

BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan serangkaian prosedur atau skema yang digunakan di dalam penelitian yang memungkinkan penelitian dilakukan secara terstruktur, ilmiah, netral dan berkualitas, sebagai strategi untuk mengumpulkan data serta untuk mencari solusi dari suatu permasalahan berdasarkan fakta (Waruwu, 2023). Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analitik yaitu metode mengumpulkan data tanpa melakukan akuisisi data secara langsung dan menganalisis data yang diperoleh dengan ditunjang beberapa kajian ilmiah dan menggunakan metode pendekatan kuantitatif, karena data penelitian berupa angka-angka serta menggunakan analisis statistik (Sugiyono, 2014).

Pada penelitian ini, proses pengolahan *Land Surface Temperature* dilakukan menggunakan *Band 4* dan *Band 5* dari citra Landsat 9. Proses ini menggunakan *software* ArcGIS Pro 3.1.5, sehingga diperoleh peta anomali suhu permukaan. Proses pengolahan Magnetotellurik dari data lapangan yaitu *time series* sampai inversi sehingga diperoleh penampang dua dimensi resistivitas terhadap kedalaman, dengan menggunakan *software* Phoenix Geophysics SSMT 2000, MTEditor, dan *Software* WinGlink. Hasil penampang dua dimensi tersebut kemudian dianalisis sesuai dengan informasi geologi daerah penelitian dan diidentifikasi sebagai komponen sistem panas bumi. Data suhu permukaan dari peta *Land Surface Temperature* dan nilai resistivitas permukaan dari penampang dua dimensi resistivitas terhadap kedalaman akan diolah secara statistik. Selanjutnya, analisis statistik akan dilakukan untuk melihat hubungan antara kedua parameter tersebut. Hasil ini kemudian diintegrasikan dengan peta geologi untuk mengidentifikasi jenis batuan, sehingga dapat ditarik kesimpulan mengenai hubungan suhu permukaan dan nilai resistivitas permukaan.

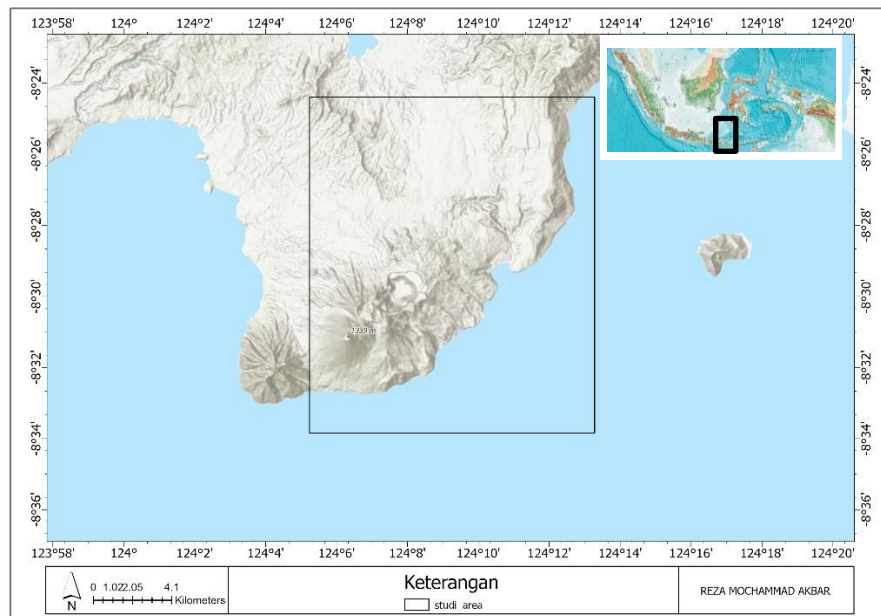
3.1 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Pelaksanaan kegiatan pengolahan data dilaksanakan pada bulan Januari – April 2025 di Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi (PSDMBP) Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Jalan

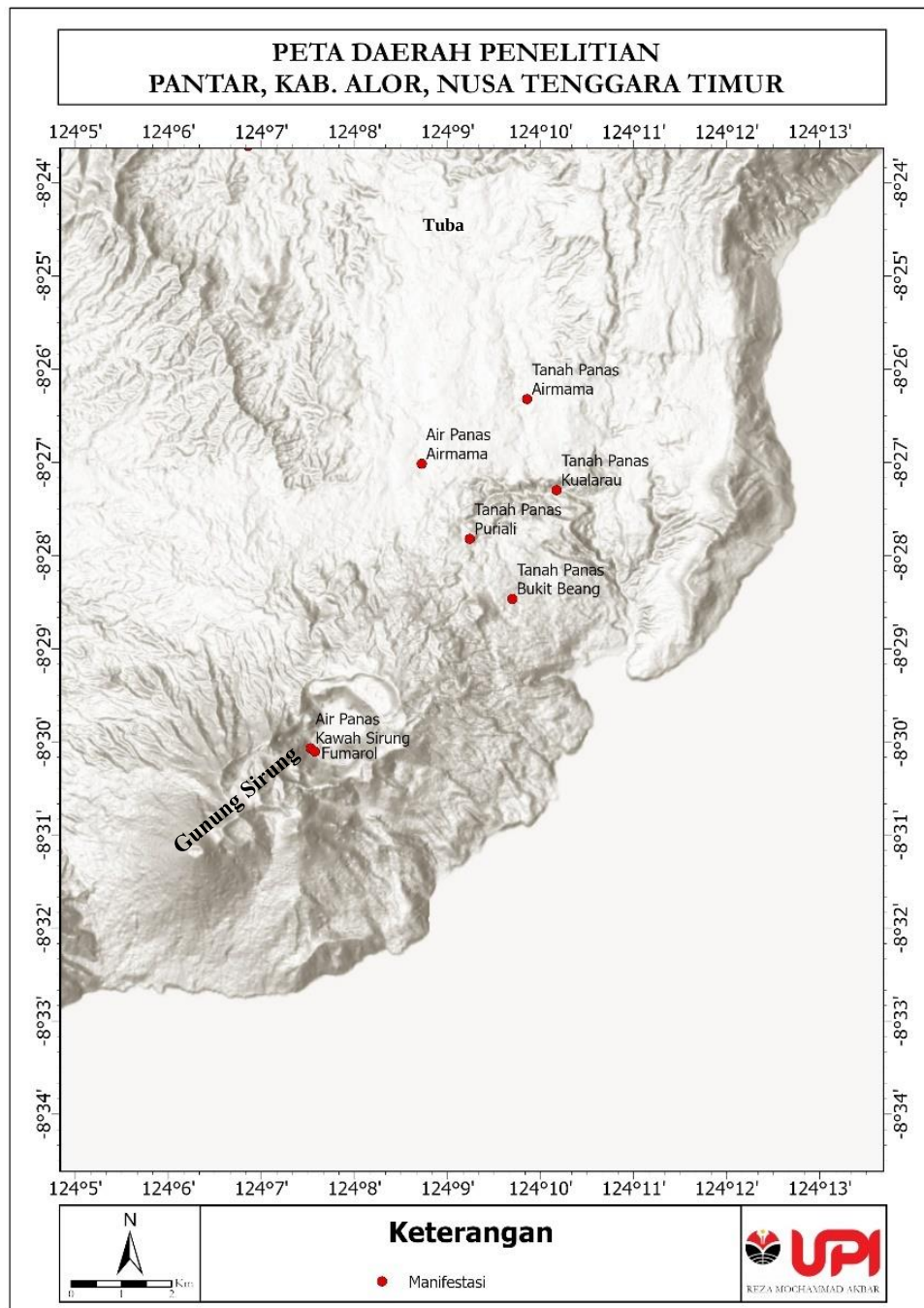
Soekarno-Hatta No.444, Kota Bandung Jawa Barat

3.2 Lokasi Penelitian

Studi area yang dilakukan berada di Kabupaten Alor, Nusa Tenggara Timur (NTT), Indonesia, mencakup wilayah sekitar Gunung Sirung. Studi area berjarak sekitar 77 km dari pusat Kota Kalabahi, Ibu Kota Kabupaten Alor, dengan perjalanan laut menuju Pulau Pantar yang memakan waktu sekitar 2-3 jam perjalanan. Luas area penelitian sekitar 14 x 17 kilometer meliputi zona kawah utama, daerah sekitarnya yang terdampak aktivitas vulkanik, serta wilayah yang berpotensi mengandung indikasi panas bumi sebagaimana ditampilkan pada peta (Gambar 3.1 dan Gambar 3.2).



Gambar 3. 1 Peta Pulau Pantar Bagian Selatan



Gambar 3. 2 Peta Daerah Penelitian

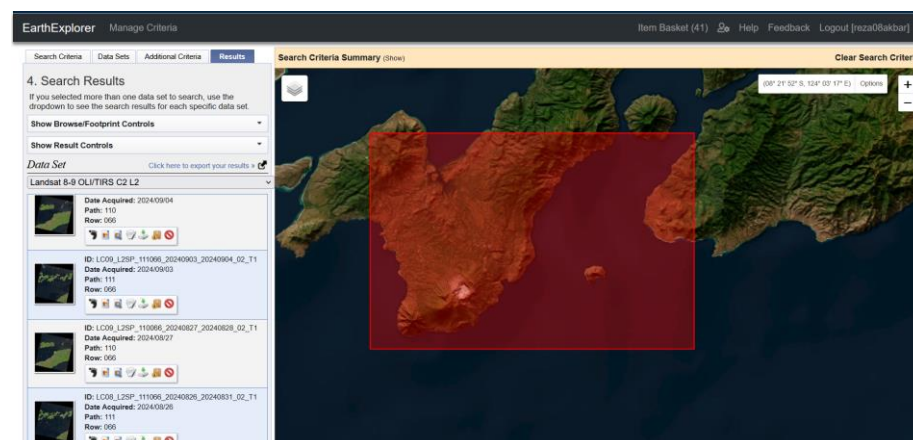
3.3 Data Penelitian

3.3.1 Citra Landsat-9

Penelitian ini menggunakan data citra Landsat 9. Data tersebut merupakan data satelit yang dihasilkan oleh satelit Landsat 9 yang merupakan bagian dari program landsat yang dikelola oleh NASA dan USGS. Sensor pada satelit Landsat mendeteksi energi elektromagnetik

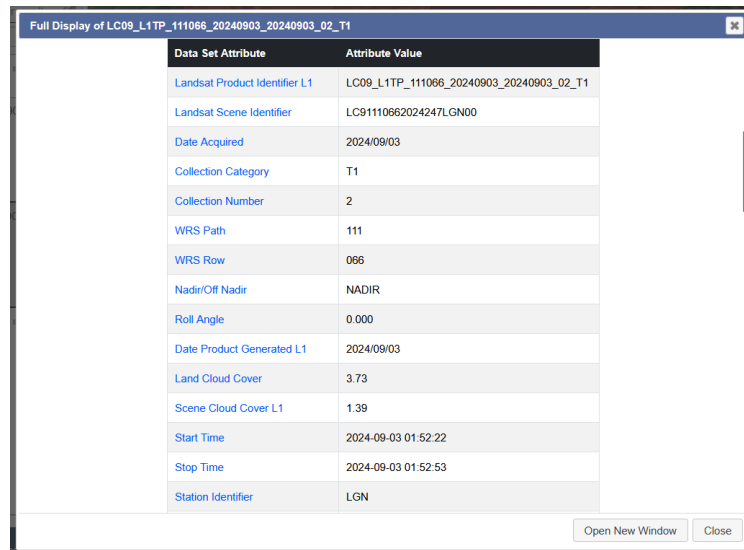
di permukaan Bumi (baik yang tampak maupun tidak tampak) menggunakan cahaya pantulan dari Matahari. Cahaya tampak yang dikenal hanyalah sebagian kecil dari spektrum, namun sensor Landsat 9 merekam informasi ini dalam berbagai bagian spektrum elektromagnetik, termasuk cahaya tampak (merah, hijau, biru) dalam kisaran 380 – 700 nm, serta inframerah. Satelit Landsat 9 sendiri beroperasi pada ketinggian 438 mil di atas permukaan Bumi dalam "orbit Bumi rendah". Satelit ini menyelesaikan satu orbit setiap 99 menit (14,5 orbit per hari), yang berarti dibutuhkan 16 hari untuk mengumpulkan citra di seluruh dunia dengan jalur selebar 115 mil. Saat ini, Landsat 9 bekerja untuk mengambil gambar daratan Bumi setiap 8 hari.

Data yang digunakan dalam penelitian ini diakses dan diunduh dari platform online USGS Earth Explorer atau pada tautan <https://earthexplorer.usgs.gov/> seperti pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Pemilihan Data Citra Landsat 9

Data Landsat-9 yang digunakan dalam penelitian ini diakuisisi pada tanggal 3 September 2024 (Gambar 3.4) pada path 111 dan row 66 dengan azimuth dan ketinggian matahari 60.91864452° dan 57.71859237° . Waktu akuisisi data citra pada pukul 1:52:22 hingga 1:52:53 siang hari (USGS, 2023)



Data Set Attribute	Attribute Value
Landsat Product Identifier L1	LC09_L1TP_111066_20240903_20240903_02_T1
Landsat Scene Identifier	LC91110662024247LGN00
Date Acquired	2024/09/03
Collection Category	T1
Collection Number	2
WRS Path	111
WRS Row	066
Nadir/Off Nadir	NADIR
Roll Angle	0.000
Date Product Generated L1	2024/09/03
Land Cloud Cover	3.73
Scene Cloud Cover L1	1.39
Start Time	2024-09-03 01:52:22
Stop Time	2024-09-03 01:52:53
Station Identifier	LGN

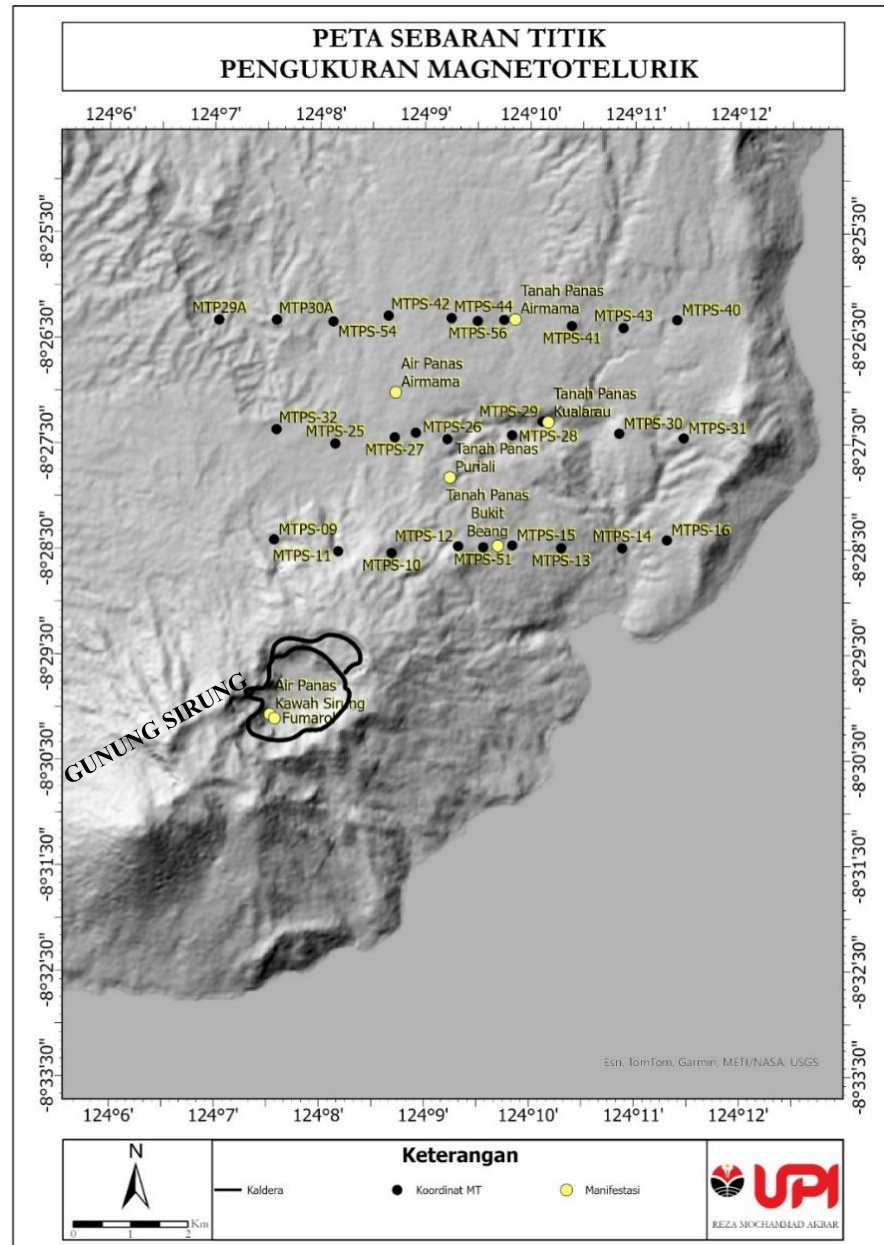
Gambar 3. 4 Data Set Landsat-9 Pada 3 September 2024

3.3.2 Magnetotellurik

Penelitian ini menggunakan data sekunder Magnetotellurik yang diperoleh dari Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panasbumi. Pengukuran Magnetotellurik yang telah dilaksanakan oleh Tim Panas Bumi PSDMBP sebanyak 28 titik pengukuran (Tabel 3.2). Sebaran titik ukur didesain untuk mencakup area yang diduga panas bumi pada daerah penelitian (Gambar 3.5).

Tabel 3. 2 Koordinat Titik Pengukuran Magnetotellurik

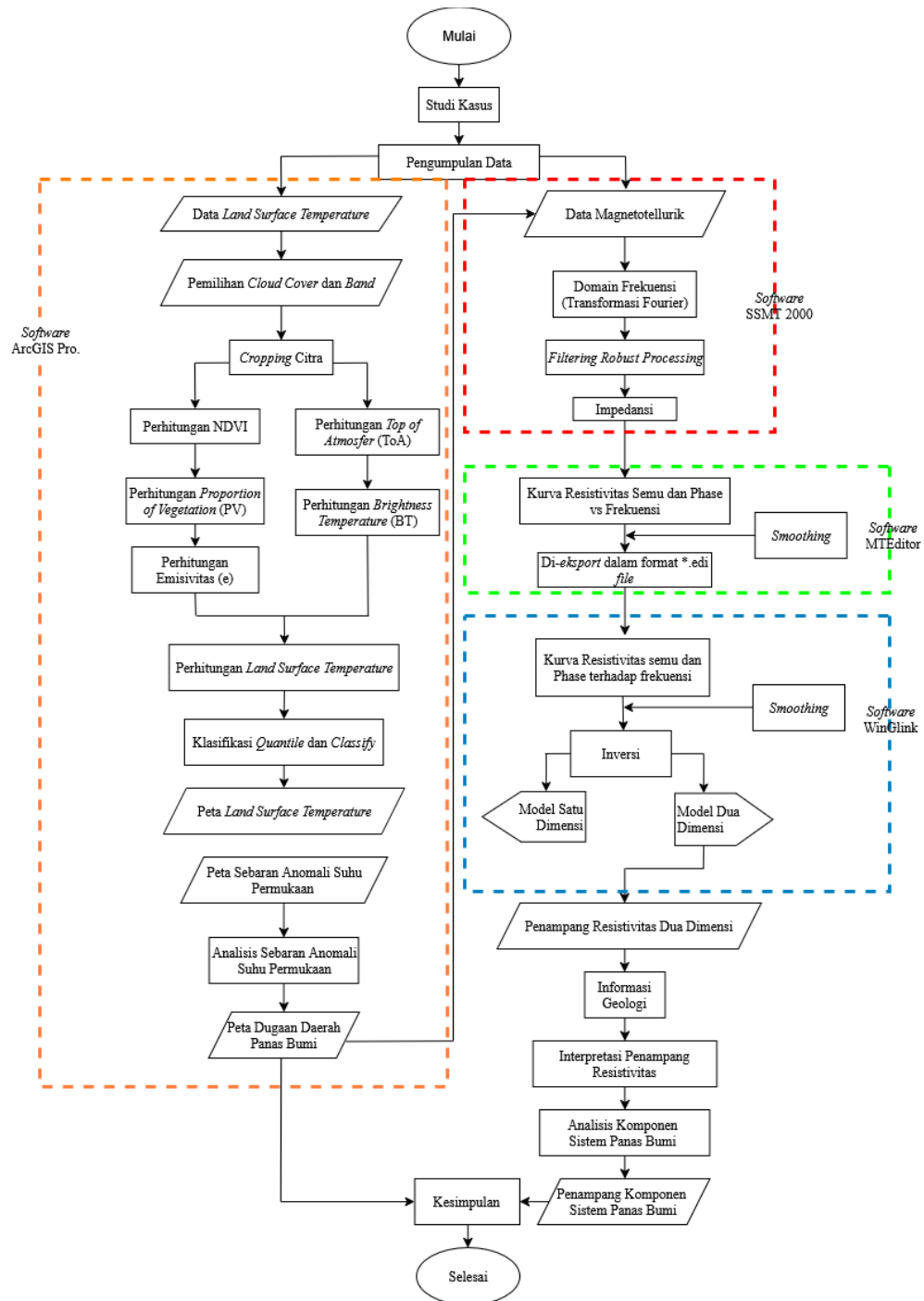
No.	Stasiun Ukur	Latitude(meter)	Longitude(meter)	Elevasi(meter)
1	MTP29A	623000	9067013	145
2	MTP30A	624001	9067013	159
3	MTPS-09	623953	9063169	314
4	MTPS-10	626007	9062933	480
5	MTPS-11	625073	9062960	420
6	MTPS-12	627167	9063052	427
7	MTPS-13	628969	9063013	200
8	MTPS-14	630036	9063013	56
9	MTPS-15	628115	9063066	283
10	MTPS-16	630814	9063151	127
11	MTPS-25	625021	9064849	243
12	MTPS-26	626980	9064921	252
13	MTPS-27	626059	9064951	265
14	MTPS-28	628115	9064987	185
15	MTPS-29	628647	9065226	142
16	MTPS-30	629983	9065014	200
17	MTPS-31	631111	9064931	224
18	MTPS-32	623997	9065099	232
19	MTPS-40	631000	9067000	260
20	MTPS-41	629157	9066897	250
21	MTPS-42	625957	9067082	190
22	MTPS-43	630061	9066863	220
23	MTPS-44	627057	9067035	210
24	MTPS-45	627973	9067001	195
25	MTPS-51	627607	9063032	347
26	MTPS-53	626430	9065035	239
27	MTPS-54	624992	9066982	153
28	MTPS-56	627514	9066988	218



Gambar 3. 5 Peta Sebaran Titik Ukur Magnetotellurik (MT)

3.4 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan untuk mencapai tujuan penelitian. Tahapan tersebut ditunjukkan melalui diagram alir Gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Diagram Alir Penelitian

3.5 Pengolahan Data

3.5.1 Pengolahan *Land Surface Temperature*

Metode *Land Surface Temperature* (LST) pada penelitian ini memanfaatkan data citra satelit Landsat 9. Data tersebut untuk mengidentifikasi anomali suhu di permukaan bumi, yang dapat

mengindikasikan keberadaan sistem panas bumi. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip bahwa daerah dengan aktivitas panas bumi cenderung memiliki suhu permukaan yang lebih tinggi dibandingkan area di sekitarnya.

Dalam penelitian ini, data LST diakuisisi dari citra satelit Landsat 9. Pemilihan data dilakukan untuk mendapatkan data yang diinginkan, meliputi pemilihan kualitas data citra berdasarkan kecerahan citra dan bersih dari tutupan awan di wilayah penelitian dengan *cloud cover* sebesar 3.7%. Kemudian memilih *band – band* yang akan digunakan, seperti *band red*, *near infrared* (NIR), dan *Thermal Infrared* (TIR).

Pengolahan data umumnya dimulai dengan meng-input *band* citra Landsat 9 dalam *file *.TIF* ke dalam software ArcGIS Pro. Data tersebut kemudian di *cropping* menggunakan fungsi *clip raster*. Selanjutnya, data *band* yang sudah di *clip* akan digunakan untuk menghitung *normalized difference vegetation index* (NDVI), dilanjutkan dengan perhitungan *top of atmosfer* (TOA) untuk menghilangkan pengaruh variasi irradiansi matahari dan perbedaan sensor. Setelah itu, dihitung *proportion of vegetation* (PV) dan emisivitas (e). Nilai – nilai ini kemudian akan di konversi menjadi nilai suhu kecerahan (*brightness temperature*). Sebagai tahap akhir, perhitungan *land surface temperature* (LST) dilakukan menggunakan software ArcGIS Pro.

Berikut adalah tahapan pengolahan *band* citra Landsat 9 yang dilakukan beserta *tools* yang digunakan:

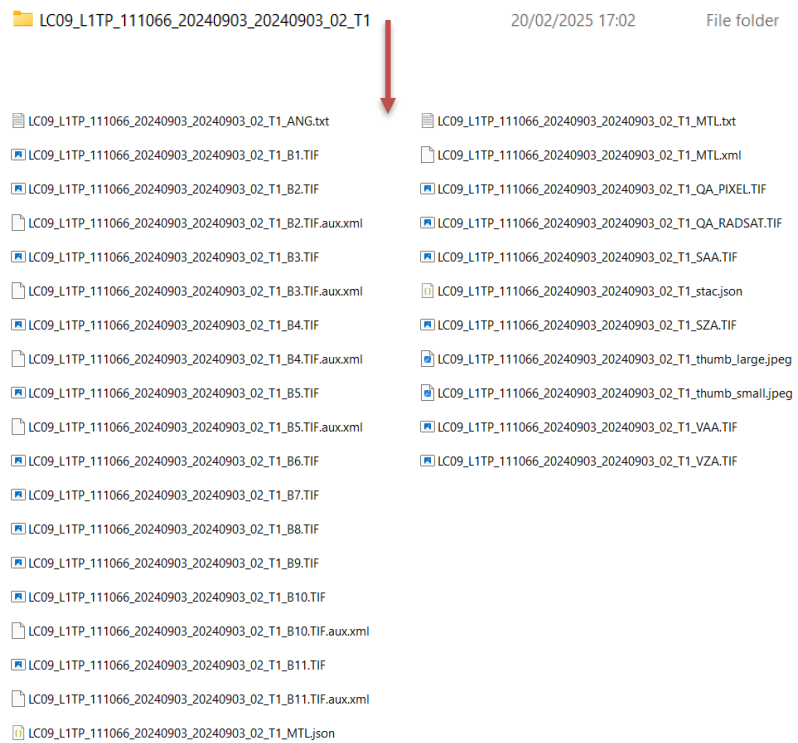
- (i) Pemotongan (*cropping*) *band* citra Landsat 9 menjadi ukuran area studi menggunakan fungsi *clip raster* di software ArcGIS Pro.
- (ii) Selanjutnya, perhitungan NDVI, TOA, PV, emisivitas, dan suhu kecerahan (BT) dilakukan menggunakan *raster calculator* dengan bantuan software ArcGIS Pro.
- (iii) Tahap akhir adalah melakukan perhitungan *land surface temperature* yang juga menggunakan *raster calculator* dengan

bantuan software ArcGIS Pro.

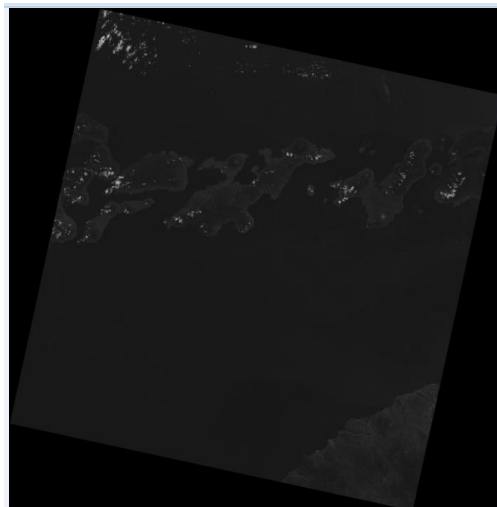
Untuk proses pengolahan data citra Landsat 9 lebih jelasnya ditunjukkan pada lampiran 2.

3.5.1.1 Data *Land Surface Temperature*

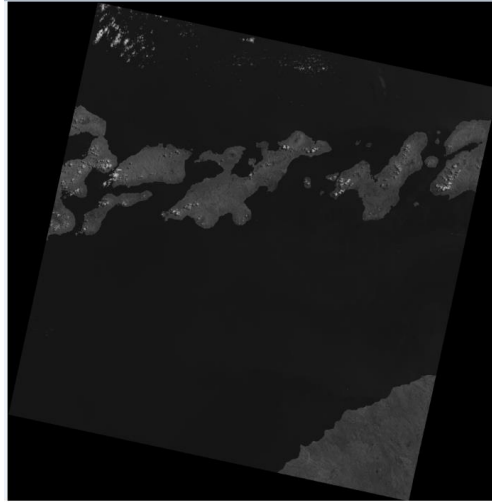
Data yang di unduh dari platform online USGS Earth Explorer berupa folder yang berisi kumpulan data *band* dalam format *.TIF dan metadata Landsat dalam format *.txt, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7. Data *band* citra yang akan digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.8 hingga 3.10. *Band red* (Gambar 3.8) adalah hasil rekaman energi dalam panjang gelombang cahaya merah (sekitar 600 – 700 nm). *Band Near Infrared* (NIR) (Gambar 3.9) merekam energi dalam panjang gelombang inframerah dekat (sekitar 800 – 900 nm), sementara dan *Band Thermal Infrared* (TIR) (Gambar 3.10) merupakan hasil rekaman energi dalam panjang gelombang inframerah termal (sekitar 1000 – 1300 nm).



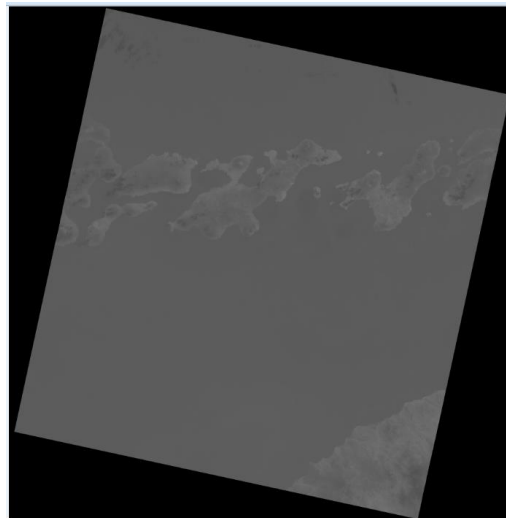
Gambar 3. 7 Folder Hasil Unduh Data Citra Landsat 9



Gambar 3. 8 Citra *Band Red*



Gambar 3. 9 Citra *Band Near Infrared* (NIR)



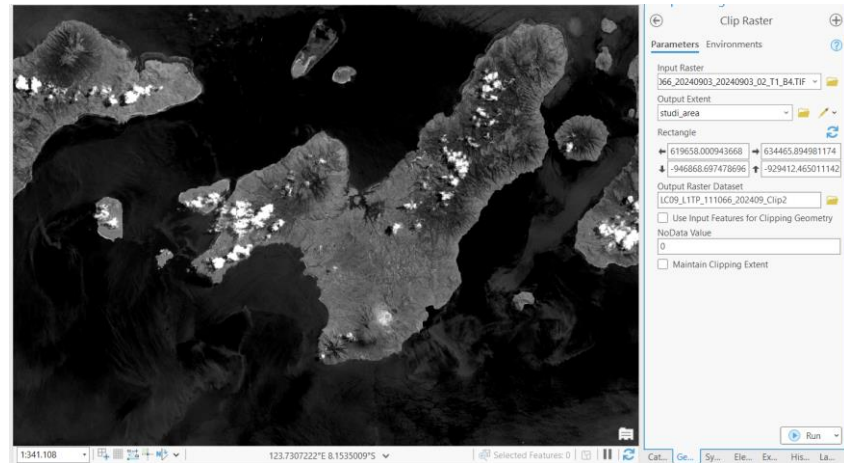
Gambar 3. 10 Citra *Band Thermal Infrared* (TIR)

3.5.1.2 Pemotongan (*Cropping*) Citra Landsat 9

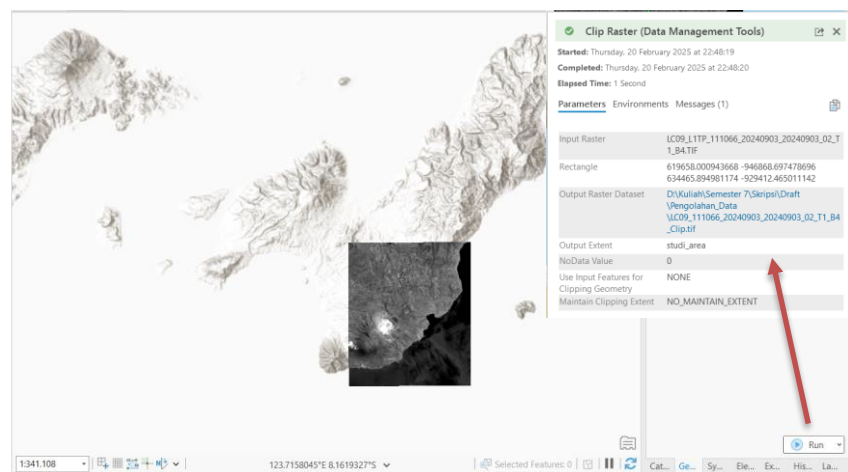
Data *band* yang terekam oleh citra Landsat 9 memiliki cakupan area yang luas. Oleh karena itu, *cropping* bertujuan untuk memfokuskan data pada area studi agar data yang diolah menjadi relevan, efisien, dan sesuai dengan wilayah penelitian, yang selanjutnya digunakan untuk mendapatkan nilai *land surface temperature*.

Untuk melakukan *Cropping*, menu yang digunakan adalah *Geoprocessing* dengan tools *Clip raster* (Gambar 3.11). Pada bagian *input parameter raster*, masukan band yang akan dipotong. Sedangkan

untuk bagian *output extend*, yang merupakan parameter *cropping*, dalam penelitian ini menggunakan area studi yang telah ditentukan. Setelah semua pengaturan selesai, proses pemotongan *band* citra dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Sebagai contoh Gambar 3.12 menunjukkan *cropping* pada citra *band* 4.



Gambar 3. 11 Input Parameter dan Citra Sebelum *Cropping*



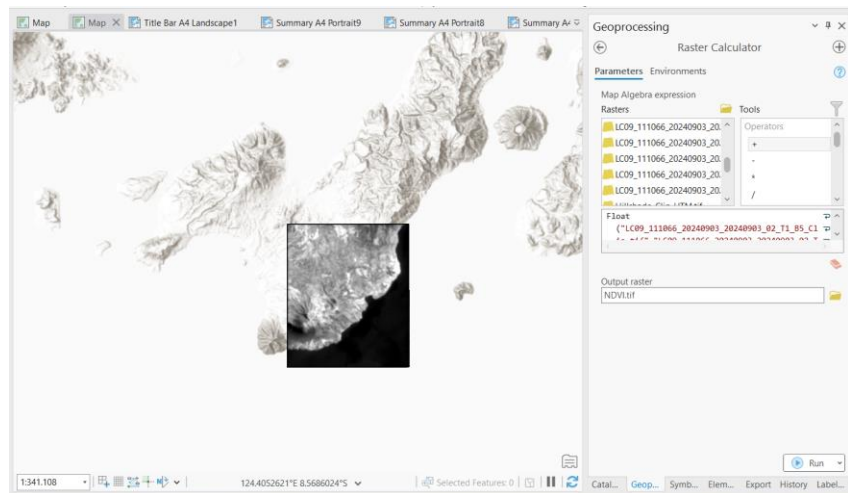
Gambar 3. 12 Citra Setelah dilakukan *Cropping*

3.5.1.3 Perhitungan Data Citra Landsat 9

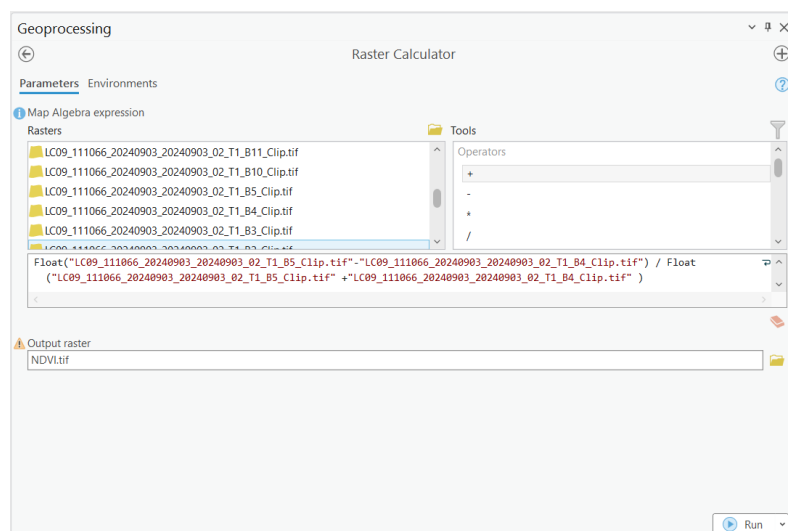
Setelah melakukan proses *Cropping* langkah selanjutnya yaitu melakukan perhitungan NDVI atau Indeks vegetasi yang merupakan ukuran tingkat kehijauan (klorofil) vegetasi (Ramadhan & Saputra, 2021). Pada NDVI ini perhitungan dilakukan dengan

memanfaatkan data *band Near Infrared (NIR)* dan *band red*.

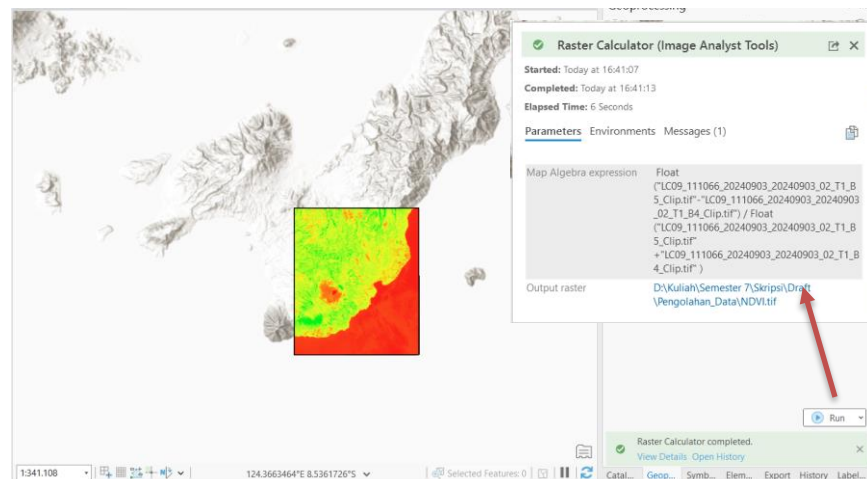
Untuk melakukan perhitungan, menu yang digunakan adalah *Geoprocessing* dengan *tools Raster Calculator* (Gambar 3.13). Pada bagian *input* parameter, masukan data *band* dengan format menggunakan persamaan (2.1) (Gambar 3.14). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan NDVI dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.15 menunjukkan hasil perhitungan NDVI.



Gambar 3. 13 Menu *Geoprocessing (Raster Calculator)* dan Citra Sebelum Perhitungan NDVI

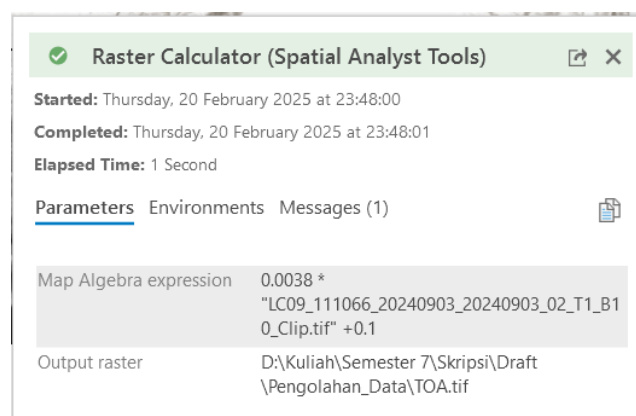


Gambar 3. 14 Input Parameter Perhitungan Pada *Raster Calculator* Menggunakan Persamaan (2.1)

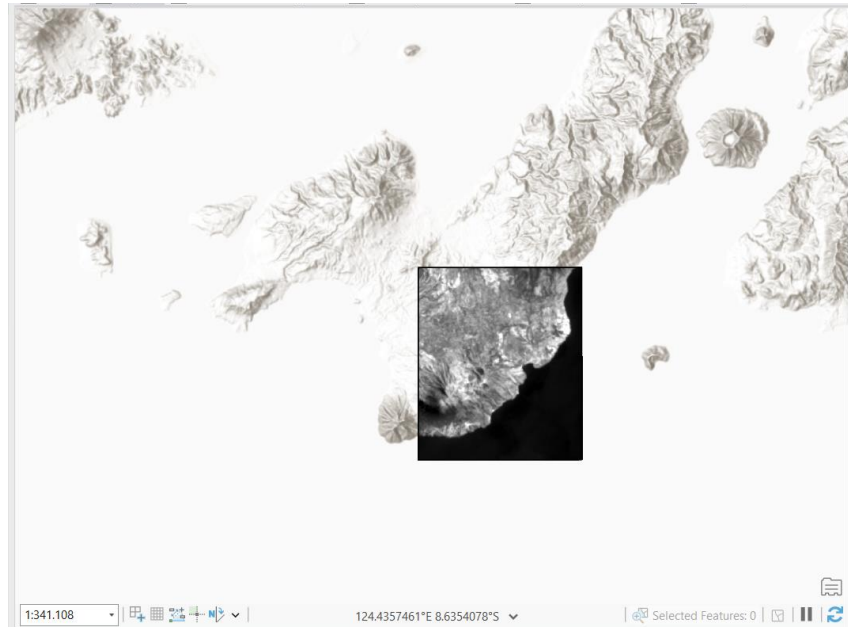


Gambar 3. 15 Citra Setelah Perhitungan NDVI

Setelah mendapatkan hasil NDVI, selanjutnya dilakukan koreksi terhadap data radiasi yang diterima oleh sensor satelit dari puncak atmosfer (*Top of Atmosfer*), untuk memperhitungkan pengaruh atmosfer. Proses perhitungan ini menggunakan menu *Geoprocessing* dengan *tools Raster Calculator*. Pada bagian *input* parameter, masukan data dengan format menggunakan persamaan (2.2) (Gambar 3.16). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan TOA dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.17 menunjukkan hasil perhitungan TOA.

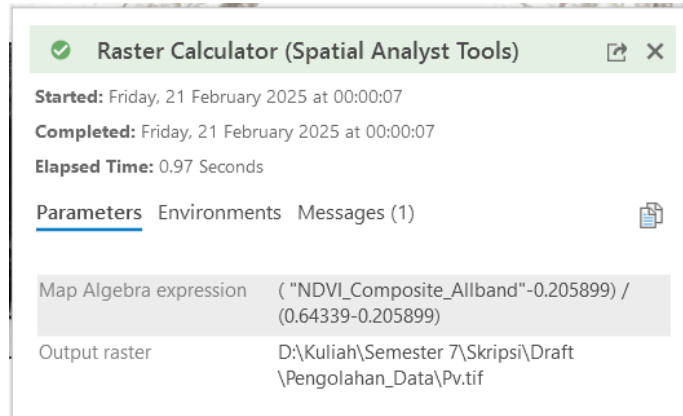


Gambar 3. 16 Parameter Input Pada Perhitungan TOA Menggunakan Persamaan (2.2)

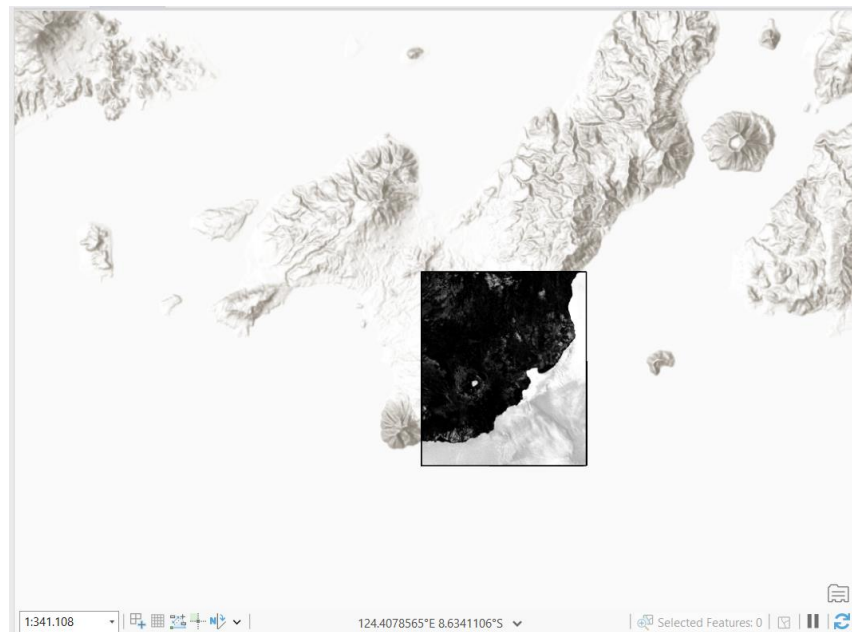


Gambar 3. 17 Citra Setelah Perhitungan TOA

Setelah mendapatkan hasil TOA, langkah berikutnya adalah menghitung *Proportion of Vegetation* (PV). Nilai PV menggambarkan proporsi tutupan vegetasi dalam satu piksel citra. Nilai ini diperlukan dalam tahapan perhitungan emisivitas karena vegetasi memengaruhi seberapa besar energi radiasi yang dipancarkan oleh permukaan bumi. Proses perhitungan ini menggunakan menu *Geoprocessing* dengan *tools Raster Calculator*. Pada bagian *input* parameter, masukan data dengan format menggunakan persamaan (2.3) (Gambar 3.18). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan PV dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.19 menunjukkan hasil perhitungan PV.



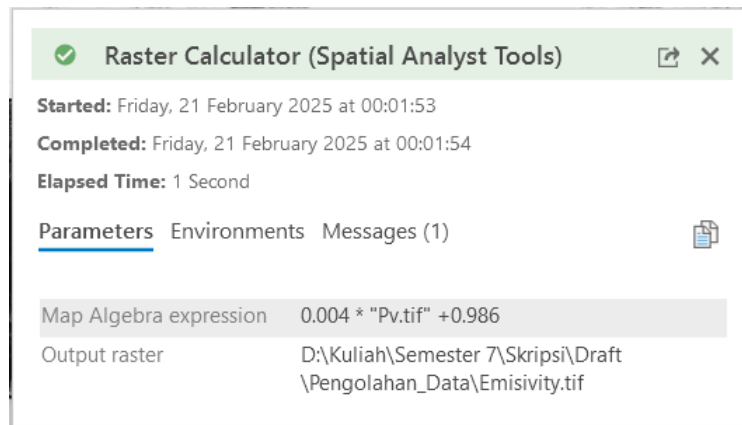
Gambar 3. 18 Parameter Input Pada Perhitungan PV Menggunakan Persamaan (2.3)



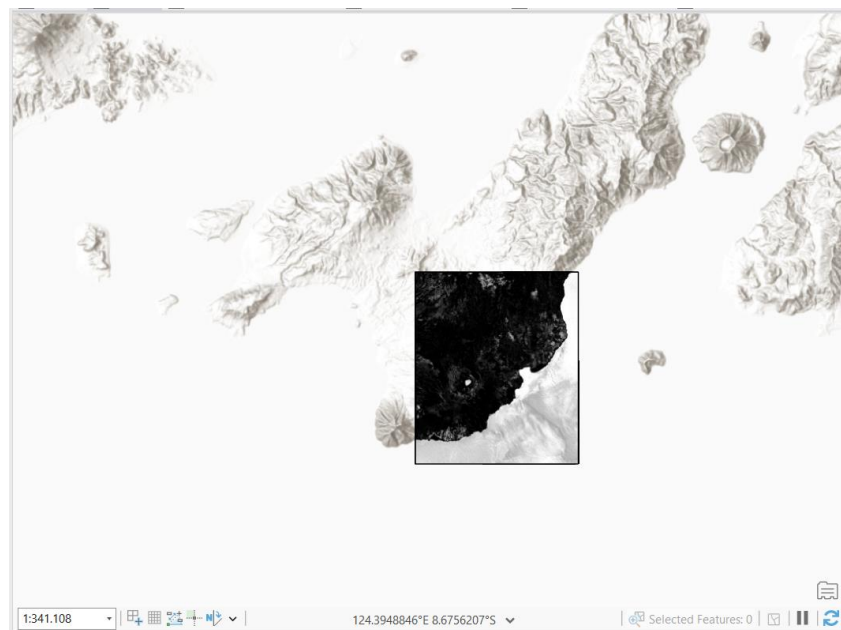
Gambar 3. 19 Citra Setelah Perhitungan PV

Setelah mendapatkan hasil *Proportion of Vegetation* (PV), langkah selanjutnya adalah menghitung nilai emisivitas. Nilai emisivitas digunakan untuk memperbaiki estimasi suhu permukaan agar lebih akurat. Proses perhitungannya dilakukan melalui menu *Geoprocessing* dengan tools *Raster Calculator*. Pada bagian *input* parameter, masukan data dengan format menggunakan persamaan (2.4) (Gambar 3.20). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan PV dapat dimulai

dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.21 menunjukkan hasil perhitungan emisivitas.



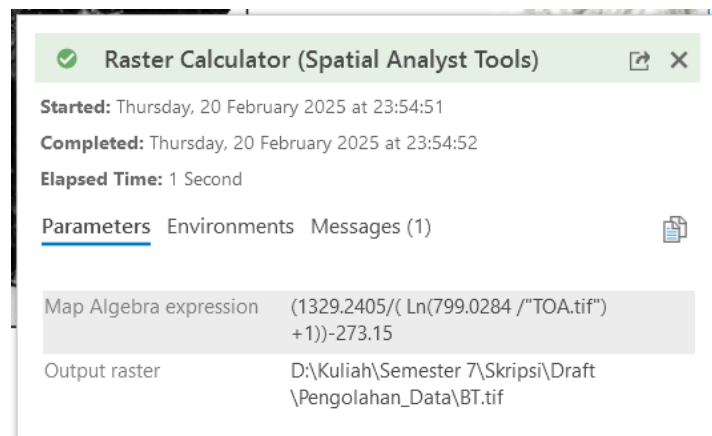
Gambar 3. 20 Parameter Input Pada Perhitungan Emisivitas Menggunakan Persamaan (2.4)



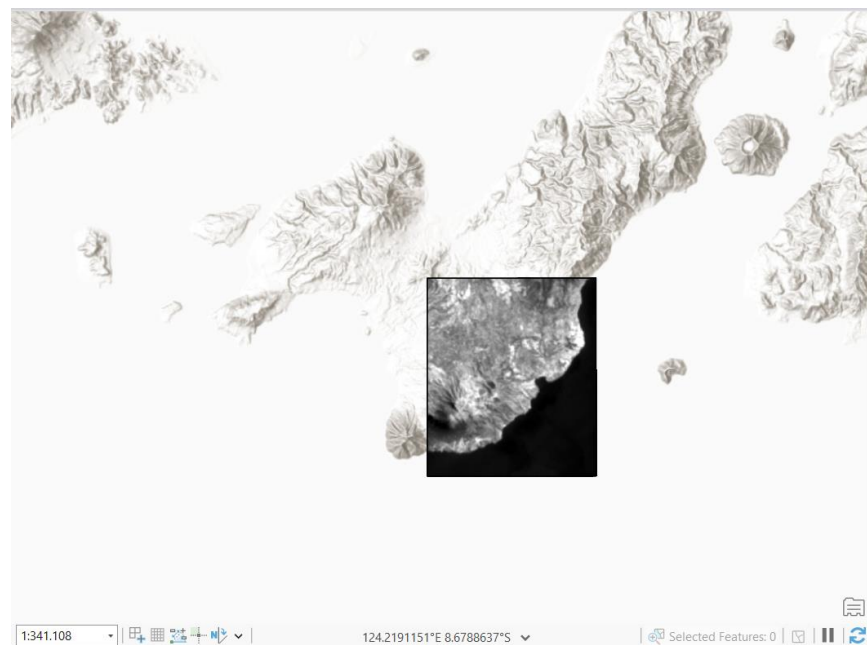
Gambar 3. 21 Citra Setelah Perhitungan Emisivitas

Setelah mendapatkan hasil emisivitas, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *Brightness Temperature* (BT). Nilai BT merupakan suhu radiasi termal dari suatu objek yang diukur oleh sensor satelit dalam satuan kelvin. Proses perhitungannya dilakukan melalui menu *Geoprocessing* dengan *tools Raster Calculator*. Pada bagian *input* parameter, masukan data dengan

format menggunakan persamaan (2.5) (Gambar 3.21). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan BT dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.23 menunjukkan hasil perhitungan emisivitas.



Gambar 3. 22 Parameter Input Pada *Perhitungan Brightness Temperature* Menggunakan Persamaan (2.5)



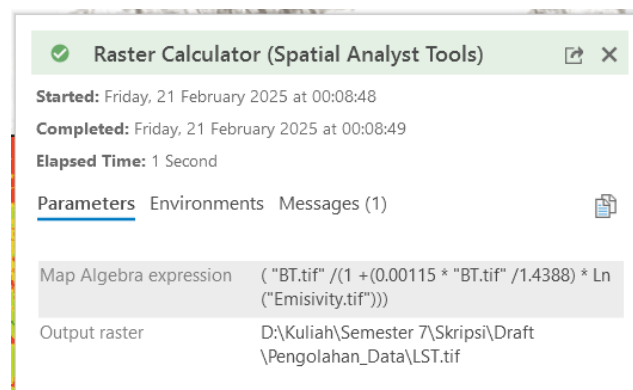
Gambar 3. 23 Citra Setelah Perhitungan Emisivitas

3.5.1.4 Perhitungan *Land Surface Temperature* (LST)

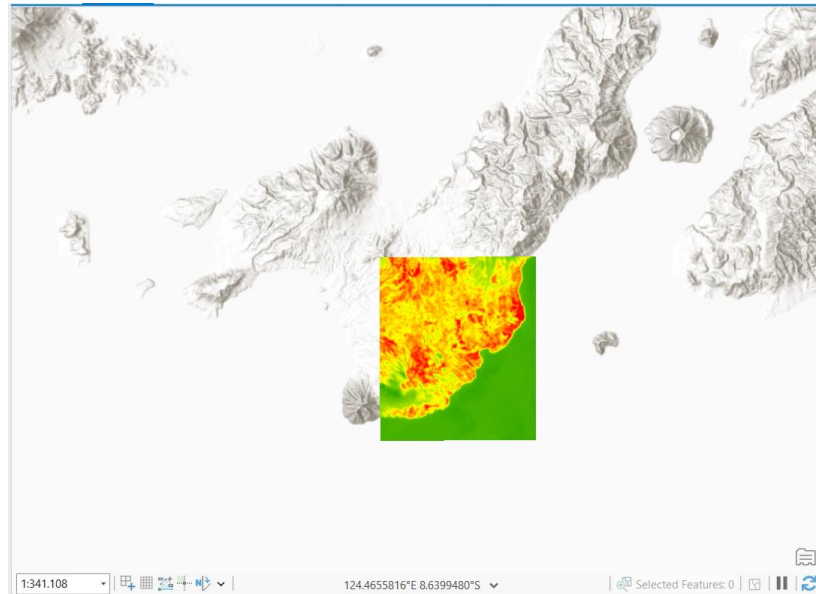
Land Surface Temperature (LST) adalah suhu terluar dari suatu objek. Setiap objek memiliki suhu permukaan yang

bervariasi, yang dipengaruhi oleh beberapa kondisi seperti atmosfer, keseimbangan energi, dan karakteristik termal permukaan serta lapisan bawah tanahnya (Ramadhan & Saputra, 2021). Setelah semua parameter yang dibutuhkan didapatkan dari pengolahan band multispektral dan *thermal*, parameter-parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk perhitungan LST. Nilai LST ini diperoleh dari hasil perhitungan *Brightness Temperature* (BT) dan emisivitas (e).

Proses perhitungannya dilakukan melalui menu *Geoprocessing* dengan *tools Raster Calculator*. Pada bagian *input* parameter, masukan data dengan format menggunakan persamaan (2.6) (Gambar 3.24). Sedangkan untuk bagian *output raster* dapat disesuaikan penamaanya untuk *file* hasil perhitungan. Setelah semua pengaturan selesai, proses perhitungan LST dapat dimulai dengan menjalankan (*running*) *tools* tersebut. Gambar 3.25 menunjukkan hasil perhitungan LST.



Gambar 3. 24 Parameter Input Pada Perhitungan LST
Menggunakan Persamaan (2.6)



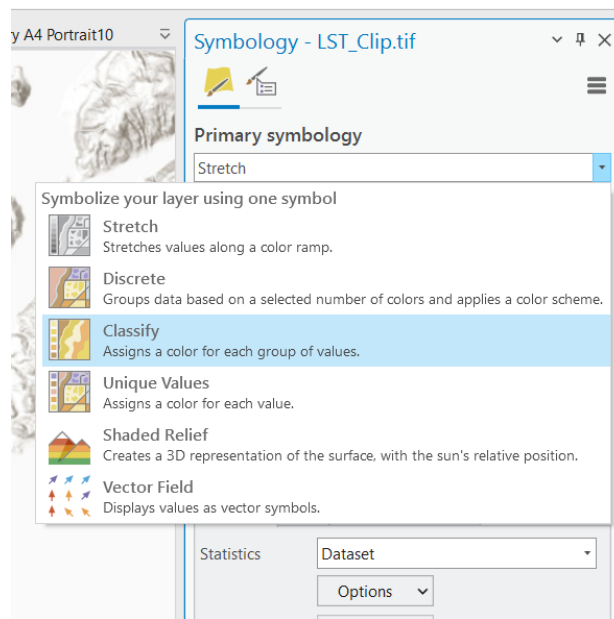
Gambar 3. 25 Citra Setelah Perhitungan *Land Surface Temperature* (LST)

3.5.1.5 Penentuan Anomali *Land Surface Temperature*

Dalam proses pembuatan peta *Land Surface Temperature* (LST) pada *software* ArcGIS Pro, data suhu permukaan dikelompokkan melalui metode *classify* (Gambar 3.26). Tujuannya adalah untuk mengelompokkan nilai suhu ke dalam kategori yang lebih sedikit, sehingga lebih mudah di analisis dan divisualisasikan. Meskipun ArcGIS Pro memungkinkan penentuan jumlah kelas secara otomatis atau manual (Gorr & Kurland, 2020). Dalam pengelompokan data ini dipilih metode *quantile* (Gambar 3.27).

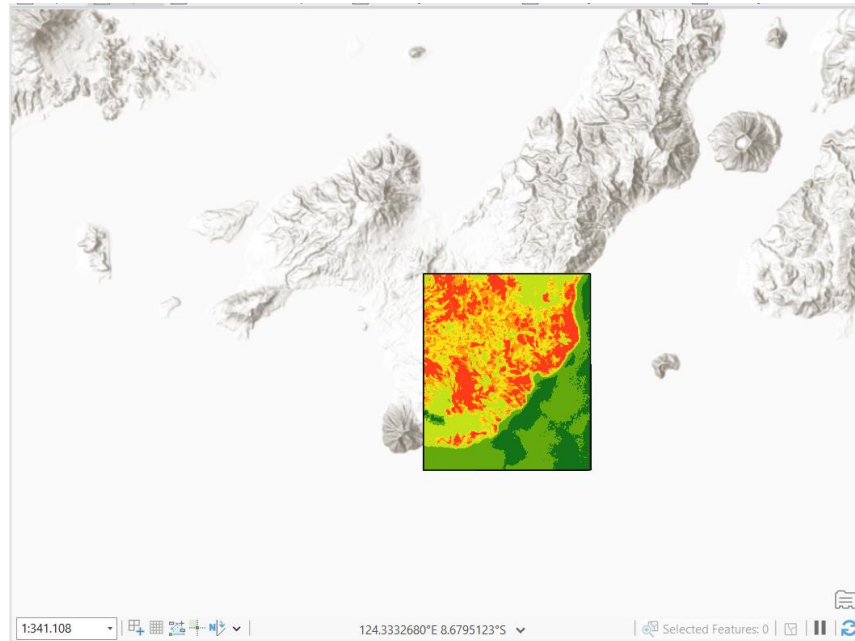
Metode *quantile* bekerja dengan membagi rentang data sehingga setiap kelas memiliki jumlah data yang sama (bukan rentang nilai yang sama). Pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa setiap kategori memiliki representasi visual yang setara di peta, terlepas dari distribusi nilai yang mungkin tidak merata. Dengan demikian, mengklasifikasikan data LST menggunakan metode *quantile* berarti data suhu permukaan dikelompokkan secara seimbang, dimana setiap kelompok memiliki jumlah piksel data yang setara.

Dalam penelitian ini, jumlah kelompok data atau kelas ditentukan menjadi enam (Gambar 3.28). Hasil pengelompokan metode ini, beserta pemilihan jumlah kelasnya, ditunjukkan pada Gambar 3.29. Kelas terakhir, yang merepresentasikan suhu tertinggi, dianggap sebagai nilai anomali *Land Surface Temperature* (LST), atau lebih dikenal sebagai anomali suhu permukaan.



Gambar 3. 26 Pemilihan Metode Classify

Reza Mochammad Akbar, 2025
**PENDUGAAN PANAS BUMI BERDASARKAN LAND SURFACE TEMPERATURE DAN
 MAGNETOTELLURIK (STUDI KASUS: PANTAR, NUSA TENGGARA TIMUR)**
 Universitas Pendidikan Indonesia | repository.upi.edu | perpustakaan.upi.edu



Gambar 3. 29 Hasil Citra Setelah Dilakukan Pemilihan Metode Quantile

3.5.2 Pengolahan Data Magnetotellurik

Metode Magnetotellurik (MT) mampu menggambarkan kondisi struktur batuan di bawah permukaan bumi hingga kedalaman ratusan kilometer, bahkan mencapai batas antara kerak dan mantel bumi. Kemampuan ini disebabkan oleh penggunaan sinyal alami dengan frekuensi rendah, yang memungkinkan penetrasi gelombang elektromagnetik menembus lapisan bumi pada kedalaman yang lebih dalam. Semakin rendah frekuensi sinyal, semakin besar kemampuan gelombang untuk menembus batuan dengan resistivitas tinggi, sehingga metode ini sangat efektif untuk memahami struktur geologi dalam skala yang luas dan mendalam (Kadir, 2011).

Proses pengolahan data ini umumnya dimulai dengan menginput data pengukuran deret waktu variasi medan listrik (E) dan medan magnet (H). Data ini kemudian diubah ke domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier, melalui proses *robust processing*, dan dikonversi menjadi format *.MTH (Magnetotellurik *High Frequency*) dan *.MTL (Magnetotellurik *Low Frequency*) menggunakan perangkat lunak SSMT 2000. Selanjutnya, file *.MTH

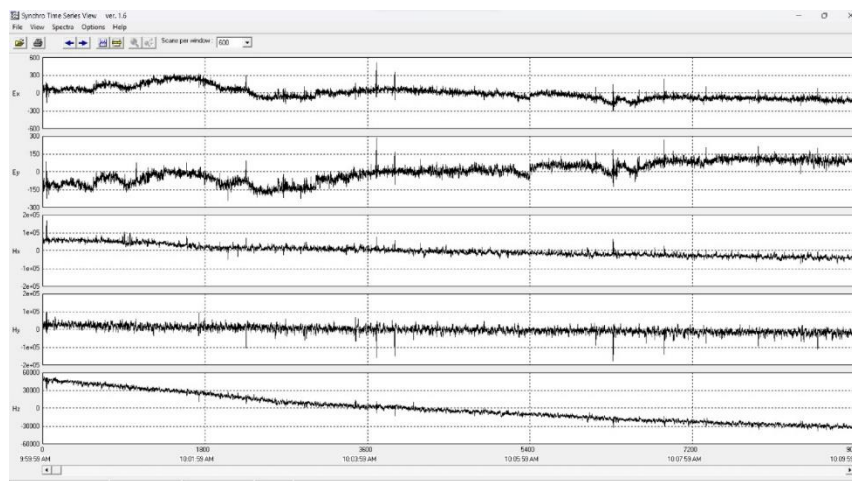
dan *.MTL dibaca oleh MTEditor untuk menghasilkan kurva *apparent resistivity* dan *phase*, yang kemudian akan melewati proses seleksi *crosspower (smoothing)* untuk mendapatkan kurva yang lebih optimal. Tahap akhir melibatkan inversi dua dimensi menggunakan *software* WinGlink untuk membuat pemodelan dua dimensi. Berikut ini, tahapan pengolahan data Magnetotellurik yang dilakukan serta *software* yang digunakan:

- (i) Transformasi data *time series* diubah ke dalam domain frekuensi menggunakan *Fourier Transform* dengan bantuan *software* SSMT 2000.
- (ii) Selanjutnya, dilakukan *robust processing* menggunakan *software* SSMT 2000.
- (iii) Proses seleksi *crosspower* untuk mendapatkan kurva yang lebih baik dilakukan dengan *software* Mteditor.
- (iv) Tahap terakhir adalah melakukan inversi dua dimensi menggunakan *software* WinGlink.

Untuk proses pengolahan data MT lebih jelasnya ditunjukkan pada lampiran 4.

3.5.2.1 Data Magnetotellurik

Data mentah yang direkam oleh alat Magnetotellurik (MT) berformat deret waktu (*time series*). Seperti yang terlihat pada Gambar 3.30, sumbu vertikal (y) merepresentasikan amplitudo yaitu nilai *magnitude* dari komponen medan listrik (E_x , E_y) dan medan magnet (H_x , H_y , H_z) yang direkam di lapangan. Sementara itu, sumbu horizontal (x) menunjukkan waktu *sampling* perekaman. *Time series* ini dapat digambarkan sebagai sinyal kontinu apriodik, yang dicirikan oleh variasi amplitudo dan jumlah getarannya.



Gambar 3. 30 Contoh Rekaman Data Mentah (*Time Series*) hasil perekaman selama 10 menit

3.5.2.2 *Fourier Transform* (FFT)

Transformasi Fourier adalah operasi matematis untuk menganalisis spektral dengan mengubah sinyal (Gusnia et al., 2022). Hal ini dilakukan karena parameter fisis seperti impedansi, resistivitas dan konduktivitas merupakan hasil dari fungsi frekuensi (Chave & Jones, 2012). Data yang terekam pada alat Magnetotellurik (MT) berupa sinyal dalam domain waktu. Untuk memperoleh nilai impedansi yang selanjutnya digunakan menghitung resistivitas (seperti ditunjukkan pada Gambar 3.31), sinyal ini diubah ke domain frekuensi melalui Transformasi Fourier. Transformasi ini sangat penting karena dapat mengidentifikasi apakah suatu sinyal memiliki komponen frekuensi.

Secara konseptual, Transformasi Fourier idealnya diterapkan pada fungsi kontinu (analog), yaitu fungsi yang nilainya selalu ada di setiap waktu. Namun, dalam praktiknya, data *time series* hasil pengukuran MT merupakan fungsi diskrit, di mana nilai-nilainya hanya diketahui pada interval *sampling* tertentu, bukan pada setiap saat. Untuk mengatasi hal ini, dalam komputasi teknik, digunakan Transformasi Fourier Diskrit (DFT). DFT adalah metode

Transformasi Fourier yang dihitung secara langsung untuk data diskrit, dan formulasinya dapat ditulis pada Persamaan (3.1) sebagai berikut:

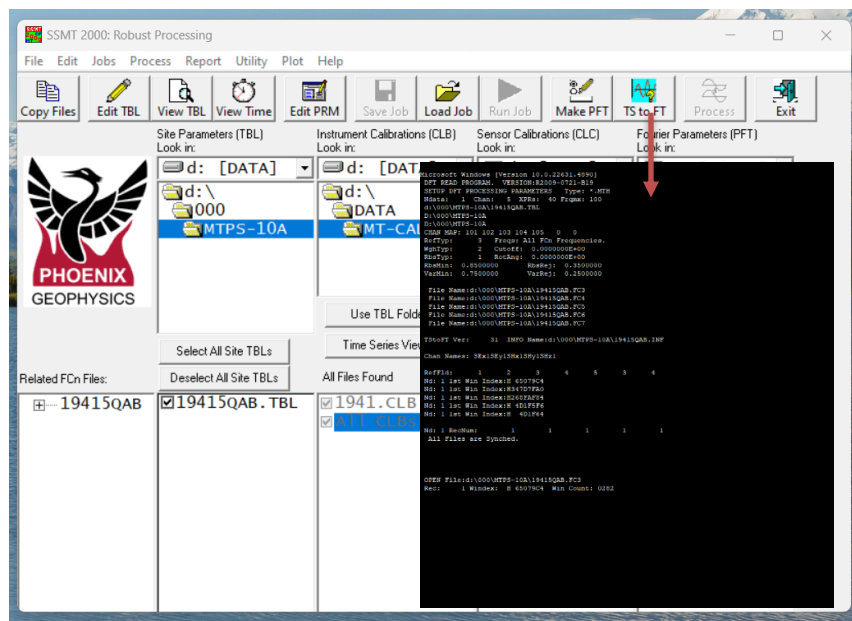
$$F(w) = \sum_{T=0}^{N-1} f(T)e^{i2\pi WT/N} \quad (3.1)$$

Keterangan:

N = Jumlah data deret waktu

T = Data indeks waktu, $f(T) = f(1), f(2), f(3), \dots$

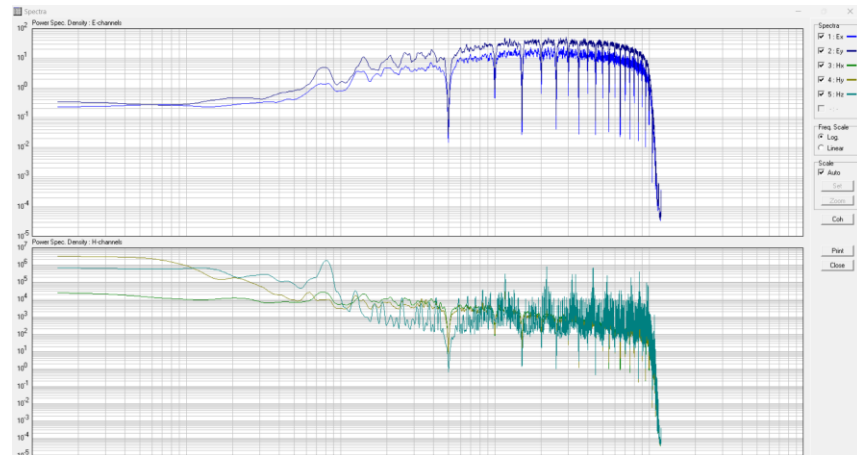
W = indeks frekuensi



Gambar 3. 31 Proses Konversi Domain Waktu ke Domain Frekuensi Pada *Software SSMT2000*

Transformasi Fourier adalah fungsi yang bertujuan untuk mengubah sinyal dari domain waktu menjadi spektra frekuensi, dan mampu merepresentasikan sinyal non-periodik. Sebagai contoh, spektra frekuensi yang dihasilkan dari Transformasi Fourier pada

data time series di Gambar 3.14 ditampilkan pada Gambar 3.15.



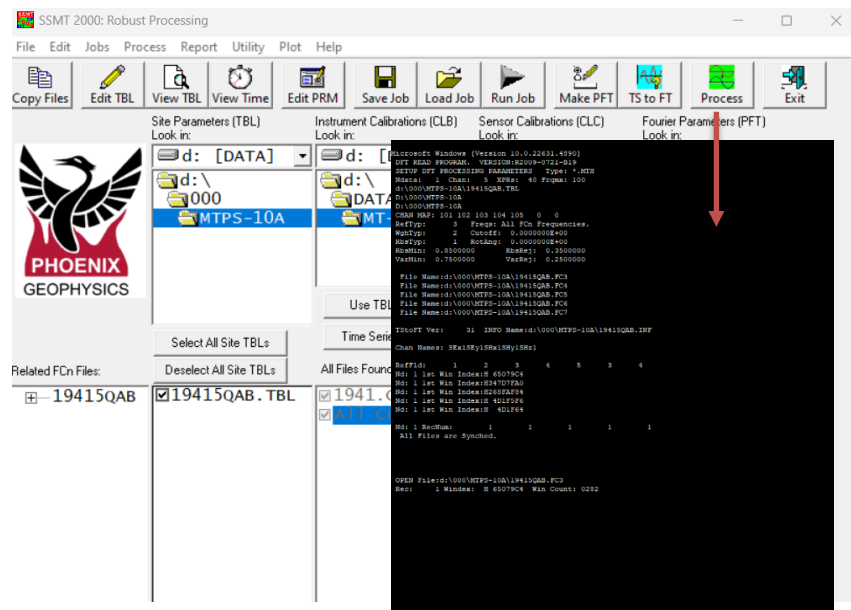
Gambar 3. 32 Spektra Frekuensi Hasil Proses Transformasi Fourier

Pada Gambar 3.32, terlihat bahwa spektra E (kurva atas) menampilkan sinyal medan listrik terhadap frekuensi, sedangkan spektra H (kurva bawah) menunjukkan tampilan sinyal dari medan magnetik terhadap frekuensi.

3.5.2.3 Robust Processing

Setelah transformasi Fourier, langkah selanjutnya adalah *robust processing* untuk menghilangkan *biasing noise* serta menghitung nilai impedansi, resistivitas, dan fase. Proses ini diawali dengan mengedit parameter robust (edit PRM) pada *software* SSMT 2000. Pada menu ini, mengatur lokasi penyimpanan hasil pengolahan dan menentukan nilai maksimum *crosspower*. *Crosspower* merujuk pada jumlah data dalam satu frekuensi yang dapat diamati di MTeditor. Pengaturan maksimum *crosspower* ini menentukan seberapa banyak data yang akan di seleksi pada tahap selanjutnya. Hasil dari proses ini adalah data berformat *.MTH dan *.MTL yang akan digunakan untuk pengolahan lebih lanjut di *software* MTeditor. Proses *robust processing* ketika sedang berjalan menggunakan *software* SSMT

2000 ditunjukkan pada Gambar 3.33.



Gambar 3. 33 Menu "Proses" dan *Robust Processing*

Robust Processing digunakan sebagai filter *noise* awal untuk data MT. umumnya data dengan nilai yang menyimpang jauh dari nilai rata-rata dapat dianggap sebagai *noise*, *robust processing* berfungsi untuk menangani data yang mengandung kesalahan (*outlier*) dirancang untuk meminimalkan dampak dari data yang tidak akurat (*ekstrem*). *Robust processing* adalah teknik pemrosesan statistik yang menggunakan pembobotan iteratif dari residual untuk mengidentifikasi dan menghilangkan data yang menyimpang akibat *noise* (Simpson & Bahr, 2005) . Sehingga menghasilkan model yang lebih stabil dan akurat (Desifatma et al., 2024).

3.5.2.4 Seleksi *Crosspower*

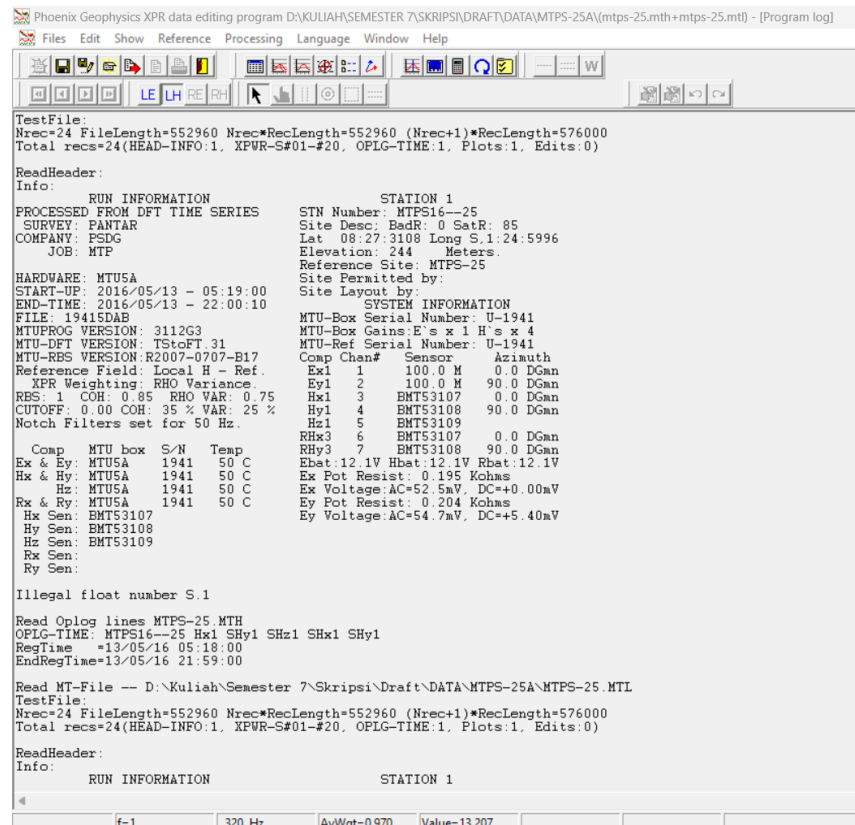
Hasil dari *Fast Fourier Transform* berupa file data dalam bentuk data parsial *MTL dan *MTH. Data resistivitas dan frekuensi ditampilkan dalam bentuk kurva yang dapat dibuka menggunakan *software* MTEditor seperti Gambar 3.34 dan Gambar 3.35. Pada tampilan Gambar 3.34 merupakan proses pembacaan data dari file *MTH dan *MTL. Pada tampilan Gambar

3.35 ini, terdapat empat kurva: kurva apparent resistivity vs. frekuensi di kiri atas, dan kurva fase vs. frekuensi di kiri bawah. Dua kurva di sebelah kanan merupakan representasi data individual dari kurva di sebelah kiri, dengan jumlah data yang ditampilkan ditentukan oleh nilai *crosspower* yang telah diatur sebelumnya pada *software* SSMT2000.

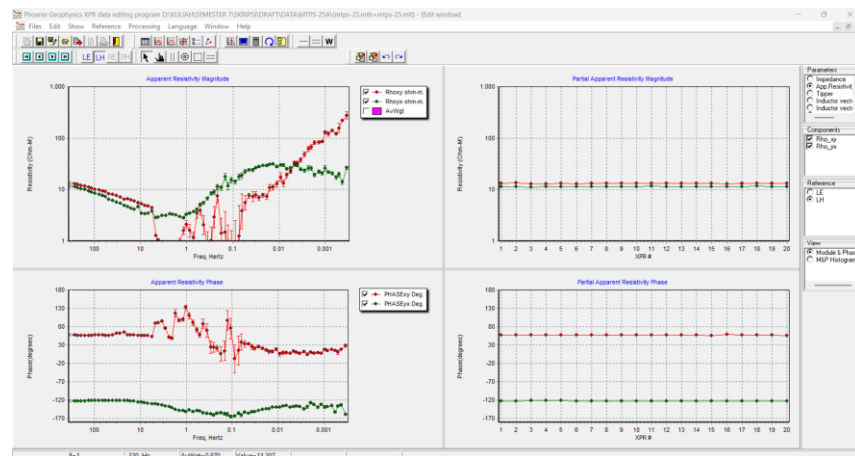
Noise dapat menyebabkan kurva menjadi acak dan tidak teratur. Untuk mengatasinya, dilakukan proses seleksi *crosspower* (*smoothing*) guna mendapatkan kurva resistivitas versus frekuensi yang lebih baik dan representatif seperti terlihat pada Gambar 3.36. Pada kurva ini, resistivitas semu dan fase mode TM ditandai dengan titik hijau, sementara resistivitas dan fase mode TE ditandai dengan titik kuning.

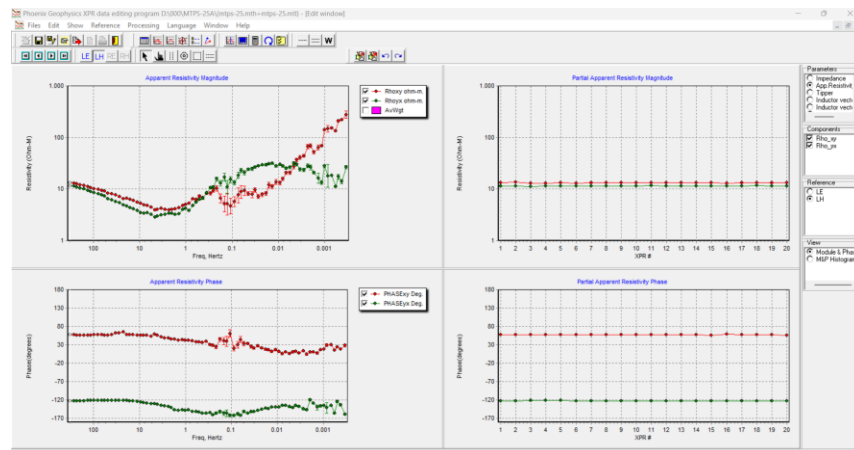
Idealnya, kurva TE dan TM seharusnya berimpit. Namun, heterogenitas permukaan saat pengukuran, yang disebabkan oleh lapisan tidak homogen, dapat menyebabkan terkumpulnya arah medan listrik pada batas heterogenitas. Kondisi ini mengakibatkan nilai resistivitas semu menurun pada lapisan yang resistif dan mengurangi pengukuran medan listrik. Akibatnya, frekuensi pada titik pengukuran MT akan bergeser ke atas jika melewati lapisan resistif dan bergeser ke bawah jika melewati lapisan konduktif. Proses seleksi *crosspower* yang maksimal akan menghasilkan kurva yang lebih halus, sehingga model yang dihasilkan pada proses inversi akan lebih akurat dan memiliki nilai error yang kecil.

Proses penyeleksian dilakukan dengan mengklik data yang ingin dinonaktifkan pada kurva sebelah kanan, yang secara otomatis akan mengubah tampilan pada kurva kiri atas dan kiri bawah. Setelah proses seleksi selesai, data disimpan dalam format *.mpk dan diekspor menjadi *file* *.edi.



Gambar 3. 34 Proses Pembacaan File *MTH dan *MTL

Gambar 3. 35 Contoh Kurva Sebelum di Seleksi *Crosspower*

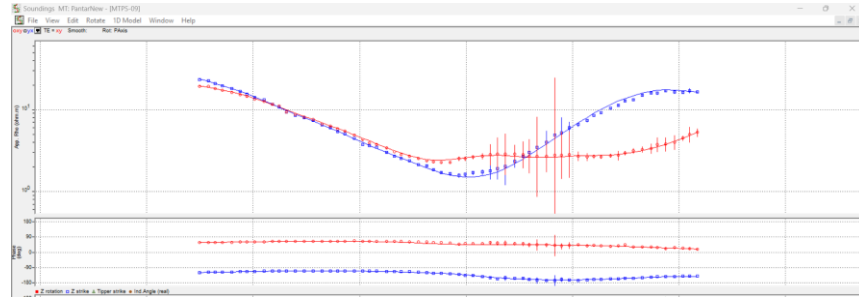


Gambar 3. 36 Contoh Kurva Setelah di *Crosspower*

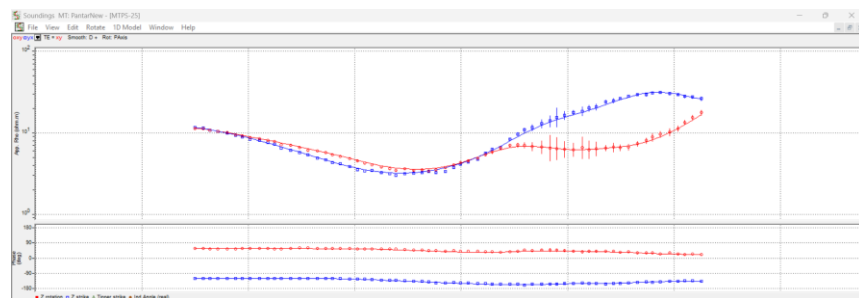
Kurva Magnetotellurik (MT) hasil seleksi *crosspower* dari dua puluh delapan titik pengukuran menggunakan *software* MTEditor ditunjukkan pada lampiran 4.

Di dalam *software* WinGlink, pada menu *Sounding*, kurva dihaluskan kembali untuk mendapatkan hasil yang lebih baik. Proses penghalusan ini melibatkan *input* nilai kesalahan yang diinginkan, dengan semua nilai simpangan diatur sebesar 0,1% untuk meminimalkan *error*. Perlu diketahui bahwa 0,1% adalah nilai terkecil yang bisa dimasukkan, sehingga menjadi acuan minimal untuk semua data yang digunakan.

Gambar 3.37 menampilkan kurva sebelum proses *smoothing* pada *software* WinGlink. Sub-menu *Shift* dapat digunakan untuk menyesuaikan setiap titik yang tidak tepat agar sedekat mungkin dengan garis kurva tegas. Setelah *smoothing*, kurva akan menjadi lebih baik seperti terlihat pada Gambar 3.38. Kurva *Sounding* ini menunjukkan hubungan antara resistivitas dan frekuensi, serta *phase* dan frekuensi. Hasil proses *smoothing* untuk dua puluh delapan titik pengukuran pada *software* WinGlink ditunjukkan pada Lampiran 4.



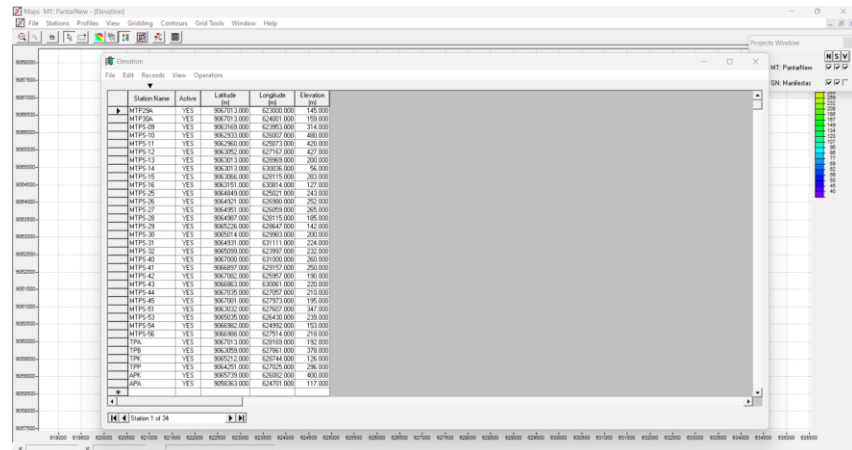
Gambar 3. 37 Kurva Resistivitas Terhadap Frekuensi dan *Phase* terhadap Frekuensi Sebelum Proses *Smoothing* pada *Software* WinGlink



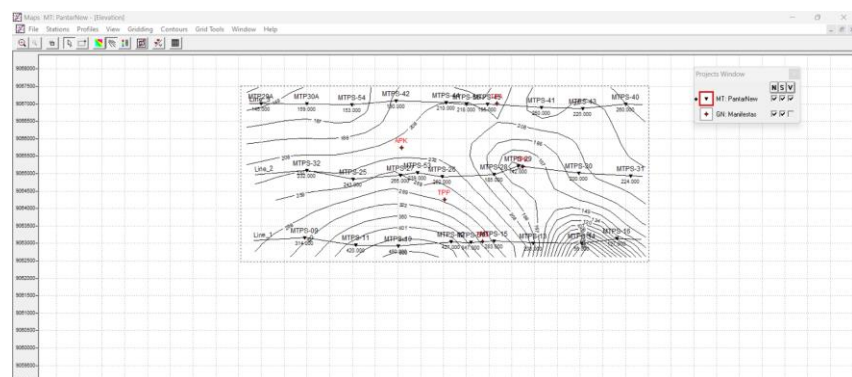
Gambar 3. 38 Kurva Resistivitas Terhadap Frekuensi dan *Phase* terhadap Frekuensi Setelah Proses *Smoothing* pada *Software* WinGlink

3.5.2.5 Pemodelan Inversi Menggunakan *software* WinGlink

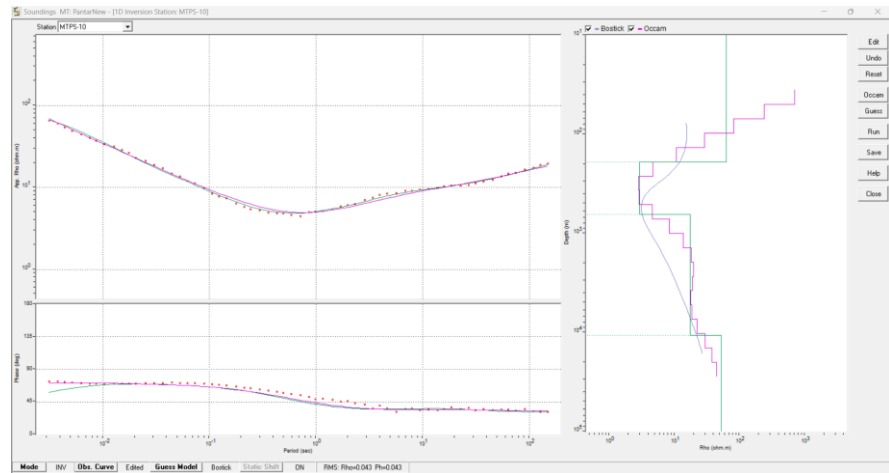
Setelah semua kurva MT melalui tahap seleksi *crosspower*, langkah selanjutnya adalah melakukan inversi satu dimensi (1D) dan dua dimensi (2D) menggunakan *software* WinGlink. Tahap awal dalam proses inversi adalah meng-*impor* data yang telah di seleksi *crosspower* dalam format *file* *.edi. Selain itu, koordinat titik pengukuran (Gambar 3.39) juga perlu dimasukkan, yang kemudian akan menghasilkan kontur elevasi beserta letak titik MT (Gambar 3.40).



Station Name	Active	Latitude	Longitude	Elevation
MTPS-01	YES	906793.000	123.000	145.000
MTPS-02	YES	906793.000	123.000	150.000
MTPS-03	YES	906793.000	123.000	155.000
MTPS-04	YES	906793.000	123.000	160.000
MTPS-05	YES	906793.000	123.000	165.000
MTPS-06	YES	906793.000	123.000	170.000
MTPS-07	YES	906793.000	123.000	175.000
MTPS-08	YES	906793.000	123.000	180.000
MTPS-09	YES	906793.000	123.000	185.000
MTPS-10	YES	906793.000	123.000	190.000
MTPS-11	YES	906793.000	123.000	195.000
MTPS-12	YES	906793.000	123.000	200.000
MTPS-13	YES	906793.000	123.000	205.000
MTPS-14	YES	906793.000	123.000	210.000
MTPS-15	YES	906793.000	123.000	215.000
MTPS-16	YES	906793.000	123.000	220.000
MTPS-17	YES	906793.000	123.000	225.000
MTPS-18	YES	906793.000	123.000	230.000
MTPS-19	YES	906793.000	123.000	235.000
MTPS-20	YES	906793.000	123.000	240.000
MTPS-21	YES	906793.000	123.000	245.000
MTPS-22	YES	906793.000	123.000	250.000
MTPS-23	YES	906793.000	123.000	255.000
MTPS-24	YES	906793.000	123.000	260.000
MTPS-25	YES	906793.000	123.000	265.000
MTPS-26	YES	906793.000	123.000	270.000
MTPS-27	YES	906793.000	123.000	275.000
MTPS-28	YES	906793.000	123.000	280.000
MTPS-29	YES	906793.000	123.000	285.000
MTPS-30	YES	906793.000	123.000	290.000
MTPS-31	YES	906793.000	123.000	295.000
MTPS-32	YES	906793.000	123.000	300.000
MTPS-33	YES	906793.000	123.000	305.000
MTPS-34	YES	906793.000	123.000	310.000
MTPS-35	YES	906793.000	123.000	315.000
MTPS-36	YES	906793.000	123.000	320.000
MTPS-37	YES	906793.000	123.000	325.000
MTPS-38	YES	906793.000	123.000	330.000
MTPS-39	YES	906793.000	123.000	335.000
MTPS-40	YES	906793.000	123.000	340.000
MTPS-41	YES	906793.000	123.000	345.000
MTPS-42	YES	906793.000	123.000	350.000
MTPS-43	YES	906793.000	123.000	355.000
MTPS-44	YES	906793.000	123.000	360.000
MTPS-45	YES	906793.000	123.000	365.000
MTPS-46	YES	906793.000	123.000	370.000
MTPS-47	YES	906793.000	123.000	375.000
MTPS-48	YES	906793.000	123.000	380.000
MTPS-49	YES	906793.000	123.000	385.000
MTPS-50	YES	906793.000	123.000	390.000
MTPS-51	YES	906793.000	123.000	395.000
MTPS-52	YES	906793.000	123.000	400.000
MTPS-53	YES	906793.000	123.000	405.000
MTPS-54	YES	906793.000	123.000	410.000
MTPS-55	YES	906793.000	123.000	415.000
MTPS-56	YES	906793.000	123.000	420.000
MTPS-57	YES	906793.000	123.000	425.000
MTPS-58	YES	906793.000	123.000	430.000
MTPS-59	YES	906793.000	123.000	435.000
MTPS-60	YES	906793.000	123.000	440.000
MTPS-61	YES	906793.000	123.000	445.000
MTPS-62	YES	906793.000	123.000	450.000
MTPS-63	YES	906793.000	123.000	455.000
MTPS-64	YES	906793.000	123.000	460.000
MTPS-65	YES	906793.000	123.000	465.000
MTPS-66	YES	906793.000	123.000	470.000
MTPS-67	YES	906793.000	123.000	475.000
MTPS-68	YES	906793.000	123.000	480.000
MTPS-69	YES	906793.000	123.000	485.000
MTPS-70	YES	906793.000	123.000	490.000
MTPS-71	YES	906793.000	123.000	495.000
MTPS-72	YES	906793.000	123.000	500.000
MTPS-73	YES	906793.000	123.000	505.000
MTPS-74	YES	906793.000	123.000	510.000
MTPS-75	YES	906793.000	123.000	515.000
MTPS-76	YES	906793.000	123.000	520.000
MTPS-77	YES	906793.000	123.000	525.000
MTPS-78	YES	906793.000	123.000	530.000
MTPS-79	YES	906793.000	123.000	535.000
MTPS-80	YES	906793.000	123.000	540.000
MTPS-81	YES	906793.000	123.000	545.000
MTPS-82	YES	906793.000	123.000	550.000
MTPS-83	YES	906793.000	123.000	555.000
MTPS-84	YES	906793.000	123.000	560.000
MTPS-85	YES	906793.000	123.000	565.000
MTPS-86	YES	906793.000	123.000	570.000
MTPS-87	YES	906793.000	123.000	575.000
MTPS-88	YES	906793.000	123.000	580.000
MTPS-89	YES	906793.000	123.000	585.000
MTPS-90	YES	906793.000	123.000	590.000
MTPS-91	YES	906793.000	123.000	595.000
MTPS-92	YES	906793.000	123.000	600.000
MTPS-93	YES	906793.000	123.000	605.000
MTPS-94	YES	906793.000	123.000	610.000
MTPS-95	YES	906793.000	123.000	615.000
MTPS-96	YES	906793.000	123.000	620.000
MTPS-97	YES	906793.000	123.000	625.000
MTPS-98	YES	906793.000	123.000	630.000
MTPS-99	YES	906793.000	123.000	635.000
MTPS-100	YES	906793.000	123.000	640.000

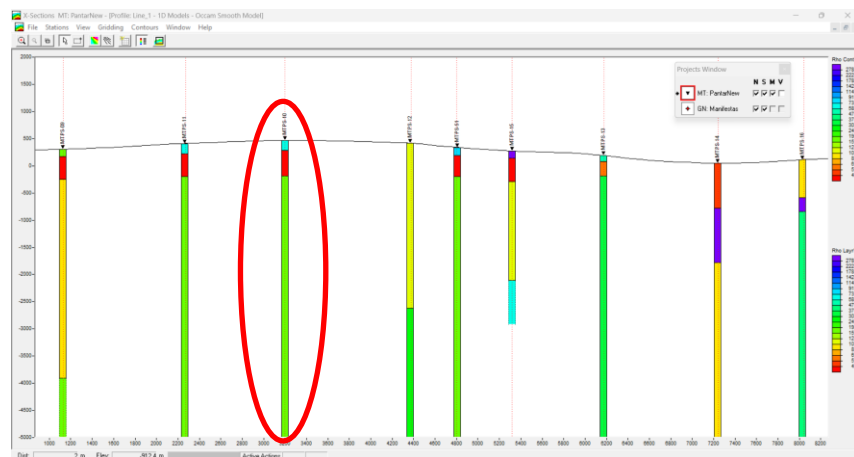
Gambar 3. 39 Proses *Input* Koordinat, dan Nilai ElevasiGambar 3. 40 Hasil *Input* Koordinat, dan Nilai Elevasi

Gambar 3.41 menunjukkan kurva *Sounding* MTPS-10 yang telah melewati proses *smoothing* di bagian kiri, dibandingkan dengan model 1D Occam, Bostick, dan model berdasarkan data lapangan di bagian kanan. Model Occam dan Bostick adalah model 1D yang menggunakan metode *Least Square* untuk menemukan solusi paling sederhana. Kurva ini memperlihatkan hubungan kedalaman terhadap nilai resistivitas. Terlihat bahwa ketiga kurva model tersebut saling berpotongan, menandakan bahwa model yang dihasilkan tidak akan jauh berbeda dengan model acuan, dengan nilai *error* sebesar 0,043. Nilai simpangan yang kecil ini menunjukkan bahwa model yang dihasilkan mendekati kondisi sesungguhnya terhadap model acuan.



Gambar 3. 41 Kurva Sounding Software WinGlink Terhadap Model 1D Titik Pengukuran MTPS-10

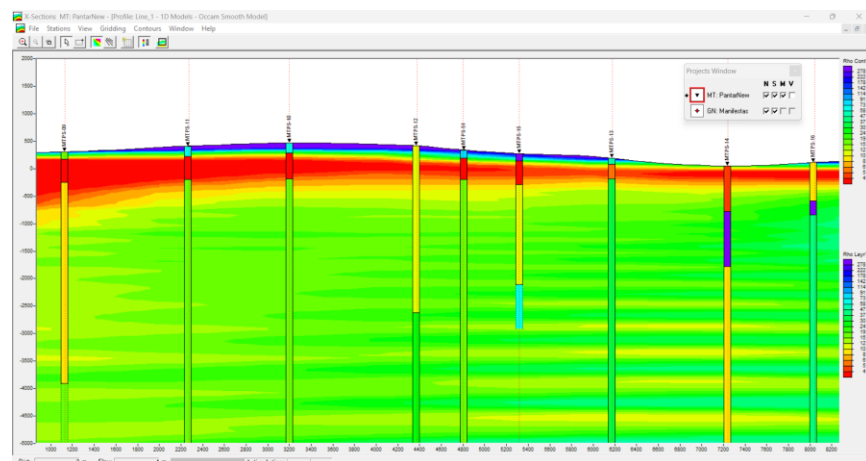
Untuk inversi satu dimensi, data *Sounding* yang sudah diperhalus digunakan untuk menampilkan penampang semu 1D, yang dapat diakses melalui menu *X-Section*. Gambar 3.42 menampilkan inversi model penampang 1D untuk daerah penelitian pada titik pengukuran MTPS-09, MTPS-11, MTPS-10, MTPS-12, MTPS-15, MTPS-13, MTPS-14, dan MTPS-16.



Gambar 3. 42 Model Penampang Inversi 1D

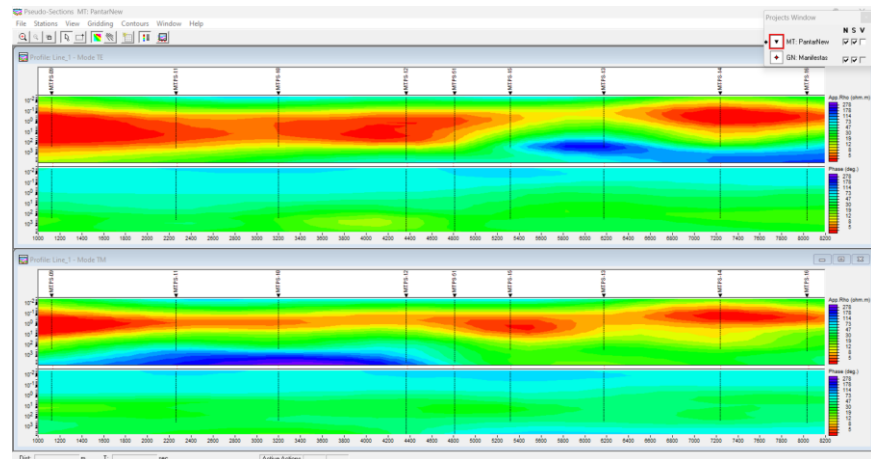
Sebagai contoh, model penampang satu dimensi MTPS-10 (lingkaran merah) menghasilkan tiga lapisan berbeda dengan nilai resistivitas yang juga berbeda, sesuai dengan kurva *Sounding* MTPAS-10 pada Gambar 3.41 yang menunjukkan variasi lapisan dan resistivitas.

Inversi satu dimensi juga bertujuan untuk menyusun semua hasil inversi resistivitas 1D dari setiap titik *sounding* (titik ukur) yang akan digabungkan dan diinterpolasi membentuk satu bidang penampang melintang berdasarkan lintasan pengukuran seperti Gambar 3.43.



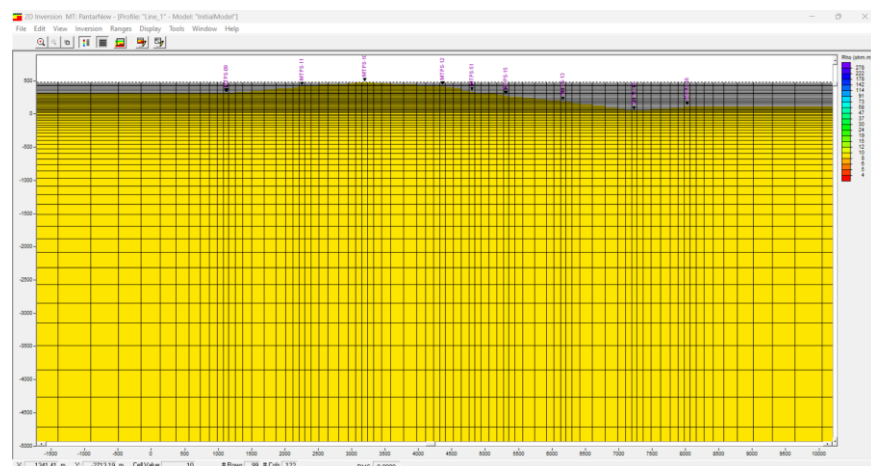
Gambar 3. 43 Model Penampang Inversi Satu Dimensi dengan Interpolasi Setiap Titik Pengukuran

Setelah proses penghalusan kurva *Sounding* selesai dan melakukan pemodelan inversi satu dimensi. Terlebih dahulu dilakukan pemodelan *pseudo-section* untuk setiap lintasan Magnetotellurik. Sebagai contoh, *pseudo-section* untuk lintasan 1 ditampilkan pada Gambar 3.44. Gambar terdiri dari dua bagian, bagian atas menunjukkan pemodelan untuk mode TE dan bagian bawah menunjukkan pemodelan untuk mode TM. Masing-masing mode menunjukkan 2 model yang terdiri dari penampang resistivitas dan phase. Pemodelan *pseudo-section* menampilkan plot distribusi titik sounding pada satu lintasan, di mana sumbu horizontal merepresentasikan posisi titik sounding dan sumbu vertikal merepresentasikan periode. Tahap ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai distribusi resistivitas bawah permukaan berdasarkan variasi periode.

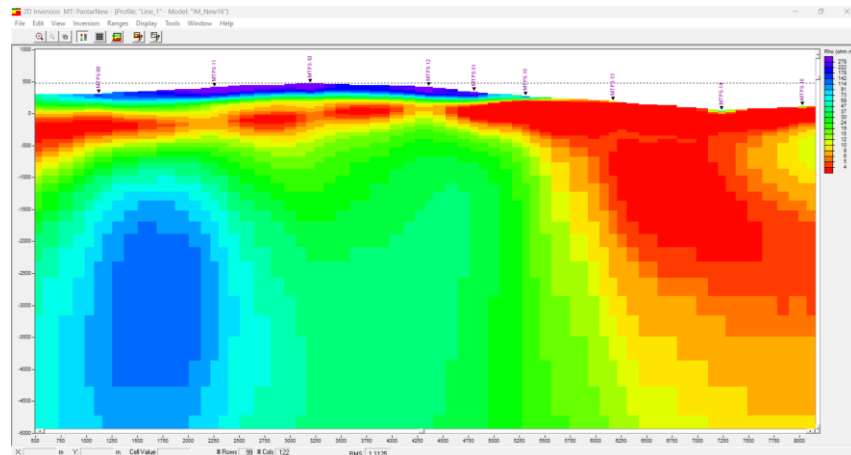


Gambar 3. 44 Plotting Distribusi Titik Sounding

langkah terakhir adalah melakukan inversi dua dimensi. Sebelum menjalankan proses inversi, beberapa pengaturan tampilan harus dilakukan, seperti membuat model awal inversi menggunakan sistem *meshgrid* (Gambar 3.45), mengatur skala warna, menentukan batas atas-bawah dan kanan-kiri, serta memasukkan jumlah iterasi sebanyak 30 kali. Pada tahap ini, data Magnetotellurik dilakukan pengeditan *static shift*. Hal ini memastikan data yang digunakan merupakan penggabungan dari mode TE dan TM supaya proses inversi berjalan optimal. Setelah semua parameter diatur, proses inversi siap untuk dijalankan. Hasil permodelan inversi dua dimensi, berupa penampang resistivitas dua dimensi seperti pada Gambar 3.46.



Gambar 3. 45 Model Awal Lintasan 1 dengan Sistem *Meshgrid*



Gambar 3. 46 Penampang Resistivitas 2-D Hasil Inversi Data Magnetotellurik Pada Lintasan 1

3.5.2.6 Interpretasi Penampang Resistivitas 2-D

Komponen sistem panas bumi terdiri dari sumber panas (*heatsource*), *reservoir*, dan lapisan penudung (*caprock*). Hasil akhir pengolahan data ini adalah penampang resistivitas dua dimensi (2D) yang menampilkan informasi resistivitas terhadap kedalaman. Sebaran resistivitas ini direpresentasikan oleh kode warna: merah menunjukkan resistivitas terendah, biru resistivitas tertinggi, dan hijau resistivitas sedang.

Berdasarkan nilai resistivitas tersebut, zona lapisan di daerah penelitian dapat diidentifikasi dengan mencocokkannya pada tabel nilai resistivitas batuan. Setelah mengetahui nilai tahanan jenis masing – masing komponen, dapat dijadikan indikasi nilai tersebut sebagai komponen sistem panas bumi. Identifikasi tahanan jenis ini kemudian akan dikorelasikan dengan informasi geologi yang sudah ada mengenai daerah penelitian.