intermediate*-dangkal berada sekitar 0,721 siklus/km. Dengan demikian, nilai di bawah *cutoff* utama digunakan sebagai regional, sedangkan komponen di atas *cutoff* didominasi sumber *intermediate* dan dangkal. Hasil ini sejalan dengan Cahyati (2025), yang

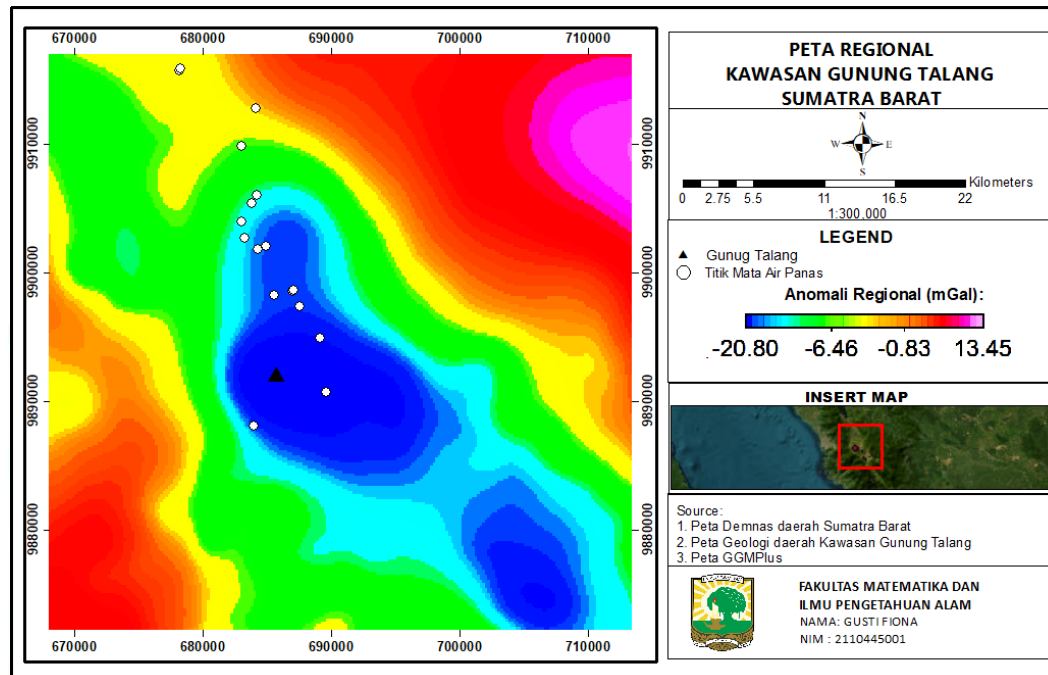
menggunakan kedalaman hasil spektrum untuk menentukan rentang pengujian *upward continuation*.

4.6. Anomali Regional

Setelah kelompok sumber regional didapatkan melalui proses RAPS, *upward continuation* (UC) diterapkan pada grid ABL untuk memperkuat dominasi respons sumber dalam dan melemahkan respons sumber residual atau dangkal. Pengujian dilakukan bertahap pada ketinggian 1.000, 1.500, dan 2.000 m.

Setiap hasil dibandingkan dengan pola regional yang ditunjukkan RAPS dan geometri umum ABL. Kriteria yang digunakan meliputi kesamaan posisi anomali tinggi-rendah, kesinambungan gradien, serta berkurangnya tekstur lokal tanpa mengubah pola utama. Pada UC 1.000 m masih terlihat variasi lokal dan distorsi, terutama di sekitar anomali berwarna biru, sehingga pengaruh sumber *intermediate*-dangkal dinilai masih cukup kuat. Pada UC 1.500 m, pola tinggi-rendah tetap menyerupai ABL dan acuan regional RAPS, sedangkan tekstur berfrekuensi tinggi telah berkurang secara nyata. UC 1.750-2.000 m menghasilkan pola yang lebih halus, tetapi tambahan penghalusan tidak menjadi alasan pemilihan apabila gradien regional mulai melemah atau geometri anomali bergeser.

Kedalaman *intermediate* 0,533 km digunakan untuk membatasi rentang evaluasi secara fisik. Ketinggian sekitar 1,0-1,5 km setara dengan kurang lebih dua sampai tiga kali kedalaman *intermediate*, sehingga layak diuji sebagai rentang peredaman sumber dangkal-menengah. Pemilihan akhir tetap ditentukan oleh kesesuaian pola. Pendekatan ini sejalan dengan Cahyati (2025), yang menguji UC 750, 1.500, dan 2.250 m berdasarkan kedalaman spektrum dan menggunakan hasil 1.500 m untuk pengolahan berikutnya. Purnomo dkk. (2013) juga menunjukkan bahwa mutu pemisahan regional-residual perlu dinilai dari kemiripan kontur dan pola sayatan terhadap metode pembandingan, bukan dari tingkat kehalusan semata. Berdasarkan seluruh pertimbangan tersebut, UC 1.500 m dipilih sebagai anomali regional penelitian ini.



Gambar 4. 7 Peta anomali regional kawasan Gunung Talang.

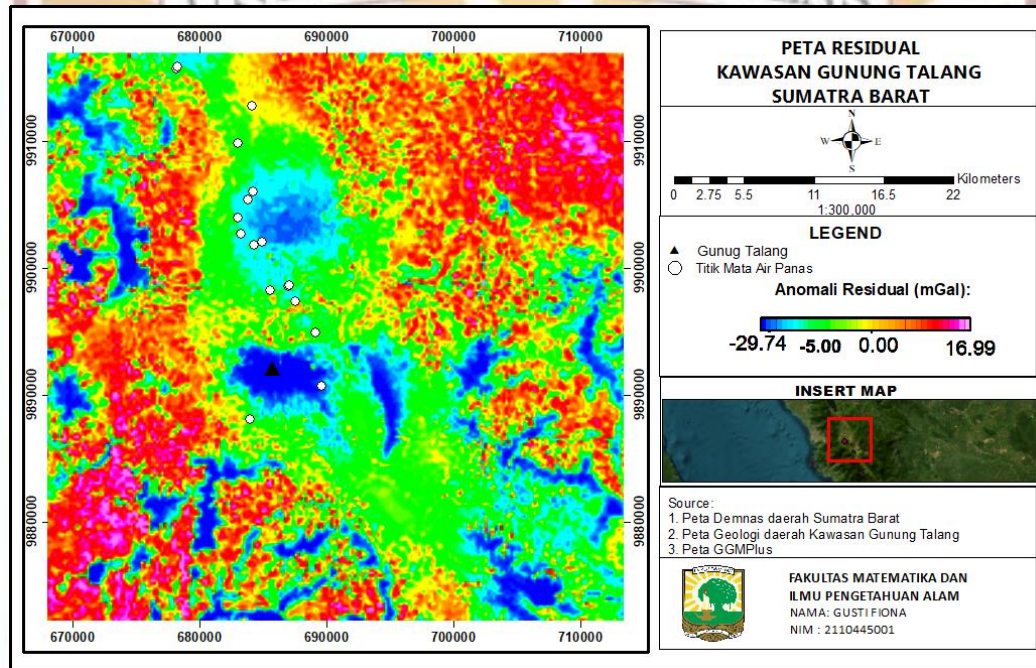
Berdasarkan Gambar 4.7 berkisar antara -20,80 mGal dan 13,45 mGal, dengan nilai acuan -6,46 mGal dan -0,83 mGal. Polanya yang didapat lebih halus dibandingkan ABL, dimana hal ini sesuai dengan sifat UC yang meredam komponen panjang gelombang pendek. Anomali regional rendah berwarna biru membentuk depresi utama yang mencakup Gunung Talang dan memanjang dari utara ke arah barat laut -tenggara, anomali relatif tinggi berwarna jingga-merah-merah muda berkembang di bagian timur laut, tepi timur, dan barat daya wilayah penelitian. Titik mata air panas terutama berada pada sisi utara hingga barat laut depresi utama dan pada zona gradien nilai yang lebih tinggi.

Depresi regional yang mencakup Gunung Talang menunjukkan keberadaan massa batuan dalam dengan densitas relatif lebih rendah atau adanya konfigurasi struktur regional yang menurunkan respons gravitasi. Anomali tinggi di timur laut dan tepi wilayah menunjukkan massa batuan dalam yang relatif lebih padat, tetapi tidak langsung dinyatakan sebagai sumber panas. Posisi manifestasi di sekitar gradien regional memperkuat dugaan bahwa fluida dikontrol oleh batas densitas dan struktur yang menghubungkan sistem dalam dengan permukaan. Pola anomali yang cenderung memanjang dan hubungannya dengan manifestasi sejalan dengan

Adivadilah (2024), yang mengidentifikasi kecenderungan struktur NW-SE di Gunung Talang-Bukit Kili. Interpretasi regional selanjutnya harus dikaitkan dengan FFD, geologi, LST, dan anomali residual.

4.7. Anomali Residual

Distribusi medan gravitasi anomali residual pada kawasan Gunung Talang ditampilkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4. 8 Peta Anomali Residual Kawasan Gunung Talang

Anomali residual pada Gambar 4.8 dihitung melalui pengurangan ABL terhadap regional UC 1.500 m dan merepresentasikan variasi densitas yang lebih dangkal. Gambar 4.8 menampilkan residual dengan nilai minimum -29,74 mGal dan maksimum 16,99 mGal nilai -5,00 mGal dan 0,00 mGal menjadi acuan pada legenda. Residual negatif ditafsirkan sebagai adanya massa dangkal yang relatif kurang padat, sedangkan residual positif menunjukkan adanya massa dangkal yang relatif lebih padat.

Residual negatif berwarna biru berkembang secara lokal di sekitar Gunung Talang, di bagian utara sepanjang jalur manifestasi, di barat laut, serta pada beberapa zona timur dan tenggara. Residual positif berwarna jingga-merah-merah muda lebih dominan pada bagian utara, timur laut, barat daya, dan tepi barat. Titik

mata air panas umumnya berada pada residual negatif sampai zona transisi hijau-kuning, hal tersebut berkaitan dengan batuan vulkanik kurang rapat, rekahan, atau alterasi hidrotermal, sedangkan residual positif dapat merepresentasikan batuan vulkanik yang lebih rapat atau tubuh lokal berdensitas tinggi. Interpretasi ini sejalan dengan Idris (2011), yang melaporkan anomali residual rendah di sekitar mata air panas Cupak dan Gabuo, serta dengan Adivadilah (2024), yang menghubungkan pola gravitasi dan kelurusan NW-SE dengan persebaran manifestasi Gunung Talang-Bukit Kili.

Pola residual yang lebih bertekstur dibandingkan regional menunjukkan bahwa komponen dangkal berhasil dipisahkan oleh UC 1.500 m. Zona prospek tidak ditentukan hanya dari nilai residual paling rendah atau paling tinggi, tetapi dari perpotongan gradien residual dengan FFD tinggi, sesar, LST relatif tinggi, kontrol NDVI, dan manifestasi. Dengan demikian, residual digunakan sebagai parameter heterogenitas densitas dangkal dan kemungkinan jalur struktur, bukan sebagai bukti tunggal keberadaan reservoir.

4.8. Pembobotan Parameter AHP

Pembobotan parameter dilakukan dengan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk menentukan tingkat kepentingan relatif setiap parameter dalam delineasi zona prospek panas bumi. Parameter yang digunakan terdiri atas data gravitasi GGM/Anomali Bouguer Lengkap (ABL), *Fault and Fracture Density* (FFD), *Land Surface Temperature* (LST), dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI).

4.8.1 Menentukan Kriteria Penilaian

Penentuan kriteria dilakukan berdasarkan keterkaitan setiap parameter dengan sistem panas bumi serta kemampuan data tersebut dalam menunjukkan zona prospek secara spasial. Kriteria yang digunakan terdiri atas data gravitasi GGM/Anomali Regional, *Fault and Fracture Density* (FFD), *Land Surface Temperature* (LST), dan *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Dalam penentuan kriteria anomali regional digunakan untuk menggambarkan variasi densitas batuan dalam. Anomali tinggi dapat berkaitan dengan batuan relatif padat atau tubuh intrusi, sedangkan anomali rendah menunjukkan massa batuan

berdensitas lebih rendah. Penilaian kesesuaian diutamakan pada zona gradien antara anomali tinggi dan rendah yang berimpit dengan FFD tinggi, LST relatif tinggi, dan manifestasi karena dapat menunjukkan batas litologi atau struktur penghubung sumber panas dengan permukaan. FFD digunakan sebagai indikator permeabilitas sekunder dan jalur migrasi fluida, sedangkan LST menunjukkan indikasi termal permukaan. NDVI digunakan untuk mengontrol pengaruh vegetasi terhadap LST. Oleh karena itu, seluruh parameter diinterpretasikan secara terpadu karena masing-masing tidak dapat membuktikan keberadaan sistem panas bumi secara tunggal. Berdasarkan hal tersebut didapatkan hasil pembobotan kriteria utama disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Tabel Kriteria

Kriteria
GGM/ABL
FFD
LST
NDVI

4.8.2 Menyusun Hierarki dan Matriks Perbandingan berpasangan

Fase permulaan dalam penerapan metode *Analytical Hierarchy Process* diawali dengan pembentukan struktur hierarki yang merujuk pada sasaran, parameter, serta pilihan solusi yang tersedia. Variabel penentu yang dilibatkan dalam kajian ini mencakup Anomali Regional, *Fault and Fracture Density (FFD)*, *Land Surface Temperature (LST)*, serta *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*. Tahap berikutnya mencakup komparasi antarparameter secara berpasangan guna menetapkan bobot kepentingan relatif di antara masing-masing kriteria, dengan susunan matriks perbandingan berpasangan yang dijabarkan sebagai berikut:

Kriteria	GGM	FFD	LST	NDVI	Bobot Eigen
GGM	1	1	1,2	2	0.3
FFD	1	1	1,2	2	0.3
LST	0,83	0,83	1	1,5	0.25
NDVI	0,5	0,5	0,67	1	0.15
TOTAL	3.33	3.33	4.07	6.5	1

Seluruh elemen yang terletak pada diagonal utama matriks ditetapkan bernilai satu dikarenakan setiap parameter dikomparasikan langsung dengan kriteria yang identik. Di sisi lain, penentuan besaran nilai perbandingan antarvariabel penentu senantiasa berpedoman pada kaidah resiprokal sebagaimana tertuang dalam Persamaan 2.19.

4.8.3 Normalisasi dan Penentuan Bobot Prioritas

Selanjutnya, proses normalisasi terhadap matriks perbandingan berpasangan dieksekusi dengan cara membagi setiap komponen di dalam kolom dengan nilai total penjumlahan dari kolom tersebut, di mana hasil perhitungan normalisasi matriks perbandingan berpasangan ini ditampilkan secara rinci pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Hasil Bobot Prioritas

Kriteria	GGM	FFD	LST	NDVI	Bobot Prioritas
GGM	0,300	0,300	0,295	0,308	0,30
FFD	0,300	0,300	0,295	0,308	0,30
LST	0,249	0,249	0,246	0,231	0,25
NDVI	0,150	0,150	0,165	0,154	0,15
TOTAL	1,000	1,000	1,000	1,000	1,00

Berdasarkan hasil perhitungan, bobot prioritas yang diperoleh adalah GGM/ABL sebesar 0,30. FFD sebesar 0,30. LST sebesar 0,25. NDVI sebesar 0,15.

4.8.4 Perhitungan Nilai Eigen dan Uji Konsistensi

Setelah bobot prioritas diperoleh, tahap selanjutnya adalah menghitung nilai eigen dan melakukan uji konsistensi terhadap matriks perbandingan berpasangan. Nilai *weighted sum*. Hasil perhitungannya adalah pada Tabel 4.3.

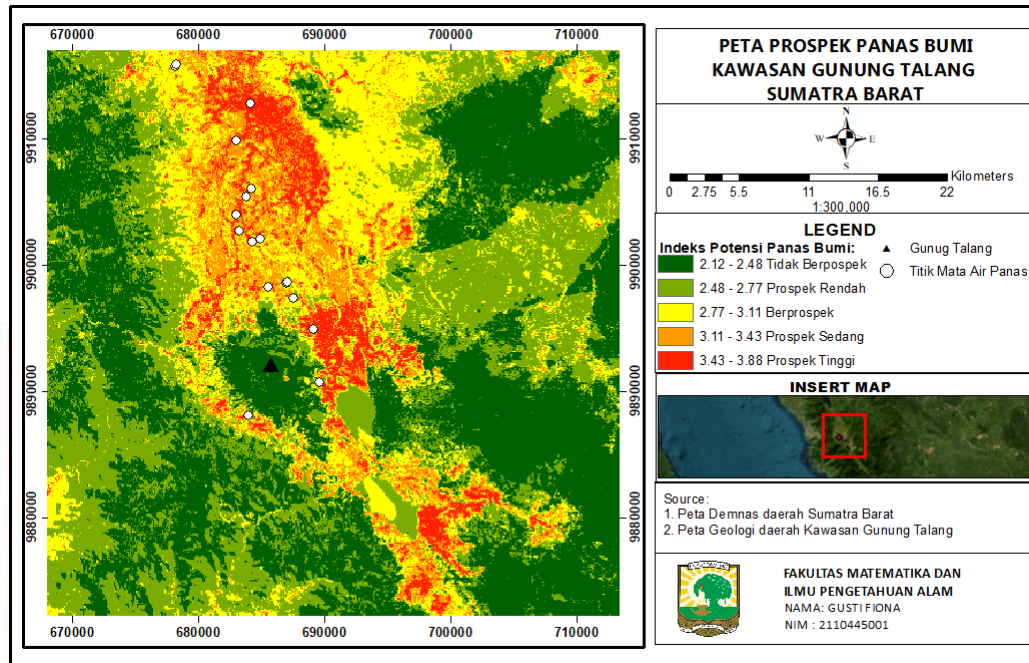
Tabel 4. 3 Perhitungan Eigen dan Uji Konsistensi

Kriteria	Weighted sum	Bobot	λ_i
GGM	1.200	0.3	4.000
FFD	1.200	0.3	4.000
LST	0.973	0.25	3.892
NDVI	0.618	0.15	4.117

Berdasarkan hasil perhitungan nilai eigen maksimum didapatkan nilai sebesar 4,002. Nilai tersebut digunakan untuk menentukan tingkat konsistensi penilaian antar kriteria, perhitungan nilai *Consistency Index* (CI) didapatkan sebesar 0,0007. Karena digunakan empat kriteria, nilai *Random Index* (RI) yang digunakan adalah 0,90 sehingga diperoleh nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,0008. Nilai CR tersebut lebih kecil daripada batas penerimaan 0,10, sehingga matriks perbandingan berpasangan dinyatakan sangat konsisten. Dengan demikian, bobot prioritas yang dihasilkan dapat digunakan dalam proses pembobotan dan analisis WLC untuk menentukan zona kesesuaian panas bumi.

4.9. Pemetaan Zona Prospek Panas Bumi

Delineasi zona prospek panas bumi kawasan Gunung Talang berdasarkan integrasi parameter FFD, LST, NDVI, anomali regional ditunjukkan pada Gambar 4.9. Peta ini merupakan sintesis spasial dari indikator permeabilitas, temperatur permukaan, respons vegetasi, dan densitas bawah permukaan. Oleh karena itu, interpretasi prospek tidak didasarkan pada warna peta saja, tetapi pada rentang nilai dan kesesuaian geologi antar parameter. Peta prospek panas bumi pada Gambar 4.9 merupakan hasil integrasi spasial menggunakan metode *Weighted Linear Combination* (WLC).



Gambar 4. 9 Peta delineasi zona prospek panas bumi kawasan Gunung Talang.

Gambar 4.9 membagi skor prospek menjadi lima kelas, indeks 2,12-2,48 merupakan kelas tidak berprospek, 2,48-2,77 merupakan prospek rendah, 2,77-3,11 merupakan kelas berprospek, 3,11-3,43 merupakan prospek sedang, dan 3,43-3,88 merupakan prospek tinggi. Zona prospek tinggi berwarna merah berada pada bagian tengah-utara wilayah penelitian dan mengikuti jalur yang memanjang ke arah selatan hingga tenggara. Zona prospek sedang berwarna jingga mengelilingi dan menghubungkan beberapa bagian zona prospek tinggi, sedangkan kelas berprospek berwarna kuning membentuk zona transisi yang lebih luas. Sebagian besar titik mata air panas berada pada kelas prospek sedang sampai tinggi atau. Area di sekitar puncak Gunung Talang tidak seluruhnya termasuk prospek tinggi. Kelas tidak berprospek hingga prospek rendah masih berkembang di sekitar puncak gunung dan pada sebagian besar tepi barat, timur laut, timur, serta selatan wilayah penelitian. Hasil ini menunjukkan bahwa target prospek tidak selalu berada tepat pada pusat gunung api. Zona yang lebih sesuai justru berkembang pada lereng dan orientasi struktural di sekitarnya, terutama pada lokasi tempat indikator anomali regional, kerapatan rekahan, suhu permukaan, dan kondisi vegetasi saling mendukung.

Anomali regional memberikan informasi mengenai kerangka densitas sumber dalam, FFD menunjukkan peluang terbentuknya jalur permeabilitas, LST

memberikan indikasi termal relatif di permukaan, sedangkan NDVI mengontrol pengaruh vegetasi terhadap suhu permukaan. Oleh karena itu, zona prospek tinggi ditafsirkan sebagai area yang memiliki kesesuaian lebih besar bagi hubungan sumber panas dalam, struktur pengalir fluida, dan indikasi permukaan. Kelas rendah menunjukkan bahwa indikator tersebut tidak lengkap atau tidak menempati lokasi yang sama.

Pola zona prospek yang memanjang dan berimpit dengan sejumlah manifestasi sejalan dengan Adivadilah (2024), yang mengidentifikasi kelurusan dominan barat laut-tenggara serta hubungan manifestasi Gunung Talang-Bukit Kili dengan zona struktur. Hasil ini juga mendukung Hidayat dkk. (2023), yang menunjukkan bahwa interpretasi panas bumi di kawasan tersebut perlu mempertimbangkan keterkaitan FFD, LST, kondisi vegetasi, dan manifestasi. Dengan demikian, pola prospek yang diperoleh tidak hanya merupakan hasil penjumlahan matematis, tetapi mempunyai kesesuaian dengan kondisi geologi dan temuan penelitian sebelumnya.

Berdasarkan keseluruhan hasil, kelas prospek tinggi 3,43-3,88 menjadi prioritas utama untuk survei lanjutan, terutama pada koridor tengah-utara yang berimpit dengan kelompok manifestasi dan pada jalur yang menerus ke tenggara. Kelas prospek sedang 3,11-3,43 menjadi target sekunder karena dapat berfungsi sebagai zona perluasan dari target utama. Makna geotermal ditentukan berdasarkan keterkaitan seluruh parameter, bukan dari satu indikator secara terpisah. Zona dengan FFD tinggi, LST relatif tinggi, NDVI yang sesuai dengan kondisi manifestasi, serta anomali regional dan gradiennya yang mendukung memperoleh tingkat kesesuaian lebih tinggi karena menunjukkan kemungkinan hubungan antara struktur permeabel, indikasi panas permukaan, kondisi vegetasi, dan kerangka densitas bawah permukaan. FFD tinggi secara tunggal hanya menunjukkan peluang permeabilitas struktural, sedangkan LST tinggi dapat dipengaruhi oleh lahan terbuka, permukiman, kelembapan, atau elevasi. NDVI rendah juga tidak selalu berkaitan dengan panas bumi karena dapat menunjukkan badan air, lahan terbuka, atau perubahan tutupan lahan. Anomali regional tinggi terutama menunjukkan massa batuan dalam yang relatif lebih padat dan tidak dapat langsung ditafsirkan

sebagai reservoir atau sumber panas. Apabila indikator permukaan mendukung dan anomali regional tinggi berada berdekatan dengan zona gradien serta FFD tinggi, target yang lebih logis adalah rekahan atau kontak batuan di sekitar massa padat tersebut, bukan pusat anomalnya. Sebaliknya, wilayah dengan nilai rendah pada sebagian besar parameter memiliki prioritas eksplorasi yang lebih rendah karena tidak menunjukkan keterkaitan kuat antara struktur, panas permukaan, vegetasi, dan densitas bawah permukaan, meskipun kemungkinan keberadaan sistem panas bumi yang lebih dalam belum dapat sepenuhnya dikesampingkan.

Berdasarkan integrasi tersebut, koridor dengan skor 3,43-3,88 di bagian tengah-utara, sekitar perpotongan sesar Gunung Talang, dan jalur selatan-tenggara menjadi prioritas investigasi. Kelas 2,77-3,43 merupakan target sekunder, khususnya bila dekat manifestasi atau gradien gravitasi. Kelas 2,48-2,77 berprioritas rendah karena indikator tidak lengkap atau tidak saling mendukung. Peta ini mempersempit target eksplorasi, bukan menetapkan batas reservoir produktif.



BAB V

KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Integrasi ABL, FFD, LST, dan NDVI dengan bobot AHP berturut-turut 30%, 30%, 25%, dan 15% menghasilkan lima kelas prospek dengan skor 2,12-3,388. Kelas prospek tinggi 3,43-3,88 terutama mengikuti koridor struktur barat daya-tenggara di bagian tengah-utara, perpotongan rekahan di sekitar Gunung Talang, serta jalur selatan-tenggara. Zona tersebut paling tepat ditafsirkan sebagai target jalur fluida, alterasi *hidrotermal*, dan kemungkinan *upflow-outflow*, bukan sebagai reservoir produktif yang telah terbukti. Satu parameter tinggi hanya memberikan indikasi parsial, FFD tinggi menunjukkan permeabilitas potensial, LST tinggi menunjukkan anomali permukaan yang dipengaruhi waktu pengambilan data, musim dan tutupan awan, NDVI rendah menunjukkan tutupan jarang atau stres vegetasi, dan anomali gravitasi menunjukkan kontras densitas parameter tersebut merepresentasikan keberadaan jalur fluida hidrotermal permeabel dan kemungkinan zona *upflow-outflow*, sehingga peta delineasi ini sangat efektif difungsikan sebagai *preliminary assessment* spasial, bukan sebagai penentu definitif batas *reservoir* produktif..

5.2. Saran

Penelitian ini merupakan kajian awal (*preliminary assessment*) yang didasarkan pada data satelit dan penginderaan jauh, eksplorasi tahap lanjut harus difokuskan pada zona prospek tinggi melalui akuisisi data lapangan. Survei geofisika terestris, khususnya metode Magnetotellurik (MT), direkomendasikan untuk memetakan distribusi resistivitas bawah permukaan guna mengidentifikasi geometri batuan penudung (*clay cap*) dan *reservoir*, yang dapat didukung oleh pengukuran gravitasi darat (*ground gravity*) untuk meningkatkan resolusi densitas lokal. Selain itu, diperlukan investigasi geokimia fluida menggunakan metode geotermometer pada area manifestasi untuk mengestimasi temperatur *reservoir* secara empiris, serta kegiatan *ground truthing* geologi secara langsung guna

memvalidasi kelurusan struktur sesar dan sebaran mineral alterasi yang terdeteksi dari anomali citra permukaan.



DAFTAR PUSTAKA

- Adivadilah, F., 2024, Identifikasi Zona Struktur Geologi dan Manifestasi Air Panas Gunung Talang - Bukit Kili Menggunakan Metode Remote Sensing, Skripsi Sarjana, Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan.
- Andreastuti, S.D., Paripurno, E.T., Gunawan, H., 2018, Peta Kawasan Rawan Bencana Gunungapi Talang, Sumatera Barat, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Bandung.
- Augusty, D.G., Bagaskara, M.F., Oktaviani, A.D., 2023, Analisis Potensi Panas Bumi Pada Daerah G. Karang, Banten, Menggunakan Metode Penginderaan Jauh, Jurnal Teknik Geologi: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, Vol. 5, Hal. 15, DOI: 10.30872/jtgeo.v5i2.5455.
- Blakely, R.J., 1996, Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge University Press, Cambridge.
- Cahyati, W. (2025). Pemanfaatan Data Global Gravity Model (GGM)plus untuk Identifikasi Aktivitas Vulkanik dan Tektonik Wilayah Sumatera Barat, Indonesia. Skripsi, Universitas Andalas.
- Chasanah, U., Febriani, S.D.A., Minarto, E., 2021, Pendugaan Struktur Bawah Permukaan Gunung Merapi Berdasarkan Analisis Data Anomali Medan Gravitasi Citra Satelit, Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat, Vol. 18(1), Hal. 25-34, DOI: 10.20527/flux.v18i1.8456.
- Dentith, M., dan Mudge, S. T. (2014). Geophysics for the Mineral Exploration Geoscientist. Cambridge University Press.
- Dickson, M.H., Fanelli, M., 2004, What is Geothermal Energy?, Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa.

El-Taher, M.M.S., Sawires, R., Tawfiq, S.N.E., Youssef, H.R., Li, W., 2025, Geospatial Intelligence and Multi-Criteria Analysis for Mapping Groundwater Potential Zones and Sustainable Resource Management in Wadi Qena Basin, Eastern Desert, Egypt, *Applied Water Science*, Vol. 15, Artikel 145, DOI: 10.1007/s13201-025-02487-1.

Falatehan, A.F., 2016, *Analytical Hierarchy Process (AHP): Teknik Pengambilan Keputusan untuk Pembangunan Daerah*, Indomedia Pustaka, Yogyakarta.

Gupta, H., Roy, S., 2006, *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*, Elsevier, Amsterdam.

Hidayat, M.R., Marin, J., Rais, B.A., Syafa, N.D., Nur, F.I., 2023, Land Surface Temperature (LST) and Fault Fracture Density (FFD) Analysis in Bukit Kili Gunung Talang Geothermal Area, West Sumatra, *Journal of Aceh Physics Society*, Vol. 12, Hal. 25-31, DOI: 10.24815/jacps.v12i2.31160.

Hinze, W.J., von Frese, R.R.B., Saad, A.H., 2012, *Gravity and Magnetic Exploration*, Cambridge University Press, Edinburgh.

Idral, A. (2011). Effects of Subsurface Topography and Hydrogeology on Gunung Talang Hot Water Systems, Sumatra, Indonesia: An Analysis Based on Gravity Data. *Proceedings of the Stanford Geothermal Workshop*.

Khairunnisa, 2025, *Geothermal Potential Mapping Using Remote Sensing and AHP Based Multicriteria Analysis in Surian, Solok Regency, West Sumatera*, Skripsi Sarjana, Departemen Fisika, Universitas Andalas, Padang.

Kurniawan, O., 2022, Analisis Fault Fracture Density pada Potensi Panas Bumi Non-Vulkanik untuk Menentukan Recharge Area: Studi Kasus di Wilayah Lore Lindu, Sulawesi Tengah, *Jurnal Ilmiah Geomatika*, Vol. 2, Hal. 46, DOI: 10.31315/imagi.v2i2.9417.

Kusrini, 2007, Konsep dan Aplikasi Sistem Pendukung Keputusan, Andi Offset, Yogyakarta.

Macharia, M.W., Gachari, M.K., Mariita, N.O., Mundia, C.N., Kurnia, D.N., 2018, A GIS-Based Approach for Exploring Geothermal Resources Along Part of The Kenyan Rift, Journal of Applied Science, Engineering and Technology for Development, DOI: 10.33803/jasetd.2017.3-1.1.

Mayangsari, D., 2014, Geologi dan Studi Alterasi Hidrotermal Daerah Kamojang, Kabupaten Bandung, Jawa Barat, Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

NASA, 2020a, OLI-2 Design, Landsat Science, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/oli-2-design/> (diakses 12 April 2024).

NASA, 2020b, TIRS-2 Design, Landsat Science, <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/landsat-9-instruments/tirs-2-design/> (diakses 12 April 2024).

Ngene, T., Mukhopadhyay, M., Ampana, S., 2022, Reconnaissance Investigation of Geothermal Resources in Parts of the Middle Benue Trough, Nigeria Using Remote Sensing and Geophysical Methods, Energy Geoscience, Vol. 3, Hal. 360-371, DOI: 10.1016/j.engeos.2022.06.002.

Njinju, E. A., dkk. (2019). Lithospheric Structure of the Malawi Rift: Implications for Magma-Poor Rifting Processes. Tectonics, 38.

Noor, M., Abidin, Z., Suryantini, 2019, Challenges in Conventional Geothermal Exploration in Indonesia: Lessons from Remote Volcanic Areas, Proceedings World Geothermal Congress 2019, Melbourne, Australia, Hal. 1-10.

- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., Tanaka, T., 2008, GIS Integration Model for Geothermal Exploration and Well Siting, *Geothermics*, Vol. 37(2), Hal. 107-131, DOI: 10.1016/j.geothermics.2007.12.001.
- Nurul, M., Yuliantina, A., Yulianata, A., Yogi, I.B.S., 2020, Forward Modelling Metode Gayaberat dengan Model Intrusi dan Patahan Menggunakan OCTAVE, *Jurnal Geocelebes*, Vol. 4(2), Hal. 111-117, DOI: 10.20956/geocelebes.v4i2.10112.
- Purnomo, J., Koesuma, S., dan Yunianto, M. (2013). Pemisahan Anomali Regional-Residual pada Metode Gravitasi Menggunakan Metode Moving Average, Polynomial dan Inversion. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 3(1), 10-20.
- Pusat Sumber Daya Geologi, 2011, Potensi Panas Bumi Indonesia Jilid 1, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi (PSDMBP), 2013, Survei Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Gunung Talang-Bukit Kili, Kabupaten Solok, Provinsi Sumatera Barat, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Bandung.
- Royana, R., 2013, Panduan Kelestarian Ekosistem untuk Pemanfaatan Panas Bumi, WWF-Indonesia, Jakarta.
- Saaty, T.L., 2008, Decision Making with the Analytic Hierarchy Process, *International Journal of Services Sciences*, Vol. 1(1), Hal. 83-98, DOI: 10.1504/IJSSCI.2008.017590.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G., 2012, Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process, Springer Science & Business Media, New York.
- Sagita, A.R., Margaliu, A.S.C., Rizal, F., Mazzaluna, H.P., 2022, Analisis Korelasi Suhu Permukaan, NDVI, Elevasi dan Pola Perubahan Suhu Daerah Panas

Bumi Rendingan-Ulubelu-Waypanas, Tanggamus Menggunakan Citra Landsat 8 OLI/TIRS, Jurnal Geosains dan Remote Sensing, Vol. 3, Hal. 43-51, DOI: 10.23960/jgrs.2022.v3i1.72.

Sari, R., Widodo, 2020, Manifestasi Panas Bumi di Gunung Talang: Studi Geologi Lapangan dan Implikasi Eksplorasi, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 15(2), Hal. 120-135, DOI: 10.17014/ijog.v15i2.

Sihotang, B., Haryanto, A.D., Hutabarat, J., Gentana, D., 2021, Fault Fracture Density Analysis to Determine Geothermal Prospect Area in Dolok Marawa, Jurnal Geosains dan Teknologi, Vol. 9, Hal. 316-324.

Tchoukeu, C. D. N., dkk. (2021). Crustal Thickness, Depth to the Bottom of Magnetic Sources and Thermal Structure of the Crust from Cameroon to Central African Republic. Journal of African Earth Sciences.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, Edisi ke-2, Cambridge University Press, Cambridge.

Toth, A., Bobok, E., 2017, Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems: Basic Equations for Description and Modeling Geothermal Phenomena and Technologies, Elsevier, Amsterdam.

USGS, 2020, Landsat 9, Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Survei Geologi AS, Reston.

Wahyuni, W., 2025, Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Gunung Talang Menggunakan Metode Gravitasi Berdasarkan Data Satelit GGMPlus, Skripsi Sarjana, Departemen Fisika, Universitas Andalas, Padang.

Welayaturromadhona, Susilo, A., Triastuty, H., 2013, Analisis Fisis Aktivitas Gunung Talang-Sumatera Barat Berdasarkan Karakteristik Spektral dan Estimasi Hiposenter Gempa Vulkanik, Jurnal Fisika, Vol. 1, Hal. 1-5.

LAMPIRAN

Lampiran A Skrip Kode dan hasil keluaran dari data citra Landsat 9 LST dan DEM SRTM

```
// =====  
// 1. REGION OF INTEREST (Radius 35 km)  
// =====  
var pusat_talang = ee.Geometry.Point([100.6816, -0.9789]);  
var roi_radius = pusat_talang.buffer(35000); // 35 km  
var roi_bbox = roi_radius.bounds();  
  
Map.addLayer(roi_bbox, {color: 'red'}, 'Batas Regional (35km)');  
Map.centerObject(roi_bbox, 10);  
  
// =====  
// 2. LOAD KOLEKSI LANDSAT 9 (ToA / T1)  
// =====  
// Rentang waktu diperlebar (Mei - September 2022) untuk menambal mosaik gap  
var landsat = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1')  
  .filterBounds(roi_bbox)  
  .filterDate('2025-05-01', '2025-09-30')  
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUD_COVER', 15)); // Awan di bawah 15%  
  
print('Koleksi Landsat 9:', landsat);  
  
// =====  
// 3. KALKULASI LST BERBASIS NDVI & PV  
// =====  
var landsat_lst = landsat.map(function(image) {  
  
  // A. Koreksi ToA ke Brightness Temperature (BT) Band 10  
  var radiance = image.select('B10').multiply(0.0003342).add(0.1);  
  var bt = image.expression(  
    'K2 / log((K1 / Radiance) + 1)', {  
      'Radiance': radiance,  
      'K1': 799.0284, // K1 Landsat 9 TIRS B10  
      'K2': 1329.2405 // K2 Landsat 9 TIRS B10  
    })  
  ).rename('BT');  
  
  // B. Ekstraksi NDVI (Band 5 NIR, Band 4 RED)  
  var red = image.select('B4').multiply(0.00002).add(-0.1);  
  var nir = image.select('B5').multiply(0.00002).add(-0.1);  
  
  var ndvi = image.expression(  
    '(NIR - RED) / (NIR + RED)', {  
      'NIR': nir,  
      'RED': red  
    })  
  ).rename('NDVI');  
  
  // C. Proportional Vegetation (PV)
```

```

var pv = image.expression(
  '((NDVI - 0.2) / (0.5 - 0.2)) ** 2', {
    'NDVI': ndvi
  }
).clamp(0, 1).rename('PV');

// D. Land Surface Emissivity (LSE)
var lse = image.expression(
  '0.004 * PV + 0.986', {
    'PV': pv
  }
).rename('LSE');

// E. Final Land Surface Temperature (LST) dalam Celcius
var lambda = 10.8e-6; // 10.8 µm
var rho = 1.4388e-2;
var lst = image.expression(
  '(BT / (1 + ((lambda * BT / rho) * log(LSE)))) - 273.15', {
    'BT': bt,
    'lambda': lambda,
    'rho': rho,
    'LSE': lse
  }
).rename('LST');

return image.addBands([bt, ndvi, pv, lse, lst])
  .copyProperties(image, image.propertyNames());
});

// =====
// 4. REDUCER MEDIAN (MENGGABUNGKAN CITRA)
// =====
// Langsung gabungkan menggunakan median() TANPA reproject di awal.
// GEE akan menambal gambar dengan sangat mulus di proyeksi aslinya (WGS84).
var lst_median = landsat_lst.select('LST').median().clip(roi_bbox);

// Catatan: Konversi ke UTM 47S ('EPSG:32747') akan otomatis
// dilakukan secara sempurna oleh GEE saat diekspor ke Google Drive.
// =====
// 5. VISUALISASI LST
// =====
var lst_param = {
  min: 15,
  max: 30,
  palette: ['blue', 'limegreen', 'yellow', 'darkorange', 'red']
};
Map.addLayer(lst_median, lst_param, 'LST Landsat 9 (UTM) - Median');

// =====
// 6. EKSPOR DATA KE GOOGLE DRIVE
// =====
Export.image.toDrive({
  image: lst_median,

```

```

description: 'GEE_LST_GunungTalang_UTM_Median',
folder: 'EarthEngineExports',
scale: 30,
region: roi_bbox,
maxPixels: 1e10,
fileFormat: 'GeoTIFF',
crs: 'EPSG:32747',
});

// =====
// 8. EKSPOR DATA DEM (ELEVASI 30m) KE GOOGLE DRIVE
// =====
// Menggunakan data NASADEM untuk ekstraksi struktur geologi
var dem = ee.Image('NASA/NASADEM_HGT/001').select('elevation').clip(roi_bbox);

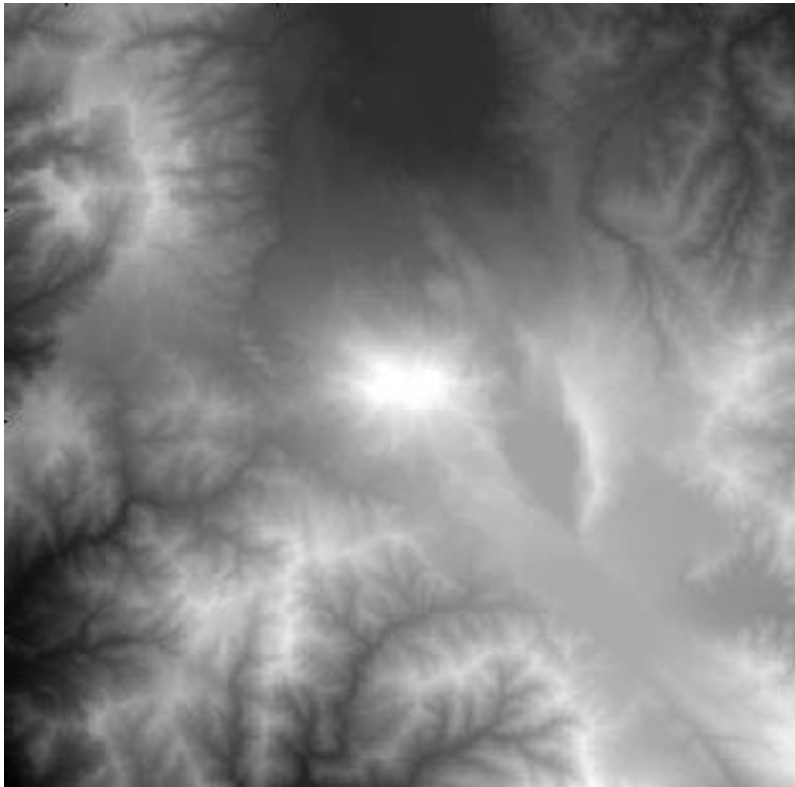
Export.image.toDrive({
  image: dem,
  description: 'GEE_DEM_GunungTalang_SesuaiKoordinat',
  folder: 'EarthEngineExports',
  scale: 30,
  region: roi_bbox,
  maxPixels: 1e10,
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  crs: 'EPSG:32747', // Sesuaikan dengan UTM zona Sumatera Barat
});

```

Output:



DEM SRTM



Lampiran B Skrip Kode dan hasil keluaran dari data citra Landsat 9 NDVI dan output

```
// Ambil citra Sentinel-2
var rawDataset = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
    .filterBounds(talang)
    .filterDate('2025-05-01', '2025-09-31');

// Masking Awan (QA60 & SCL)
function maskClouds(image) {
  var qa60 = image.select('QA60').bitwiseAnd(1 << 10).eq(0);
  var scl = image.select('SCL');

  var cloudMask = scl.neq(3) // Vegetasi jarang
    .and(scl.neq(8)) // Awan sedang
    .and(scl.neq(9)) // Awan tebal
    .and(scl.neq(10)) // Awan tinggi
    .and(scl.neq(11)); // Bayangan awan

  return image.updateMask(qa60).updateMask(cloudMask);
}

// Terapkan Masking
```

```

var dataset = rawDataset.map(maskClouds);
var composite = dataset.median();

// Hitung NDVI
var NDVI = composite.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');

// Hitung NDVI_min dan NDVI_max
var ndviStats = NDVI.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.minMax(),
  geometry: talang,
  scale: 100,
  maxPixels: 1e13,
  bestEffort: true
});

var ndviMin = ee.Number(ndviStats.get('NDVI_min'));
var ndviMax = ee.Number(ndviStats.get('NDVI_max'));

print('NDVI min:', ndviMin);
print('NDVI max:', ndviMax);

// Hitung PV
var PV = NDVI.subtract(ndviMin).divide(ndviMax.subtract(ndviMin)).pow(2).rename('PV');

// Cetak nilai rata-rata PV
var pvMean = PV.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: talang,
  scale: 100,
  maxPixels: 1e13,
  bestEffort: true
});
print('PV mean:', pvMean.get('PV'));

// Hitung Emissivity
var ev = 0.98; // Emisivitas vegetasi
var eg = 0.96; // Emisivitas tanah
var emissivity = PV.multiply(ev).add((PV.multiply(-1).add(1)).multiply(eg)).rename('Emissivity');

// Cetak nilai Emissivity
var emissivityMean = emissivity.reduceRegion({
  reducer: ee.Reducer.mean(),
  geometry: talang,
  scale: 100,
  maxPixels: 1e13,

```

```

bestEffort: true
});
print('Emissivity:', emissivityMean.get('Emissivity'));

// Visualisasi NDVI (WGS 84 saja di layar agar tidak error)
var ndviVis = {
  min: -1,
  max: 1,
  palette: ['#1976D2', '#FF9800', '#FFFF00', '#4CAF50', '#2E7D32']
};
Map.addLayer(NDVI.clip(talang), ndviVis, 'NDVI');

// Visualisasi PV
var pvVis = {min: 0, max: 1, palette: ['red', 'yellow', 'green']};
Map.addLayer(PV.clip(talang), pvVis, 'Vegetation Projection (PV)');

// 🌈 Legend NDVI
var legend = ui.Panel({style: {position: 'bottom-left', padding: '8px'}});
legend.add(ui.Label({value: 'NDVI Legend', style: {fontWeight: 'bold'}}));

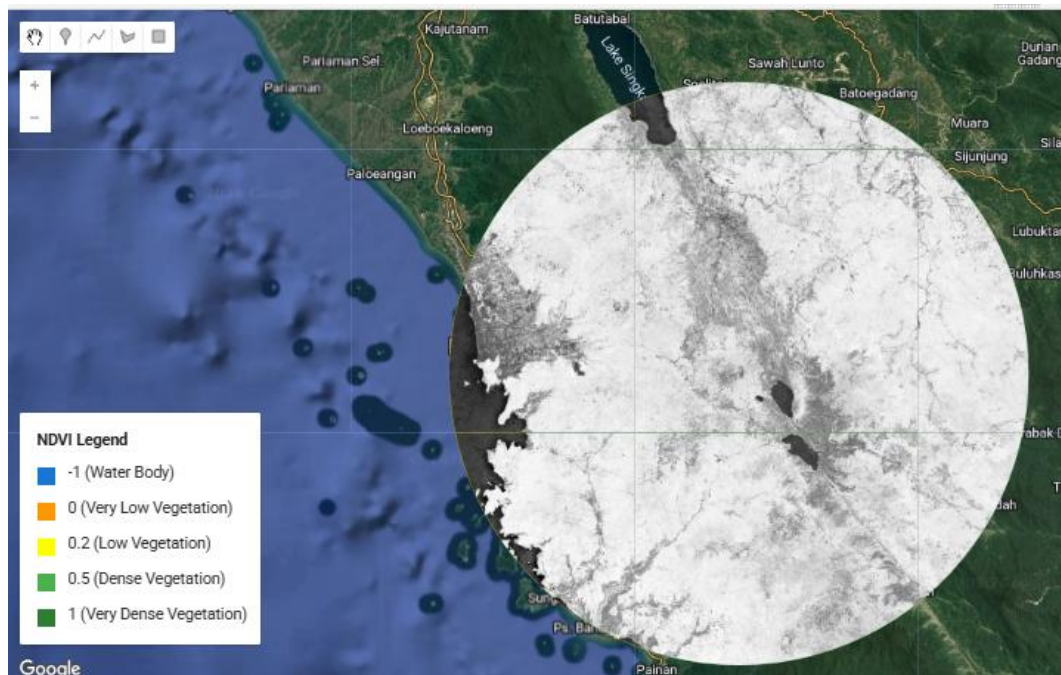
var colors = ['#1976D2', '#FF9800', '#FFFF00', '#4CAF50', '#2E7D32'];
var labels = ['-1 (Water Body)', '0 (Very Low Vegetation)', '0.2 (Low Vegetation)', '0.5 (Dense Vegetation)', '1 (Very Dense Vegetation)'];

for (var i = 0; i < colors.length; i++) {
  legend.add(ui.Panel({
    widgets: [ui.Label({style: {backgroundColor: colors[i], padding: '8px'}}),
      ui.Label({value: labels[i], style: {margin: '4px'}})],
    layout: ui.Panel.Layout.Flow('horizontal')
  }));
}
Map.add(legend);

// =====
// EKSPOR DATA KE DRIVE (OTOMATIS UTM)
// =====
Export.image.toDrive({
  image: NDVI,
  description: 'NDVI_Talang_2025_UTM',
  folder: 'EarthEngineExports',
  scale: 10,
  crs: 'EPSG:32747', // <--- Baris ajaib ini yang akan langsung mengubahnya ke UTM saat diekspor!
  region: talang,
  maxPixels: 1e13
});

```

});



Lampiran C Skrip MATLAB test acces data ggmlplus

```
%-----
% Testdriver for GGMplus access and use
%
% Requires ggmlplus2013_v3.m for seamless access of GGMplus binary files
%
% Christian Hirt and Sten Claessens,
% Western Australian Centre for Geodesy,
% Curtin University, Perth, Australia
% 2013-05-30
%-----
```

```
clear all
close all
```

```
%-----
% INPUT SELECTION
%-----
```

```
% Insert path where GGMplus files are located -----
pathGGMplus = 'D:\skripsi\Data';
```

```
% Choose no-data value for points where GGMplus is unavailable -----
ndv = NaN; %NaN produces best results for plotting
```

```
% Define desired target area -----
minlon1 = 100.3672; % longitude of western edge (Diperluas ke Barat)
```

```

maxlon1 = 100.9960; % longitude of eastern edge (Diperluas ke Timur)
minlat1 = -1.2933; % geodetic latitude of southern edge (Diperluas ke Selatan)
maxlat1 = -0.6645; % geodetic latitude of northern edge (Diperluas ke Utara)

% NB: In this example, the files N45E010.suffix are assumed to be available
% at the following locations
% 'E:\GGMplus\data\dg\N45E010.dg' (gravity disturbances)
% 'E:\GGMplus\data\ga\N45E010.ga' (gravity accelerations)
% 'E:\GGMplus\data\xi\N45E010.xi' (NS DoVs)
% 'E:\GGMplus\data\eta\N45E010.eta' (EW DoVs)
% 'E:\GGMplus\data\geoid\N45E010.ha' (quasigeoid)

% Factor applied on GGMplus basis resolution of 0.002 deg -----
% Use facX=facY=1 to extract GGMplus data over target area *without*
% interpolation.
% Use facX=facY=2 to downsample GGMplus data by factor 2 using the
% interpolation method specified below. Other factors can also be used.

facX = 1.0;
facY = 1.0;
% Interpolation methods available are 'nearest', 'linear', 'spline' and
% 'cubic'.
method = 'cubic';

% Select functionals of interest -----
% Functionals not of interest can be commented out
%[x1,y1,z1] = ggmpplus2013_v4('gravity',
minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,facX,facY,pathGGMplus,ndv,method);
[x1,y1,z2] = ggmpplus2013_v4('acceleration',
minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,facX,facY,pathGGMplus,ndv,method);
%[x1,y1,z3] = ggmpplus2013_v4('xi',
minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,facX,facY,pathGGMplus,ndv,method);
%[x1,y1,z4] = ggmpplus2013_v4('eta',
minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,facX,facY,pathGGMplus,ndv,method);
%[x1,y1,z5] = ggmpplus2013_v4('geoid',
minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,facX,facY,pathGGMplus,ndv,method);

% Select test point coordinates -----
% Select coordinates of a single point for which functionals will be
% calculated. The point must be inside the area selected above. The
% results will be displayed in Matlab's command window.
% Test point Zugspitze summit, German Alps.
test_phi = -1.16; % geodetic latitude
test_lam = 100.47; % longitude
methodtp = 'cubic'; % interpolation method for test point calculation

% -----
% MAP PRODUCTION
% -----
% Gravity disturbance
if (exist('z1','var')==1)
figure(1)
h=imagesc(x1(1,1:end),y1(1:end,1),z1); set(gca,'XDir','normal','YDir','normal');
axis equal; axis ([minlon1 maxlon1 minlat1 maxlat1]); set(h,'AlphaData',~isnan(z1));
title(' GGMplus Gravity disturbances (mGal)'); colorbar(); hold on; grid on
xlabel(' Longitude [deg]'); ylabel('Latitude [deg]')
end

```

```

% Acceleration
if (exist('z2','var')==1)
figure(2)
h=imagesc(x1(1,1:end),y1(1:end,1),z2); set(gca,'XDir','normal','YDir','normal');
axis equal; axis ([minlon1 maxlon1 minlat1 maxlat1]); set(h,'AlphaData',~isnan(z2));
title(' GGMplus Accelerations (mGal)'); colorbar(); hold on; grid on
xlabel(' Longitude [deg]'); ylabel('Latitude [deg]')
end

% North-South DoV (xi)
if (exist('z3','var')==1)
figure(3)
h=imagesc(x1(1,1:end),y1(1:end,1),z3); set(gca,'XDir','normal','YDir','normal');
axis equal; axis ([minlon1 maxlon1 minlat1 maxlat1]); set(h,'AlphaData',~isnan(z3));
title(' GGMplus North-South DoV (arc-sec)'); colorbar(); hold on; grid on
xlabel(' Longitude [deg]'); ylabel('Latitude [deg]')
end

% East-West DoV (eta)
if (exist('z4','var')==1)
figure(4)
h=imagesc(x1(1,1:end),y1(1:end,1),z4); set(gca,'XDir','normal','YDir','normal');
axis equal; axis ([minlon1 maxlon1 minlat1 maxlat1]); set(h,'AlphaData',~isnan(z4));
title(' GGMplus East-West DoV (arc-sec)'); colorbar(); hold on; grid on
xlabel(' Longitude [deg]'); ylabel('Latitude [deg]')
end

% Geoid
if (exist('z5','var')==1)
figure(5)
h=imagesc(x1(1,1:end),y1(1:end,1),z5); set(gca,'XDir','normal','YDir','normal');
axis equal; axis ([minlon1 maxlon1 minlat1 maxlat1]); set(h,'AlphaData',~isnan(z5));
title(' GGMplus Geoid (m)'); colorbar(); hold on; grid on
xlabel(' Longitude [deg]'); ylabel('Latitude [deg]')
end

% -----
%   CALCULATION AT A SINGLE POINT OF INTEREST
% -----
disp('-----')
disp(' Interpolated GGMplus functionals at test point')
disp('-----')

% Interpolate GGMplus functionals for the test point-----
if (exist('z1','var')==1)
    test_dg = interp2(x1,y1,z1,test_lam,test_phi,methodtp);
    fprintf('Gravity disturbance: %10.4f mGal\n',test_dg)
end
if (exist('z2','var')==1)
    test_ga = interp2(x1,y1,z2,test_lam,test_phi,methodtp);
    fprintf('Acceleration:      %10.2f mGal\n',test_ga)
end
if (exist('z3','var')==1)
    test_xi = interp2(x1,y1,z3,test_lam,test_phi,methodtp);
    fprintf('North-South DoV:    %10.4f arcsec\n',test_xi)
end

```

```

if (exist('z4','var')==1)
    test_eta = interp2(x1,y1,z4,test_lam,test_phi,methodtp);
    fprintf('East-West DoV:    %10.4f arcsec\n',test_eta)
end
if (exist('z5','var')==1)
    test_ha = interp2(x1,y1,z5,test_lam,test_phi,methodtp);
    fprintf('Geoid:          %10.4f m\n',test_ha)
end

% --- ASCII OUTPUT (MODIFIKASI UNTUK 3 KOLOM) ---
% --- ASCII OUTPUT (MODIFIKASI UNTUK GOBS) ---
if (exist('z2','var')==1) % Cek apakah data percepatan gravitasi ada
    lon_col = x1(:);
    lat_col = y1(:);
    gobs_col = z2(:);
    data_output = [lon_col, lat_col, gobs_col];

    outputfile = 'Gobs_GunungTalang.csv'; % Disimpan langsung sebagai CSV
    fid = fopen(outputfile, 'wt');
    fprintf(fid, 'Bujur,Lintang,Gobs\n'); % Header dengan pemisah koma

    for i = 1:size(data_output, 1)
        if ~isnan(data_output(i,3))
            % Menggunakan koma sebagai pemisah kolom untuk format CSV
            fprintf(fid, '%8.4f,%8.4f,%7.3f\n', data_output(i,1), data_output(i,2), data_output(i,3));
        end
    end

    fclose(fid);
    disp(['Data berhasil disimpan di file: ', outputfile]);
end

```

Lampiran D Skrip MATLAB ggmpplus2013_v4 untuk tahapan ekstraksi nilai anomali gravitasi satelit

```

%      from GGMplus binary files

%-----
%
% ggmpplus2013_v4
%
%-----
% Purpose: Seamless extraction of GGMplus gravity field functionals
%      from GGMplus binary files
%-----
%
% Input:
% functional: GGMplus functional to extract.
%      values: 'geoid', 'gravity','acceleration' 'xi', 'eta'
%
% minlon1/maxlon1/minlat1/maxlat1: geodetic coordinates of
%      the selection area
%

```

```

% facX,facY: resolution scaling factors
%     facX,facY = 1 : returns data at 7.2 arc-sec resolution
%                   no interpolation.
%     facX,facY > 1 : upsamples the data to higher resolution
%                   than 7.2 arc-sec, interpolation required
%     facX,facY < 1 : downsamples the data to lower resolution
%                   than 7.2 arc-sec, interpolation required
% path_basis:   Name of path where the GGMplus data folders are located
%
% nodataval:   Desired value to be assigned outside the data area
%             (e.g. offshore or North of 60 deg/ South of -60 deg
%             latitude).
%
% method:      interpolation method applied when facX,facY are not
%             equal to 1. 'cubic' is recommended. Parameter is
%             ignored when facX,facY = 1.
%
%-----
% Output:
%     X meshgrid-compatible matrix with longitudes
%     Y meshgrid-compatible matrix with latitudes
%     Z matrix with extracted GGMplus functional
%
%-----
% Example call:
%
% [X,Y,Z] = ggmpplus2013_v4('gravity', 5,10,44,48,1,1,'E:\GGMplus\bin',0,'linear')
%
%-----
% Notes:
%
% -when facX=facY=1, data is extracted without interpolation.
% This means that X and Y do not necessarily match
% exactly the minlon1/maxlon1/minlat1/maxlat1 selection area
%
% -when there is interpolation, data is interpolated to a line-registered
% grid matching exactly minlon1,maxlon1,minlat,maxlat1
%
%-----
% Christian Hirt
% WA Centre for Geodesy
% Curtin University
% Perth
% last edited 2013-05-30
%-----
function [X,Y,Z] = ggmpplus2013_v4(functional, minlon1,maxlon1,minlat1,maxlat1,...
    facX,facY,path_basis,nodataval,method)

curr_dir = pwd;

%-----
% 1 - assign constant parameters (res, tileSize, infofile)
%-----

```

% some constant that apply for all GGMplus grids -----

```
machineform = 'ieee-be';  
tilesize = 5;  
resolution = 7.2/3600;  
tileelems = 2500; % elements in lat and lon direction
```

% constants that are different for the functionals -----

```
switch functional  
case {'geoid'}  
    conv_factor = 1000; % mm to m  
    suffix = '.ha';  
    path_tiles = fullfile(path_basis, 'geoid' );  
    storagetype = 'int32';  
    init_nodata = -2^31;  
  
case {'gravity','grav_disturbance'}  
    conv_factor = 10; % 0.1 mGal to mGal  
    suffix = '.dg';  
    path_tiles = fullfile(path_basis, 'dg' );  
    storagetype = 'int16';  
    init_nodata = -2^15;  
  
case {'acceleration','grav_acceleration'}  
    conv_factor = 10; % 0.1 mGal to mGal  
    suffix = '.ga';  
    path_tiles = fullfile(path_basis, 'ga' );  
    storagetype = 'int32';  
    init_nodata = -2^31;  
  
case {'xi'}  
    conv_factor = 10; % 0.1 arc-sec to arc-sec  
    suffix = '.xi';  
    path_tiles = fullfile(path_basis, 'xi' );  
    storagetype = 'int16';  
    init_nodata = -2^15;  
  
case {'eta'}  
    conv_factor = 10; % 0.1 arc-sec to arc-sec  
    suffix = '.eta';  
    path_tiles = fullfile(path_basis, 'eta' );  
    storagetype = 'int16';  
    init_nodata = -2^15;  
end
```

% * fac 1 means no interpolation carried out, data is passed through.
% * fac > 1 or < 1 means interpolation required and selection area
% extended by a small strip of 0.1 deg width

```
if(facX==1&facY==1) % no interpolation  
    interpflag = 0;  
    tolarea = 0;  
else
```

```

interpflag = 1;
tolarea = 0.1; % extension in deg to either side

end

%-----
% 2 extend selection area to match the dimensions of dem tiles
%-----

% minlon1,maxlon1 etc are the original boundaries passed to the function
% minlon2,maxlon2 etc are those extended by areatol. If facs ==1, the
% values are the same

minlon2=minlon1-tolarea;
maxlon2=maxlon1+tolarea;
minlat2=minlat1-tolarea;
maxlat2=maxlat1+tolarea;

% min coordinates of most eastern, and western etc tiles to be accessed
Sall_minlon = floor (minlon2/tilesize)*tilesize;
Sall_maxlon = floor (maxlon2/tilesize)*tilesize;
Sall_minlat = floor (minlat2/tilesize)*tilesize;
Sall_maxlat = floor (maxlat2/tilesize)*tilesize;

Sall_lonvec =Sall_minlon:tilesize:Sall_maxlon;
Sall_latvec =Sall_minlat:tilesize:Sall_maxlat;
sn=length(Sall_lonvec);
sm=length(Sall_latvec);

[Sall_lonmat Sall_latmat] = meshgrid(Sall_lonvec,Sall_latvec);

Slonmat= reshape(Sall_lonmat,sn*sm,1);
Slatmat= reshape(Sall_latmat,sn*sm,1);
ntiles = length(Slonmat);
clear Sall_*

%-----
% 3 get filenames for the tiles that will be accessed
%-----

no = 0;
for min_lon = -180-tilesize:tilesize:180
    for min_lat = -90:tilesize:90-tilesize
        no = no +1;
        minlonf = min_lon;
        minlatf = min_lat;
        if(min_lon<-180)
            minlonf = minlonf+360;
        end
        if(min_lon>180-tilesize)
            minlonf = minlonf-360;
        end

        temp1 = getfilename2012(minlatf,minlonf);
    end
end

```

```

outfilename = strcat(temp1,suffix);

fchar(no,1) = cellstr(outfilename);
flon(no) = min_lon;
flat(no) = min_lat;

end
end

flat = flat';
flon = flon';
fchar = char(fchar);

%-----
% 4 intersect
%-----
ix= [];
for i = 1:ntiles
    ixt = find(flat==Slatmat(i)&flon==Slonmat(i));
    ix = [ix ixt];
end
% ix is now a vector containing indices to all source tiles

% these are the tiles that we have to access
slatmin =flat(ix);          % vectors (ntiles, 1)
slonmin =flon(ix);
slatmax =slatmin+tilesize;
slonmax =slonmin+tilesize;

disp(' tiles to be accessed')
tilenames = char(fchar(ix,:)); % vectors (ntiles, 1)

ntilesfound = length(ix);

clear Slatmat Slonmat fchar flat flon

%-----
% 5 initialise target matrix
%-----

% use integer coordinates to 0.01 sec cell-centred
fac=3600*100;
r = int32(resolution*fac); % resolution
r2 =int32(r/2);           % half-resolution

% this determines the definite geometry of the target matrix
Amin_lat = int32(floor(minlat2*fac/r)*r+r2);
Amax_lat = int32(floor(maxlat2*fac/r)*r-r2);
Amin_lon = int32(floor(minlon2*fac/r)*r+r2);
Amax_lon = int32(floor(maxlon2*fac/r)*r-r2);
% corner coordinates and vectors and r in 0.01 arc sec and exactly match
% the source data

Avec_lat = Amin_lat:r:Amax_lat;
Avec_lon = Amin_lon:r:Amax_lon;

```

```

An1 = length(Avec_lat);
Am1 = length(Avec_lon);

% Initialize target tile
clear A
A=double(ones(An1,Am1)*NaN);

%-----
% 6 fill the matrix with data from binary files
%-----
for i = 1:ntilesfound

    % step A -----
    % build vectors for the source matrix
    Smin_lat = int32(slatmin(i)*fac+r2);
    Smax_lat = int32(slatmax(i)*fac-r2);

    Smin_lon = int32(slommin(i)*fac+r2);
    Smax_lon = int32(slommax(i)*fac-r2);

    Svec_lat = Smin_lat:r:Smax_lat;
    Svec_lon = Smin_lon:r:Smax_lon;
    clear Smin_lat Smax_lat Smin_lon Smax_lon

    % step B intersect and return common lat/lon values -----
    a_lat = intersect (Svec_lat, Avec_lat);
    a_lon = intersect (Svec_lon, Avec_lon);

    n_elems_lat = length(a_lat);
    n_elems_lon = length(a_lon);
    if(n_elems_lat&n_elems_lon) % both have be at least one

        % step C find the four source and four target indices -----
        % Destination indices lat
        Aix_lat_min = find(Avec_lat==a_lat(1));
        Aix_lat_max = find(Avec_lat==a_lat(end));
        % Source indices lat
        Six_lat_min = find(Svec_lat==a_lat(1));
        Six_lat_max = find(Svec_lat==a_lat(end));

        % Destination indices lon
        Aix_lon_min = find(Avec_lon==a_lon(1));
        Aix_lon_max = find(Avec_lon==a_lon(end));
        % Source indices lon
        Six_lon_min = find(Svec_lon==a_lon(1));
        Six_lon_max = find(Svec_lon==a_lon(end));

        % step D open file only if exists -----
        te = tileelems;
        tilename_in = tilenames(i,:);
        %a = strcat('read file',{' '},tilename_in);
        disp('read file')
        disp(tilename_in)
        cd('D:\b pnlitian\ona\gmm')
        if(exist(tilename_in))

```

```

fid = fopen(tilename_in,'rb');
S = fread(fid,te*te,storagetype,machineform);
fclose(fid);
disp('read complete')
S = reshape(S,te,te);

%%CH 20130527 temporary use of NaN over no-data areas to avoid
% interpolation edge effects
S(find(S<init_nodata+1))=NaN;

% copy data block
A(Aix_lat_min:Aix_lat_max,Aix_lon_min:Aix_lon_max)= ...
S(Six_lat_min:Six_lat_max,Six_lon_min:Six_lon_max);

clear Svec_lon Svec_lat Aix* Six* a_lat a_lon S

else
    disp(['file ',tilename_in,' does not exist'])
end
else
    disp(' this tile does not intersect with target area')
end
end

length(find(isnan(A)))

%-----
% 7 build the X and Y matrices
%-----
% convert the basis vectors from integer and 0.01 sec to double and deg
Avec_lon = double(Avec_lon)/fac;
Avec_lat = double(Avec_lat)/fac;

[AX AY] = meshgrid(Avec_lon,Avec_lat);

%-----
% 8 interpolate only if fac not 1
%-----

cd(curr_dir)

if(interpflag == 1)
    disp(strcat(' interpolate',{' '},method))

% build target grid, exact match with input minmax boundaries -----
res_targetX = resolution*facX;
res_targetY = resolution*facY;

% use exact area (minlon1, maxlon1 etc) for interpolation
B_veclon = minlon1:res_targetX:maxlon1;
B_veclat = minlat1:res_targetY:maxlat1;

```

```

[BX BY] = meshgrid(B_veclon,B_veclat);

% carry out the interpolation in blocks -----

[n2 m2] = size(BX);
anz_bloecke = 5;
blocksize2 = floor(n2/anz_bloecke);
min2 = 1;
max2 = min2+blocksize2;

for i = 1:anz_bloecke
    B(min2:max2,1:m2) =
interp2(AX,AY,A,BX(min2:max2,1:m2),BY(min2:max2,1:m2),method);
    min2 = min2+blocksize2+1;
    max2 = min2+blocksize2;

    if (i==anz_bloecke-1)
        max2 = n2;
    end
end

clear AX AY A
X = BX;
clear BX
Y = BY;
clear BY
Z = B;
clear B
disp(' interpolation finished')

else
    disp(' pass extracted data directly.')

    X = AX;
    clear AX
    Y = AY;
    clear AY
    Z = A;
    clear A

end

%-----
% 9 apply scale factor
%-----
Z = Z/conv_factor; % this scales the GGMplus matrix to the basic unit

%-----
% 10 find all nodata values and assign user-defined nodataval
%-----
Z(isnan(Z))=nodataval;

cd(curr_dir)

```

```
clear A*B*C*D*E*F*G*H*I*L*M*N*P*T*
clear a*b*c*d*e*f*g*h*i*l*m*n*p*t*s*r*
```

```
%-----
% Function getfilename2012
%-----
```

```
function name = getfilename2012(lat,lon)
```

```
d_int = lat;
c_int = lon;
```

```
if (d_int>=0)
    temp1 = 'N';
else
    temp1 = 'S';
end
if (abs(d_int)<10)
    temp1 = strcat(temp1,'0');
end
```

```
c = sprintf('%i',c_int);
d = sprintf('%i',abs(d_int));
```

```
temp3 = strcat(temp1,d);
```

```
if (c_int>=0)
    temp4 = strcat(temp3,'E');
else
    temp4 = strcat(temp3,'W');
end
```

```
if (abs(c_int)<100)
    temp4 = strcat(temp4,'0');
end
```

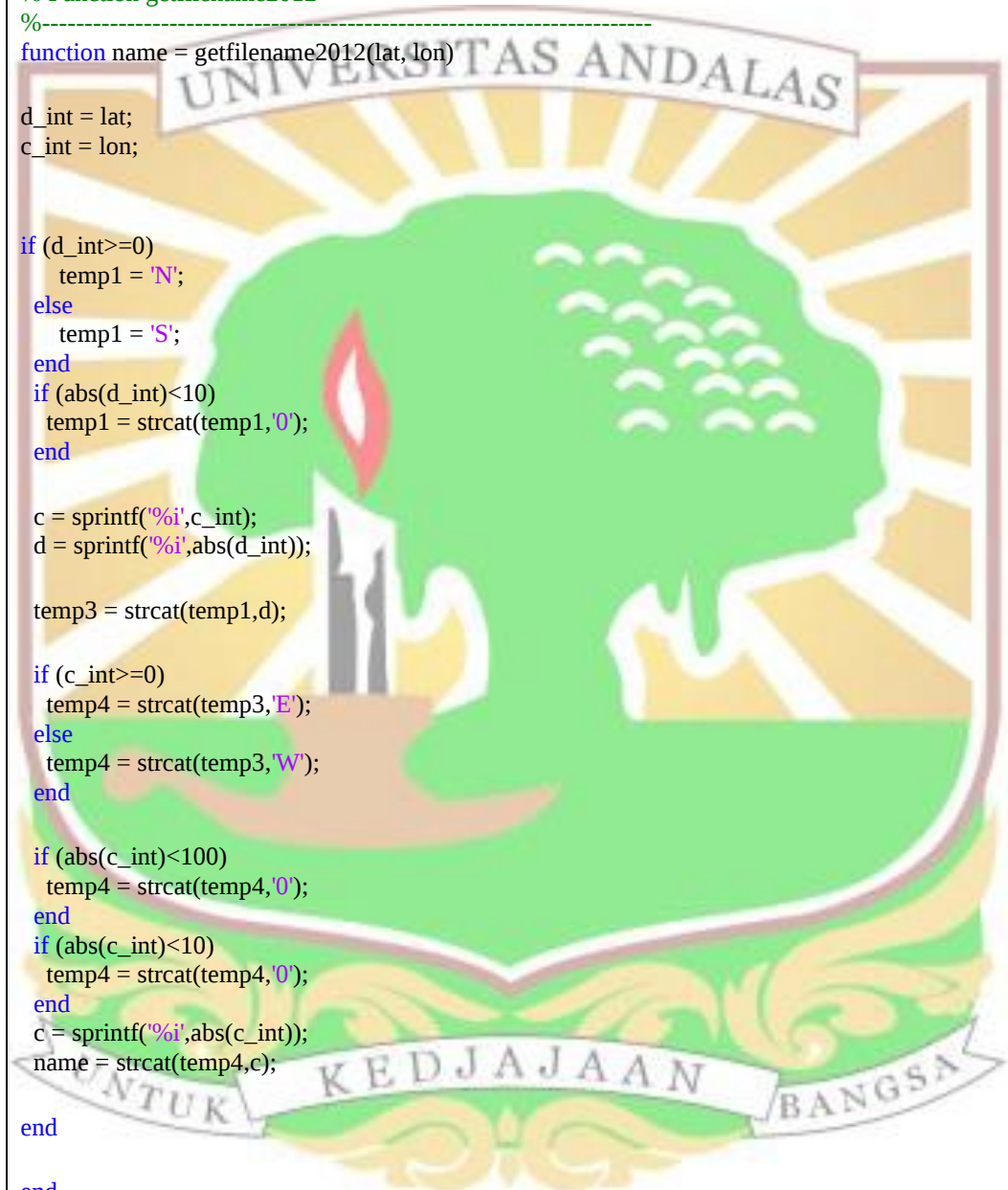
```
if (abs(c_int)<10)
    temp4 = strcat(temp4,'0');
end
```

```
c = sprintf('%i',abs(c_int));
name = strcat(temp4,c);
```

```
end
```

```
end
```

```
%-----
% End
%-----
```



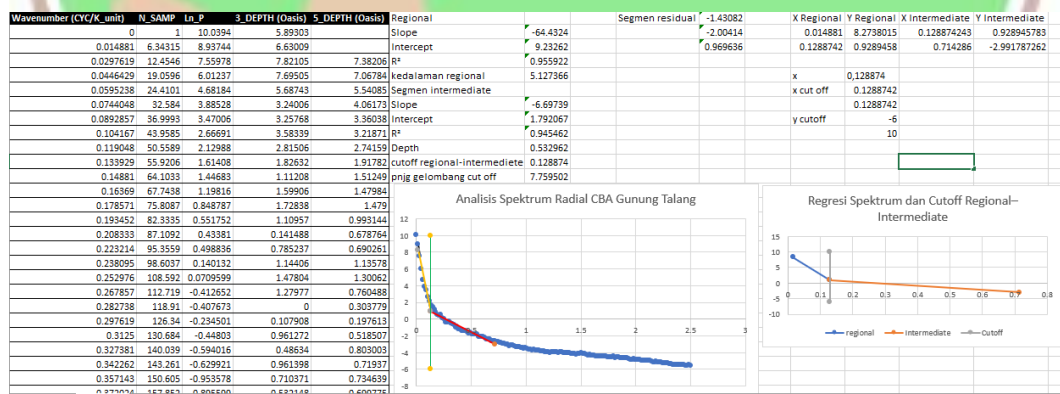
Lampiran E Data pengolahan GGMPPlus pada Oasis Montaj

✓ D0:	Longitude	Latitude	Easting UTM47S	Northing UTM47S	GravityDisturbance mGal	Elevation	BC	sba	Terrain	cba
0.0	100.501	-1.249	667003.516	9861900.062	36.2	243.754	27.29	8.91	3.024	11.94
1.0	100.501	-1.247	667003.642	9862121.199	39.9	337.199	37.75	2.15	7.224	9.37
2.0	100.501	-1.245	667003.768	9862342.337	29.5	188.420	21.09	8.41	3.188	11.59
3.0	100.501	-1.243	667003.894	9862563.474	23.6	116.498	13.04	10.56	1.874	12.43
4.0	100.501	-1.241	667004.019	9862784.612	26.6	162.673	18.21	8.39	1.715	10.10
5.0	100.501	-1.239	667004.145	9863005.749	24.6	107.536	12.04	12.56	0.758	13.31
6.0	100.501	-1.237	667004.270	9863226.887	25.1	163.640	18.32	6.78	1.947	8.73
7.0	100.501	-1.235	667004.395	9863448.024	26.0	147.365	16.50	9.50	1.405	10.91
8.0	100.501	-1.233	667004.520	9863669.162	18.0	104.476	11.70	6.30	2.243	8.55
9.0	100.501	-1.231	667004.644	9863890.299	17.1	42.513	4.76	12.34	1.504	13.84
10.0	100.501	-1.229	667004.769	9864111.437	13.7	26.368	2.95	10.75	1.100	11.85
11.0	100.501	-1.227	667004.893	9864332.574	10.6	8.982	1.01	9.59	0.283	9.88
12.0	100.501	-1.225	667005.017	9864553.711	12.4	6.621	0.74	11.66	0.151	11.81
13.0	100.501	-1.223	667005.140	9864774.849	12.2	8.763	0.98	11.22	0.042	11.26
14.0	100.501	-1.221	667005.264	9864995.986	11.6	7.989	0.89	10.71	0.015	10.72
15.0	100.501	-1.219	667005.387	9865217.124	11.7	8.695	0.97	10.73	0.009	10.74
16.0	100.501	-1.217	667005.511	9865438.261	11.4	9.240	1.03	10.37	0.008	10.37
17.0	100.501	-1.215	667005.634	9865659.398	11.5	12.735	1.43	10.07	0.028	10.18
18.0	100.501	-1.213	667005.756	9865880.536	11.2	12.052	1.35	9.85	0.028	9.87
19.0	100.501	-1.211	667005.879	9866101.673	11.5	13.211	1.48	10.02	0.037	10.06
20.0	100.501	-1.209	667006.001	9866322.811	11.3	13.602	1.52	9.78	0.026	9.80
21.0	100.501	-1.207	667006.123	9866543.948	10.9	14.418	1.61	9.29	0.041	9.33
22.0	100.501	-1.205	667006.245	9866765.086	9.2	10.155	1.14	8.06	0.093	8.16
23.0	100.501	-1.203	667006.367	9866986.223	8.2	11.253	1.26	6.94	0.193	7.13
24.0	100.501	-1.201	667006.489	9867207.360	7.9	12.297	1.38	6.52	0.501	7.02
25.0	100.501	-1.199	667006.610	9867428.498	11.2	39.367	4.41	6.79	1.857	8.65
26.0	100.501	-1.197	667006.731	9867649.635	24.9	171.515	19.20	5.70	4.300	10.00
27.0	100.501	-1.195	667006.852	9867870.772	15.4	95.093	10.65	4.75	2.410	7.16
28.0	100.501	-1.193	667006.973	9868091.910	18.7	114.388	12.81	5.89	1.460	7.35

Link data pengolahan GGMPPlus

(<https://drive.google.com/drive/folders/1AycCojT5-Jtxdxt-oJKVHe2Ttq-by-cC?usp=sharing>)

Lampiran F Data Hasil Pengolahan Spectrum



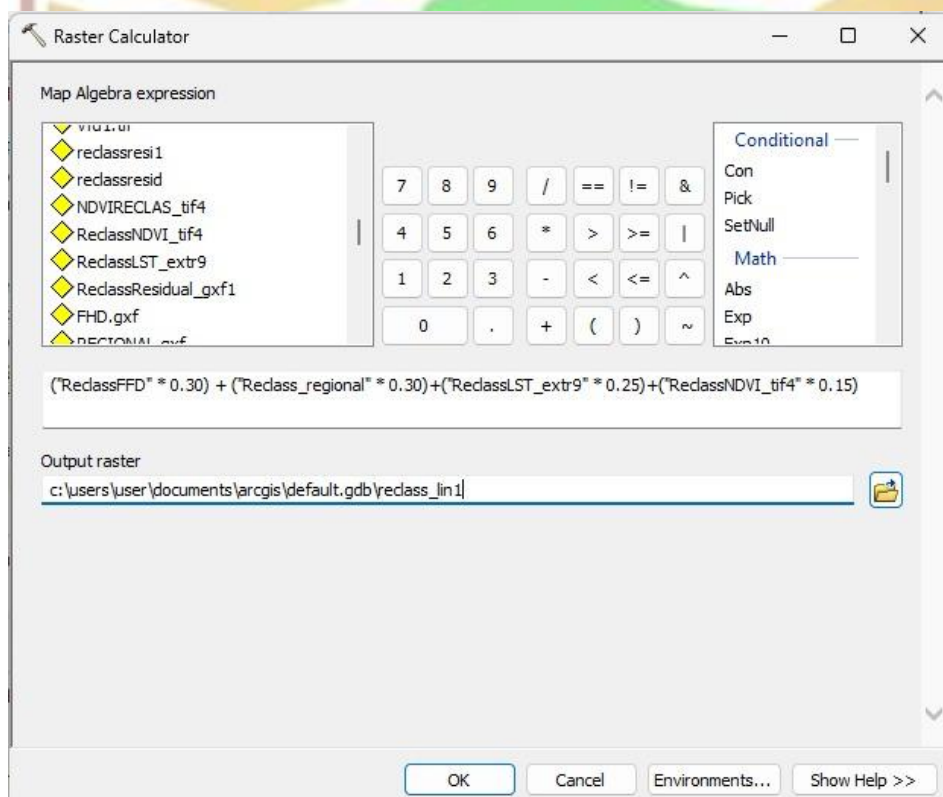
Link data pengolahan GGMPPlus

(<https://drive.google.com/drive/folders/1AycCojT5-Jtxdxt-oJKVHe2Ttq-by-cC?usp=sharing>)

Pembobotan AHP pada Excel

1	Tabel Matriks Kriteria Utama (Level 1)					
2	KRITERIA	GGM	FFD	LST	NDVI	Bobot (Eigen Vektor)
3	GGM	1	1	1.2	2	0.3
4	FFD	1	1	1.2	2	0.3
5	LST	0.83	0.83	1	1.5	0.25
6	NDVI	0.5	0.5	0.67	1	0.25
7	TOTAL	3.33	3.33	4.07	6.5	1
8						
9	$\lambda_{maks}=4.021$					
10	$CI = (\lambda_{maks} - n) / (n - 1) = (4.021 - 4) / 3 = 0.007$					
11	$RI = 0.90$					
12	$CR = CI / RI = 0.007 / 0.90 = 0.008$					

Lampiran G Pengolahan WLC pada Arcgis



24% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 9 words)

Top Sources

- 21%  Internet sources
- 4%  Publications
- 14%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.