

**ANALISIS ZONA PERMEABEL DI WILAYAH PANAS BUMI PACITAN  
BERDASARKAN DATA PENGINDRAAN JAUH MENGGUNAKAN  
METODE FFD (*FAULT FRACTURE DENSITY*)  
(Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Ka-  
bupaten Pacitan, Jawa Timur)**

**SKRIPSI**

**Oleh:**

**NUR HASANAH  
NIM. 19640057**



**PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2025**

**ANALISIS ZONA PERMEABEL DI WILAYAH PANAS BUMI PACITAN  
BERDASARKAN DATA PENGINDRAAN JAUH MENGGUNAKAN ME-  
TODE FFD (*FAULT FRACTURE DENSITY*)  
(Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Ka-  
bupaten Pacitan, Jawa Timur)**

**SKRIPSI**

**Diajukan kepada :  
Fakultas Sains dan Teknologi  
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang  
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

**Oleh:**

**NUR HASANAH  
NIM. 19640057**

**PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM  
MALANG  
2025**

## HALAMAN PERSETUJUAN

ANALISIS ZONA PERMEABEL DI WILAYAH PANAS BUMI PACITAN  
BERDASARKAN DATA PENGINDRAAN JAUH MENGGUNAKAN ME-  
TODE FFD (*FAULT FRACTURE DENSITY*)  
(Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Kabupa-  
ten Pacitan, Jawa Timur)

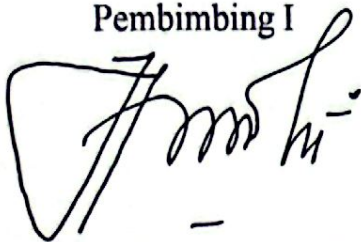
SKRIPSI

Oleh:

NUR HASANAH  
NIM. 19640057

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji  
Pada tanggal, 21 November 2025

Pembimbing I



Ahmad Luthfin, M.Si  
NIP. 19860504 201903 1 009

Pembimbing II



Fikriyatul Azizah Sulud, M.Si  
NIP. 19930617 202012 2 003

Mengetahui,  
Ketua Program Studi



Fand Samsu Hananto, M.T  
NIP. 19740513 200312 1 001

## HALAMAN PENGESAHAN

### ANALISIS ZONA PERMEABEL DI WILAYAH PANAS BUMI PACITAN BER-DASARKAN DATA PENGINDRAAN JAUH MENGGUNAKAN METODE FFD (*FAULT FRACTURE DENSITY*)

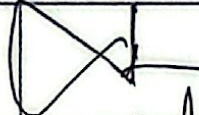
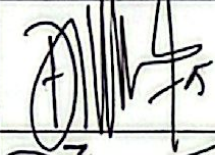
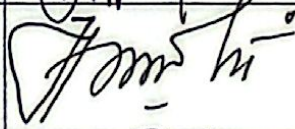

(Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur)

## SKRIPSI

Oleh:

NUR HASANAH  
NIM. 19640057


Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan  
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan Untuk  
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)  
Pada tanggal: 3 Desember 2025

Penguji Utama	<u>Drs. Abdul Basid, M.Si</u> NIP. 19650504 199003 1 003	
Ketua Penguji	<u>Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si</u> NIP. 19930617 202012 2 003	
Sekretaris Penguji	<u>Ahmad Luthfin, M.Si</u> NIP. 19860504 201903 1 009	
Anggota Penguji	<u>Muthmainnah, M.Si</u> NIP. 19860325 201903 2 009	



Mengesahkan,

Ketua Program Studi

  
Fandi Samsu Hananto, M.T  
NIP. 19740513 200312 1 001



## PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Nur Hasanah

NIM : 19640057

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Judul Penelitian : Analisis Zona Permeabel Di Wilayah Panas Bumi  
Pacitan Berdasarkan Data Pengindraan Jauh  
Menggunakan Metode Ffd (Fault Fracture Density)  
(Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo,  
Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur penjiplakan karya penelitian yang dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan sumbernya dalam daftar Pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 3 Desember 2025  
Yang Membuat Pernyataan,



NUR HASANAH  
NIM. 19640057

## **MOTTO**

“Tantangan membuat hidup menarik; mengatasinya membuat hidup bermakna”

-Joshua J. Marine

## **HALAMAN PERSEMBAHAN**

Dengan rasa syukur yang mendalam dan mengucapkan Alhamdulillah. Dengan telah diselesaikannya skripsi ini, penulis persembahkan untuk:

- Kedua orang tua saya, bapak Tuki dan ibu Kasimah untuk pengorbanan dan kasih sayang, serta doa tulus sepanjang waktu. Sehingga saya dapat terus berjuang melewati segala rintangan yang dihadapi.
- Adik-adik saya tersayang, Choirul Imam dan Nurul Nafiah yang memberikan dukungan dan topangan selama ini.
- Saya sendiri, Nur Hasanah yang sudah berjuang sampai pada titik ini.
- Para dosen dan pembimbing yang telah membantu dan membimbing serta dan semoga ilmu yang didapat bisa bermanfaat dengan baik.
- Almamaterku tercinta serta tanah air tercinta

Terima kasih atas motivasi dan dukungan yang telah diberikan selama ini.

Semoga Allah SWT membalas dengan yang lebih. Aamiin Ya Rabbal Aalamiin...

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Analisis Zona Permeabel Di Wilayah Panas Bumi Pacitan Berdasarkan Data Pengindraan Jauh Menggunakan Metode Ffd (*Fault Fracture Density*), (Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur)”. Shalawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun kita dari zaman jahiliyah menuju zaman ilmiah seperti sekarang.

Penulis menyadari bahwa penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dan kekeliruan. Untuk itu, panulis mengharapkan segala kritik dan saran yang bersifat membangun. Pada kesempatan ini dengan ketulusan hati penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada:

1. Allah Subhanahu wa Ta’ala yang senantiasa memberikan kekuatan, kesabaran, dan kemudahan dalam setiap langkah yang dijalani.
2. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., selaku Rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. H. Agus Mulyono, S.Pd., M.Kes., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T., selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Ahmad Luthfin, M.Si dan Fikriyatul Azizah Su’ud, M.Si selaku Dosen Pembimbing yang senantiasa memberikan ilmu pengetahuan, motivasi dan



meluangkan waktu untuk membimbing penulis selama proses penyusunan proposal skripsi dengan baik.

6. Utiya H., M.Si selaku Dosen Wali yang senantiasa memberikan pengarahan, motivasi dan ilmu pengetahuan.
7. Segenap dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika UIN Maulana Malik Ibrahim Malang yang senantiasa memberikan pengarahan dan ilmu pengetahuan.
8. Kedua orang tua yang selalu memberikan motivasi, semangat, dukungan serta do'a yang tiada hentinya di panjatkan hingga bisa membuatku selalu optimis dalam meraih cita-cita.
9. Teman-teman yang memberi dukungan, motivasi, dan juga membantu sehingga bisa menyelesaikan skripsi ini. Terima kasih kepada semua pihak yang telah mendoakan dan memotivasi kepada saya.
10. Serta seluruh pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam mendukung kelancaran penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki kekurangan, baik dalam hal isi maupun penyajiannya. Faktor tersebut berkaitan dengan keterbatasan pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki oleh penulis. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif untuk perbaikan di masa depan. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat, baik untuk penulis sendiri dalam menyelesaikan tugas akademik.

Malang, 10 November 2025

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERSETUJUAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN .....</b>	<b>v</b>
<b>MOTTO .....</b>	<b>vi</b>
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN .....</b>	<b>vii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xvi</b>
<b>مستخلص البحث.....</b>	<b>xvii</b>
 <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	 <b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan .....	5
1.4 Manfaat .....	5
1.5 Batasan Penelitian.....	6
 <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	 <b>7</b>
2.1 Panas Bumi ( <i>Geothermal</i> ) .....	7
2.1.1 Pembentukan Panas Bumi .....	7
2.1.2 Sistem Panas Bumi .....	8
2.2 Geologi Daerah Penelitian.....	16
2.2.1 Geografis Wilayah .....	16
2.2.2 Morfologi Daerah Penelitian .....	18
2.3 DEMNAS .....	20
2.4 Kelurusan ( <i>Lineament</i> ) .....	21
2.5 Algoritma Kelurusan ( <i>Lineament Algorithm</i> ).....	23
2.6 Diagram Rose .....	24
2.7 Densitas Kelurusan .....	24
2.8 FFD (Fault Fracture Density) .....	25
 <b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	 <b>28</b>
3.1 Lokasi Penelitian .....	28
3.2 Jenis dan Sumber Data.....	28
3.3 Alat dan Bahan Penelitian .....	29
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian .....	29
3.4.1 Pengumpulan Data.....	29
3.4.2 Pengolahan Data .....	30
3.4.3 Interpretasi Data .....	32
3.5 Diagram Alir Penelitian .....	33
 <b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>	 <b>34</b>
2.2 Analisis Data Pengindraan Jauh .....	34

2.2.2 Ekstraksi DEM dan Analisis Topografi .....	34
2.2.3 Identifikasi Lineament .....	38
2.3 Analisis Kerapatan dan Orientasi Lineament .....	41
2.3.2 Peta Zonasi Fault Fracture Density (FFD) .....	43
2.3.3 Analisis Statistik Nilai FFD.....	45
2.3.4 Interpretasi Pola Spasial Kerapatan Lineament.....	45
2.3.5 Analisis Orientasi Lineament (Diagram Rose).....	47
2.4 Interpretasi Struktur Geologi Berdasarkan Orientasi Lineament .....	48
2.5 Hubungan Pola Kelurusan dengan Tektonik Regional .....	49
2.6 Analisis Zona Permeabel dan Potensi Panas Bumi .....	51
2.6.2 Penentuan Karakteristik Zona Permeabel Daerah Penelitian .....	51
2.6.3 Potensi Pengembangan Panas Bumi.....	56
2.7 Kajian Keislaman.....	57
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>59</b>
5.1. Kesimpulan.....	59
5.2. Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>60</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>63</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Panas Bumi Sistem Hidrothermal .....	10
Gambar 2. 2 Panas Bumi Sistem Vulkanik .....	10
Gambar 2. 3 Panas Bumi Sistem Vulkanik-Hidrothermal .....	11
Gambar 2. 4 Komponen Sistem Panas Bumi .....	11
Gambar 2. 5 Peta Geologi Lembar Pacitan .....	16
Gambar 2. 6 Pemodelan Jenis Batuan .....	18
Gambar 2. 7 Parameter Lineament Extraction .....	23
Gambar 3. 1 Peta Wilayah Penelitian Pacitan .....	28
Gambar 3. 2 Tampilan Peta DEM .....	29
Gambar 3. 3 Peta Lineament Extraction .....	31
Gambar 3. 4 Peta Line Density .....	31
Gambar 3. 5 Diagram Rose .....	32
Gambar 3. 6 Diagram Alir .....	33
Gambar 4. 1 Peta Kontur .....	35
Gambar 4. 2 Peta Kemiringan Lereng .....	36
Gambar 4. 3 Peta Lineament .....	41
Gambar 4. 4 Peta Line Density .....	43
Gambar 4. 5 Peta Line Density Maks .....	44
Gambar 4. 6 Diagram Rose Wilayah Penelitian .....	47
Gambar 4. 7 Topografi dan Struktur Geologi Wilayah Penelitian .....	48
Gambar 4. 8 Peta Line Density Zona Permeabilitas .....	52
Gambar 4. 9 Peta Gravity Wilayah Penelitian .....	53



## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi Van Zuidam & Cancelado (1979) .....	20
Tabel 2. 2 Klasifikasi Nilai FFD .....	26
Tabel 3. 1 Nilai default parameter PCI Geomatica 2016 (Thannoun R.G., 2013).	30
Tabel 4. 1 Tingkat Kemiringan Wilayah Penelitian .....	37
Tabel 4. 2 Input Nilai Lineament Extraction.....	40

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Data <i>Liniament Extraction</i> .....	63
---	----

## ABSTRAK

Hasanah, Nur. 2025. **Analisis Zona Permeabel Di Wilayah Panas Bumi Pacitan Berdasarkan Data Pengindraan Jauh Menggunakan Metode Ffd (*Fault Fracture Density*) Studi Kasus: Sumber Air Panas Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur**. Skripsi. Jurusan Fisika. Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Ahmad Luthfin, M.Si (II) Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si

---

**Kata Kunci :** Panas Bumi, *Fault Fracture Density* (FFD), Zona Permeabel

Penelitian ini memetakan potensi panas bumi di Karangrejo, Pacitan, yang belum dimanfaatkan optimal meskipun terdapat manifestasi air panas. Masalah utamanya adalah perlunya identifikasi struktur bawah permukaan. Tujuannya adalah menganalisis struktur patahan dan menentukan zona permeabel berdasarkan nilai *Fault Fracture Density* (FFD) tinggi guna mengidentifikasi area prospek panas bumi. Studi ini menggunakan metode pengindraan jauh berbasis data sekunder DEMNAS dan peta geologi. Kelurusan (*lineament*) diekstraksi otomatis menggunakan perangkat lunak PCI Geomatica, kemudian dianalisis densitasnya (*Line Density*) via ArcGIS dan orientasinya menggunakan diagram rose. Metode FFD diterapkan untuk memetakan kerapatan rekahan sebagai indikator utama zona permeabel batuan. Analisis menunjukkan orientasi kelurusan dominan arah Barat Laut-Tenggara dan Timur Laut-Barat Daya yang dikontrol sesar regional. Zona permeabel tinggi teridentifikasi dengan nilai FFD 0,014–0,018 m/m<sup>2</sup>. Zona ini berkorelasi kuat dengan lokasi mata air panas, mengindikasikan adanya deformasi intensif yang berfungsi sebagai jalur migrasi fluida panas bumi. Metode FFD terbukti efektif memetakan zona permeabel, di mana kerapatan rekahan tinggi menjadi jalur utama fluida panas ke permukaan.

## ABSTRACT

Hasanah, Nur. 2025. **Analysis of Permeable Zones in the Pacitan Geothermal Area Based on Remote Sensing Data Using the FFD (Fault Fracture Density) Method Case Study: Karangrejo Village Hot Spring, Arjosari District, Pacitan Regency, East Java**. Thesis. Department of Physics. Faculty of Science and Technology, Maulana Malik Ibrahim State Islamic University, Malang. Advisors: (I) Ahmad Luthfin, M.Si (II) Fikriyatul Azizah Su'ud, M.Si

---

**Keywords:** Geothermal, Fault Fracture Density (FFD), Permeable Zone

This study maps the geothermal potential in Karangrejo, Pacitan, which has not been optimally utilized despite the presence of hot springs. The main problem is the need to identify subsurface structures. The objective is to analyze fault structures and determine permeable zones based on high Fault Fracture Density (FFD) values to identify geothermal prospect areas. This study uses remote sensing methods based on secondary DEMNAS data and geological maps. Lineaments were automatically extracted using PCI Geomatica software, then analyzed for density (Line Density) via ArcGIS and orientation using a rose diagram. The FFD method was applied to map fracture density as the main indicator of rock permeability zones. The analysis showed that the dominant lineament orientation was northwest-southeast and northeast-southwest, controlled by regional faults. Highly permeable zones were identified with FFD values of 0.014–0.018 m/m<sup>2</sup>. These zones correlate strongly with the location of hot springs, indicating the presence of intensive deformation that functions as a migration pathway for geothermal fluids. The FFD method proved effective in mapping permeable zones, where high fracture density becomes the main pathway for geothermal fluids to the surface.



## مستخلص البحث

حسنة، نور. 2025. تحليل المنطقة النافذة في منطقة الطاقة الحرارية الأرضية في فجيتان بناء على بيانات الاستشعار عن بعد باستخدام طريقة كثافة الكسور التصدية (FFD) دراسة الحالة: مصادر المياه الحارة في قرية كارانغريجو، منطقة أرجوساري، محافظة فاجيتان، جاوى الشرقية. البحث الجامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا بجامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف الأول: أحمد لطفين، الماجستير؛ المشرف الثاني: فكرية العزيزة سُعود، الماجستير.

### الكلمات الرئيسية: طاقة حرارية أرضية، كثافة كسور وُدوع (FFD)، منطقة نافذة

تستعرض هذه الدراسة إمكانيات الطاقة الحرارية الأرضية في كارانغريجو، فجيتان، والتي لم تُستغل بشكل أمثل على الرغم من وجود ينابيع ساخنة. تكمن المشكلة الرئيسية في الحاجة إلى تحديد هيكل تحت السطح. وتهدف الدراسة إلى تحليل بنية الفوالق وتحديد المناطق النافذة بناء على قيمة كثافة الكسور التصدية (FFD) العالية لتحديد مناطق الجذب للطاقة الحرارية الأرضية. استخدمت هذه الدراسة طريقة الاستشعار عن بعد القائمة على البيانات الثانوية DEMNAS والخريطة الجيولوجية. يتم استخراج المروخ (lineament) تلقائيًا باستخدام برنامج PCI Geomatica، ثم يتم تحليل كثافتها (*Line Density*) عبر ArcGIS وتحديد اتجاهها باستخدام مخطط الورد. يتم تطبيق طريقة FFD لرسم كثافة الشقوق كمؤشر رئيسي للمناطق النافذة للصخور. تُظهر التحليلات أن الاتجاهات السائدة للمروخ هي من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي ومن الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي والتي تتحكم بها الفوالق الإقليمية. تم تحديد مناطق نافذة عالية بقيمة FFD تتراوح بين  $-0.014$  و  $0.018$  م/م<sup>2</sup>. و ترتبط هذه المنطقة بقوة بمواقع الينابيع الساخنة، مما يشير إلى وجود تشوهات مكثفة تعمل كمسار لهجرة السوائل الحرارية الأرضية. وقد ثبت أن طريقة FFD فعّالة في رسم خرائط المناطق النافذة، حيث تصبح الكثافة العالية للتصدعات المسار الرئيسي لسيلان السوائل الساخنة إلى السطح.

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Panas bumi telah digunakan sejak lama dalam kehidupan sehari-hari manusia. Masyarakat yang tinggal di dekat manifestasi panas bumi telah menggunakan mata air panas bumi secara alami dan naluriah. Reservoir panas bumi hanya ada di beberapa negara di seluruh dunia. Dibandingkan dengan jenis energi lain, harga energi panas bumi sangat bersaing. Dalam beberapa dekade terakhir, investasi global mulai melirik energi panas bumi karena isu lingkungan mengatakan bahwa pembangkit energi geothermal adalah jenis energi yang ramah lingkungan. Indonesia mendorong percepatan pembangunan pembangkit panas bumi dengan insentif dan kebijakan pengusahaan panas bumi, seperti halnya negara-negara lain yang memiliki cadangan energi panas bumi terbesar di dunia (Hadimuljono, 2018).

Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) menetapkan target 23% energi baru terbarukan pada tahun 2025, dengan kontribusi energi panas bumi sebesar 5.4% dari total energi negara (Kementrian ESDM, 2017). Indonesia memiliki sekitar 40% cadangan energi geothermal dunia, dengan potensi sumber daya geothermal sekitar 11.073 MWe dan cadangan 17.506 MWe. Pengembangan energi geothermal untuk pembangkit listrik dimulai di negara itu pada tahun 1978. Di Jawa Timur, terdapat 13 lokasi yang memiliki potensi panas bumi. Ini termasuk Pacitan, Tiris-Gunung Lamongan, Gunung Lawu, Arjuno-Welirang, Blawan-Ijen, Iyang-Argopuro, dan Gunung Pandan. Meskipun ada potensi yang sangat besar di beberapa lokasi tersebut, belum pernah digunakan secara

langsung untuk menghasilkan listrik (Sidik, 2022). Potensi yang ada ini terlihat melalui adanya manifestasi di permukaan bumi, salah satu manifestasi adalah sumber air panas. Pacitan memiliki manifestasi panas bumi berupa sumber mata air panas Banyu Anget Tirto Husodo yang berlokasi di Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Kabupaten Pacitan. Pemandian air panas ini diyakini terbentuk secara alami karena airnya yang murni dan berasal dari pegunungan di daerah tersebut. Sumber air panas ini dikelilingi oleh perbukitan dan pegunungan dikarenakan letaknya yang berada di lereng gunung Kelir, berjarak 15 kilometer sebelah utara kota Pacitan.

وَالْأَرْضَ مَدَدْنَاهَا وَأَلْقَيْنَا فِيهَا رَوْسِيَ وَأَنْبَتْنَا فِيهَا مِنْ كُلِّ شَيْءٍ مَّوْزُونٍ

*Artinya: "Dan Kami telah menghamparkan bumi dan menjadikan padanya gunung-gunung dan Kami tumbuhkan padanya segala sesuatu menurut ukuran. (Q.S. al-Hijr 20:19)*

Dari ayat diatas dapat diketahui bahwa Allah SWT telah menghamparkan dan meluaskan bumi, serta diciptakan di dalamnya gunung-gunung yang kokoh disertai tumbuhan berbagai jenis dengan teratur dan detail. Didalamnya termasuk segala yang dibutuhkan untuk hidup manusia sebagai rezeki dan telah diturunkan sesuai dengan kebutuhan dan kemaslahatan yang telah terukur. Maka manusia seharusnya mampu memanfaatkan yang telah disediakan oleh alam, diantaranya seperti *geo-thermal*, minyak, gas bumi sebagai sumber energi.

Indikasi adanya sistem panas bumi di bawah permukaan ditunjukkan dengan adanya manifestasi diatas permukaan tanah, diantaranya dengan adanya keberadaan mata air panas, geyser, fumarole dan mud lumpur. Manifestasi ini penting untuk mengidentifikasi sumber daya panas bumi yang potensial dan dapat dimanfaatkan untuk tujuan geowisata. Sistem panas bumi dicirikan oleh adanya sumber panas, batuan reservoir yang mengandung air panas atau uap, dan batuan penutup

yang mencegah keluarnya cairan yang dipanaskan. Panas yang berasal dari reservoir akan ditransfer ke permukaan melalui rekahan dan patahan di kerak bumi. Jika diketahui pada suatu titik terdapat geothermal, maka tidak menutupi kemungkinan untuk daerah di sekitarnya juga ada potensi geothermal. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, diketahui bahwa area *geothermal*, khususnya di wilayah arjosari memiliki struktur batuan batu pasir dan breksi vulkanik dari Formasi Mandalika, serta batuan vulkanik dari Formasi Arjosari (Sumotarto, 2020). Sebaran batuan vulkanik ini memainkan peran penting dalam potensi *geothermal* dan diketahui bahwa umur batuan vulkanik di daerah tersebut antara 8.94-42.7 juta tahun (Kausar, 2018).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Fault Fracture Density dikarenakan kegunaan dari metode ini dapat mengidentifikasi struktur patahan atau sesar dalam suatu wilayah. Struktur patahan ini dapat menjadi jalur aliran panas bumi dan mempengaruhi zona permeabel di wilayah tersebut. Analisa zona permeabel di area panas bumi penting untuk mengidentifikasi potensi reservoir air panas yang dapat digunakan. Metode FFD ini akan melibatkan analisis dari densitas rekahan dan patahan dibawah permukaan. Metode ini dikombinasikan dengan penginderaan jauh yang melibatkan analisis citra satelit atau udara untuk mengidentifikasi fitur-fitur permukaan yang dapat mengindikasikan keberadaan sistem panas bumi (Arrofi, 2022). Kombinasi dari kedua metode ini akan memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai geologi bawah permukaan dan potensi sumber daya panas bumi.

Metode FFD (*Fault Fracture Density*) bergantung pada prinsip-prinsip geologi structural dan mekanika batuan. Metode ini melibatkan identifikasi dan pemetaan kepadatan patahan dan rekahan di bawah permukaan. Nilai FFD yang tinggi



menunjukkan jumlah patahan dan rekahan yang tinggi, yang dapat mengarah pada identifikasi zona yang sangat permeabel di dalam reservoir panas bumi.

Metode FFD (*Fault Fracture Density*) menggunakan berbagai jenis data untuk menilai kepadatan patahan dan rekahan di suatu area tertentu. Salah satu data yang digunakan adalah citra satellite dan data penginderaan jauh (Ramadhan, 2015). Metode ini digunakan bersama dengan analisis lineament dan penginderaan jarak jauh untuk menghasilkan peta densitas rekahan yang akurat. Pengecekan lapangan dengan melibatkan pengukuran dan pengamatan akan dapat membantu memvalidasi hasil FFD dan memberikan wawasan tambahan tentang distribusi rekahan. Bidang sesar yang permeabel menjadi target dalam eksplorasi panas bumi. Fluida panas yang mengalir terutama melalui zona rekahan dan sesar berinteraksi dengan batuan sekitar dan memperlihatkan pola kelurusan. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah peta elevasi digital untuk bahan analisis dan peta geologi untuk melihat korelasi interpretasi kelurusan dan persebarannya.

Telah dilakukan penelitian sebelumnya terkait Identifikasi Prospek Panas Bumi Berdasarkan FFD di Gunung Patuha, Jawa Barat (Bujung dkk, 2011). Penelitian ini menghasilkan peta persebaran prospek sumber daya panas bumi berada di daerah Cibuni, Kawah Putih, dan Kawah Ciwidey. Penelitian lain dilakukan di Konawe menggunakan metode FFD untuk menentukan zona permeabel di daerah non-vulkanik (Arrofi, 2022), dan dari penelitian tersebut didapatkan hasil lima zona yang dianggap sebagai zona permeabel di daerah penelitian dan daerah antara Meluhu dan Lembo diyakini sebagai reservoir panas bumi yang paling prospektif karena memiliki area planar permeabel terbesar.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, maka peneliti akan melakukan penelitian tentang panas bumi (*geothermal*) menggunakan metode FFD

(*Fault Fracture Density*) yang dapat menganalisis zona permeabel untuk kemungkinan adanya persebaran sumber geothermal di sekitar kawasan penelitian.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan pada latar belakang diatas, penulis merumuskan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penampakan struktur kelurusan yang didapatkan berdasarkan nilai *Fault Fracture Density* (FFD)?
2. Bagaimana pemetaan zona panas bumi berdasarkan nilai FFD yang didapatkan?

## 1.3 Tujuan

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Untuk menganalisis struktur patahan dan retakan di wilayah panas bumi Pacitan
2. Untuk mengidentifikasi zona permeabel berdasarkan nilai FFD tinggi

## 1.4 Manfaat

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini bagi beberapa pihak, yakni:

1. Manfaat akademis

Penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk melatih penerapan ilmu tentang panas bumi dan menjadi referensi bagi peneliti selanjutnya.

2. Manfaat untuk masyarakat dan pemerintah

Penelitian ini dapat memberikan informasi terkait zona permeabel di sekitar kawasan *hidrotermal* Pacitan untuk kemudian dapat dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar.

### 1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Lokasi penelitian di sekitar daerah manifestasi panas bumi (*hidrothermal*) dengan luas  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  tepatnya pada titik koordinat  $8^{\circ}6'4.68'' \text{ LS} - 8^{\circ}4'59.73'' \text{ LS}$  dan  $111^{\circ}7'18.12'' \text{ BT} - 111^{\circ}8'24.18'' \text{ BT}$
2. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode FFD (*Fault Fracture Density*)
3. Data yang digunakan adalah data sekunder berupa peta DEM dan peta geologi, yang didapat melalui website USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) dan peta geologi yang diakses melalui website (<https://geologi.esdm.go.id>).  
[D](#).
4. Software yang digunakan dalam pengolahan data adalah *software Global Mapper, ArcGIS, dan RockWorks*.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Panas Bumi (*Geothermal*)**

Panas bumi (*geothermal*) berasal dari bahasa Yunani (*Greek*) yaitu: *geo* → *ge* → bumi dan *Thermal* → *therme* → panas. Hochstein dalam *Encyclopedia Volcanous* (2000) mendeskripsikan sebagai proses transfer panas dari tempat tertentu di kerak bumi yang berasal dari sumber panas (*heat source*) ke permukaan. Energi panas bumi (*geothermal energy*) merupakan sumber energi panas yang terdapat dan terbentuk di kerak bumi.

Energi panas bumi merupakan suatu sumber energi panas yang terkandung dalam air panas, uap dari batuan serta mineral dan gas, yang kesemuanya secara genetis merupakan bagian integral dari sistem panas bumi dan untuk memanfaatkannya diperlukan suatu proses penambangan (Iswandi, 2020). Energi panas yang tersimpan dalam uap air atau air panas di bawah tanah, yang berasal dari magma di daerah gunung berapi, dikenal sebagai sumber energi panas bumi (Soeparman, 2015). Secara umum, sistem panas bumi adalah tempat di mana air yang terpanasi terkumpul, sehingga sistem ini mempunyai kebutuhan untuk air, batuan pemanas, batuan sarang, dan batuan penutup. Proses pembentukan magma dan aktivitas vulkanisme berhubungan dengan sumber daya panas bumi.

##### **2.1.1 Pembentukan Panas Bumi**

Bumi memiliki tiga lapisan: lapisan terluar (*crust*) atau kulit bumi, lapisan tengah (mantel dan selubung bumi), dan lapisan paling dalam, atau inti bumi. Karena permukaannya yang tidak rata, lapisan kulit bumi di daratan (kerak benua)

biasanya lebih tebal daripada lapisan kulit bumi di dasar samudera atau laut. Lempeng tektonik memiliki sifat yang memungkinkan mereka untuk mengalirkan panas dari inti bumi (core). Tumbukan atau tabrakan lempeng tektonik menyebabkan pembentukan energi panas bumi. Inti Bumi sangat panas. Hal ini terjadi karena berbagai jenis radioaktif yang ada di Bumi. Jika bahan radioaktif ini dipeluru, akan menghasilkan panas yang tinggi. Panas yang ditimbulkan ini akan menekan bagian bumi dengan tekanan rendah. Panas di inti bumi memungkinkan bebatuan meleleh dan memanaskan kandungan air di perut bumi. Namun, hanya air yang sampai pada batuan panas yang terpanaskan (Wijayanti, 2023).

Energi geothermal berasal dari dekomposisi radioaktif yang berlangsung dari isotop seperti thorium, kalium, dan uranium di dalam inti bumi. Panas ini kemudian mengalir melalui kerak bumi dan mantel. Cairan mengalir melalui batu-batu panas melalui jalur bawah tanah kecil. Reservoir bawah tanah memiliki cairan panas menumpuk karena ada batu-batu yang memiliki pori-pori dan permeabel yang memungkinkan cairan mengalir melaluinya. Cairan ini dapat berupa air atau uap. Di beberapa tempat, cairan panas dapat mencapai permukaan karena angin alami, seperti geyser, fumarol, atau air panas. Di tempat lain, sumur dapat mengekstrak cairan dan digunakan untuk menghasilkan listrik. Setiap air dan uap kondensasi yang tersisa disuntikkan kembali ke reservoir, membuatnya sumber daya yang berkelanjutan. Panas bumi dapat ditemukan dalam berbagai bentuk, dan hal yang menunjukkan adanya energi panas bumi di bawah permukaan bumi adalah adanya manifestasi.

### **2.1.2 Sistem Panas Bumi**

Energi panas alami yang dihasilkan oleh fluida di dalam Bumi disebut sistem panas bumi, atau geothermal. Energi panas bumi berasal dari suhu dan energi panas

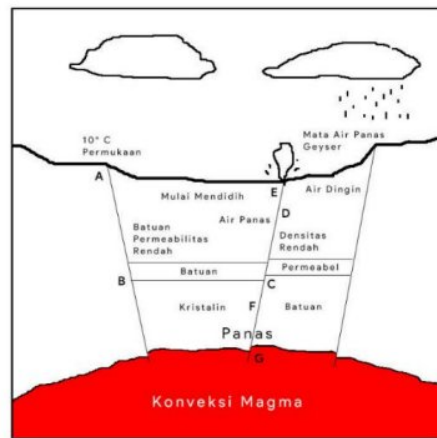
yang didistribusikan di bawah permukaan bumi dan disalurkan ke permukaan melalui konveksi dan konduksi. Beberapa komponen penting sistem panas bumi termasuk sumber panas yang cukup besar, reservoir yang mengakumulasi panas, dan penghalang atau lapisan tudung (cap rock). Memperkirakan sumber daya panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan data geologi dan geofisika seperti kedalaman, ketebalan, penyebaran, properti formasi batuan, salinitas, geokimia fluida reservoir, temperatur, porositas, dan permeabilitas formasi batuan.

Hampir di seluruh dunia, sistem panas bumi ditemukan dalam berbagai kondisi geologi. Daerah dengan aliran panas yang tinggi biasanya berbatasan dengan zona vulkanisme dan pembentukan pegunungan di zona tumbukan lempeng. Sistem panas bumi telah diklasifikasikan menjadi banyak jenis berdasarkan kontrol geologis daerah tersebut. Sistem panas bumi sebagian besar dikontrol oleh sumber panas, batuan reservoir, lapisan penutup, struktur geologi, dan daerah resapan air.

Ada tiga jenis kategori sistem panas bumi merujuk pada (Hochstein and Browne, 2000) yaitu:

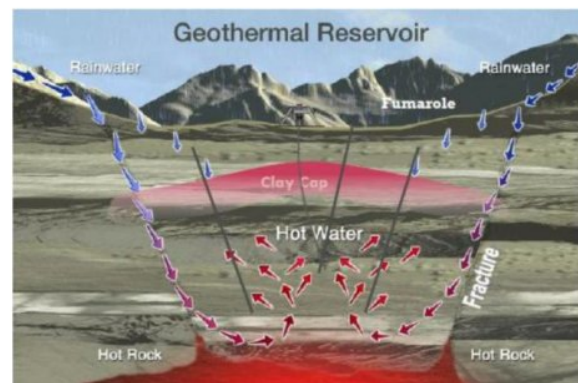
1. Sistem Hidrothermal, merupakan proses konveksi di mana panas ditransfer dari sumber panas ke permukaan dan melibatkan fluida meteoric, dengan atau tanpa jejak fluida magmatic dan di daerah rembesan berfasa cair. Air meteorik atau air hujan yang jatuh ke permukaan bumi dapat masuk ke lapisan permeabel kulit bumi dan tersirkulasi pada kedalaman sekitar lima hingga tujuh kilometer. Fluida panas bumi yang biasanya berasal dari air meteorik ini kemudian terkena panas magma atau batuan panas dan menjadi air panas atau uap panas. Ketika air panas atau uap panas naik ke permukaan melalui celah batuan, proses ini disebut hidrotermal. Proses alterasi hidrotermal, di mana fluida hidrotermal berinteraksi

dengan batuan di sekitarnya, dapat menyebabkan perubahan komposisi mineral batuan ketika air panas ini bergerak melalui batuan.



Gambar 2. 1 Panas Bumi Sistem Hidrothermal

2. Sistem Vulkanik, merupakan proses di mana panas mengalir dari dapur magma ke permukaan, yang melibatkan konveksi fluida magma, dan fluida meteoric jarang ditemukan di sistem ini.



Gambar 2. 2 Panas Bumi Sistem Vulkanik

3. Sistem Vulkanik-Hidrothermal, merupakan gabungan dari dua sistem yang telah disebutkan di atas; air magmatic muncul pertama dan kemudian dicampur dengan air meteoric (Isa, 2018).







volcanogenic (berasal dari magma) dan non-volcanogenic (berasal dari aktivitas tektonik). Panas yang berasal dari pengangkatan batuan panas di basement, atau air yang dipanaskan oleh sirkulasi batuan yang sangat dalam yang berasal dari pelipatan yang permeabel atau berupa patahan atau rekahan.

Lapangan panas bumi dengan dominasi uap ditemukan di wilayah vulkanisme, beberapa di antaranya dekat dengan gunung berapi, dan menunjukkan bahwa magma adalah sumber panas utama. Intrusi magma ke dalam bumi yang masih muda dan memiliki suhu tinggi (500-1000°C) memungkinkan panas yang diperlukan terakumulasi secara ekonomis (Gupta & Roy, 2007).

## 2. Reservoir

Reservoir merupakan tempat penampungan energi panas bumi yang dihasilkan dari sumber panas. Air panas atau uap panas disimpan di reservoir ini, dan kemudian dialirkan ke permukaan untuk menghasilkan listrik. Kebanyakan reservoir panas bumi (*geothermal*) berada jauh dibawah tanah tanpa petunjuk yang terlihat di permukaan. Menurut Nicholson (1993), suhu atau entalpi reservoir panas bumi merupakan faktor yang paling signifikan dalam menentukan kimia fluida dan pemanfaatan sumber daya.

Dalam sistem panas bumi, reservoir terdiri dari batuan induk yang bereaksi langsung dengan fluida panas bumi. Oleh karena itu, untuk menggunakan geothermometer dan memprediksi masalah pengendapan (scaling) saat pengembangan lapangan, kita harus tahu tentang batuan induk. Fluida panas bumi terbuat dari batuan sedimen vulkanik, batuan sedimen

klastik, dan batuan sedimen karbonat, serta batuan yang serupa dengan lithologi ini, yang mengandung berbagai kimia. Lithologi dapat diketahui melalui sifat kimiawi air yang terkandung jika geologi kurang diketahui (Nicholson, 1993).

### 3. Batuan Penutup (*Caprock*)

Batuan penutup memiliki fungsi sebagai penahan tekanan dan suhu di reservoir. Batuan penutup biasanya terdiri dari lapisan batuan yang kedap atau memiliki permeabilitas rendah yang terdiri dari mineral lempung sekunder yang diubah oleh interaksi fluida dengan batuan yang dilewatinya. Batuan penutup impermeabel tanpa celah ideal seharusnya jarang ditemukan di lingkungan vulkanik di mana pergerakan tektonik menyebabkan celah. Namun, proses geokimia yang menyebabkan deposisi mineral dan perubahan hidrotermal membantu menutup celah yang terbentuk. Kalsit dan silika adalah contoh proses yang membantu menyegel celah tersebut (Kasbani, 2009).

### 4. Daerah Resapan (*Recharge Area*)

*Recharge area* merupakan tempat di mana air meteorik atau air hujan masuk ke dalam tanah dan mengalir ke reservoir. Resapan yang dihasilkan melalui permukaan tanah kemudian akan diteruskan ke permukaan bumi. Untuk kebutuhan pemanfaatan reservoir panas bumi sendiri, area resapan memiliki fungsi yang sangat penting; area ini dapat dianggap sebagai kawah dari panas bumi yang dihasilkan oleh area tersebut.

### 5. Daerah Luahan (*Discharge Area*)

*Discharge area* merupakan tempat di mana air panas atau uap panas naik ke permukaan melalui celah batuan dan menciptakan manifestasi seperti

kolam lumpur panas atau mata air panas. Dengan kata lain, air tanah di daerah luahan akan bergerak menuju permukaan bumi. Manifestasi di permukaan menunjukkan daerah luahan di sistem panas bumi. Tanda yang terlihat di permukaan bumi yang menunjukkan adanya sistem panas bumi di bawah permukaan di sekitarnya disebut manifestasi permukaan. Manifestasi permukaan dapat keluar secara langsung, seperti mata air panas dan fumarola. Fumarola adalah uap panas (vapor) yang mengalir dengan kecepatan tinggi melalui celah batuan dan akhirnya berubah menjadi uap air (steam). Tingginya kecepatan fumarola sering menyebabkan suara.

#### 6. Struktur Geologi

Struktur geologi disini meliputi patahan, rekahan, dan ketidakselarasan. Struktur geologi adalah kondisi geologi yang terbentuk di suatu tempat karena perubahan batuan yang disebabkan oleh proses tektonik atau proses lainnya. Baik kerak bumi maupun batuan beku, sedimen, dan batuan metamorf akan mengalami perubahan susunan karena proses tektonik. Patahan, atau sesar, adalah bidang rekahan atau zona rekahan pada lapisan batuan bumi yang mengalami pergeseran yang menyebabkan satu blok batuan bergerak relatif terhadap yang lain, apakah itu relatif turun, relatif naik, atau relatif mendatar. Unconformity, juga dikenal sebagai ketidakselarasan, adalah suatu permukaan erosi atau nondeposisi yang memisahkan lapisan batuan yang lebih muda dari lapisan batuan yang lebih tua. Struktur geologi memainkan peranan penting dalam manifestasi panas bumi. Pengaruh struktur geologi ini dapat mempengaruhi

sebaran panas bumi, kemunculan mata air panas, dan karakteristik sistem panas bumi di suatu daerah.

a) Patahan

Tenaga tektonik menyebabkan terjadinya patahan (sesar) pada kulit bumi. Proses patahan ini cepat, sehingga kulit bumi tidak sempat terlipat. Berdasarkan arah dan kekuatan tenaga tekanan, patahan dapat dibedakan menjadi: tenaga tektonik dengan arah horizontal dan saling menjauh, maka bongkah batuan terjadi rekahan-rekahan dan patah membentuk bagian yang merosot (*graben* dan *slenk*) dan bagian yang menonjol (*horst*); tenaga tektonik yang berarah vertical; dan dua tenaga tektonik secara horizontal dengan arah berlawanan, sehingga menimbulkan pergeseran batuan, yang disebut sesar mendatar. Alur patahan adalah alur pecahnya batuan pada proses patahan dan bisa dalam dan panjang atau dangkal (Resyi, 2021). Patahan merupakan rekahan yang terjadi pada formasi geologi.

b) Retakan

Gaya endogen yang menyebabkan adanya tegangan pada kerak bumi menimbulkan gejala tektonik. Tektonisme sendiri adalah tenaga yang berasal dari kuli bumi yang menyebabkan perubahan lapisan permukaan bumi, baik mendatar maupun vertical. Gerakan dari tenaga tektonik menyebabkan Gerakan naik dan turun lapisan kulit bumi. Salah satu gerakanya disebut gerak orogenetic yang dapat menimbulkan lipatan dan patahan serta retakan yang disebabkan karena gerakan dalam bumi yang besar dan meliputi daerah yang sempit serta berlangsung dalam waktu yang singkat (Zuhdi, 2019). Retakan mengacu pada gambaran umum



gunung api, lava dan tuf. Sebaran batuan vulkanik ini memainkan peran penting dalam potensi *geothermal* dan diketahui bahwa umur batuan vulkanik di daerah tersebut antara 8.94-42.7 juta tahun.

Hal yang tertera dalam peta geologi lembar Pacitan tersebut didukung oleh penelitian interpretasi bawah permukaan pada Desa Karangrejo, Kecamatan Arjosari, Pacitan (2016). Daerah panas bumi Karangrejo muncul pada batuan gunung api tersier melalui retakan-retakan lava tersier akibat dari peresapan fluida hidrotermal yang bersifat asam sulfat pada zona kekar (fracturing zone) batuan gunung api tersier. Selain itu, sistem panas bumi Karangrejo juga dikontrol oleh sesar di sekitar daerah tersebut yang menjadi permeabilitas sekunder, sedangkan yang menjadi permeabilitas utama dari kemunculan manifestasi panas bumi Karangrejo adalah batuan breksi dan lava (Lestari, 2016).

Batuan breksi terbentuk dari pelapukan batuan beku dan termasuk dalam jenis batuan sedimen kalsik yang menyerupai konglomerat. Batuan ini terdiri dari fragmen mineral rusak atau batuan yang disemen secara bersama-sama oleh matriks berbutir halus. Komposisi fragmen dapat sama atau berbeda. Frekuensi batuan breksi, yang memiliki bentuk menyudut dan berdiameter lebih dari dua milimeter, dipengaruhi oleh fragmen mineral dari mana batuan itu berasal, serta iklim tempat fragmen tersebut mengendapkan (Wahyudi, 2022). Batu breksi dapat terdiri dari potongan batuan dari berbagai jenis batuan, seperti kuarsa, gamping, granit, rijang, dan sebagainya. Batuan breksi dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, seperti basalt breksi, granit breksi, dan breksi rijang, berdasarkan mineral penyusunnya.





Gambar 2. 6 Pemodelan Jenis Batuan

Pemodelan tersebut tidak menunjukkan batuan dasar (batuan tersier), tetapi menunjukkan batuan gunung api, yang dikenal sebagai cap rock. Ini menunjukkan bahwa sistem batuan penyusun reservoir panas bumi memiliki porositas dan permeabilitas yang tinggi, sedangkan lava andesit tidak dapat mengalir.

Beberapa faktor dapat menyebabkan pembentukan batuan breksi, seperti kekuatan aliran sungai, proses tektonik, dan pembekuan magma di bawah kerak bumi. Batuan breksi dan konglomerat mirip, tetapi perbedaan utamanya adalah bentuk fragmennya: fragmen breksi berbentuk sudut, sedangkan fragmen konglomerat berbentuk bulat.

### 2.2.2 Morfologi Daerah Penelitian

Morfologi merupakan kajian mengenai bentuk dan struktur fisik permukaan bumi yang mencakup bentang alam, pola penggunaan lahan, jaringan jalan, serta pola pemukiman yang terbentuk akibat interaksi antara faktor alam dan aktivitas manusia. Daerah ini memiliki topografi berbukit dengan kemiringan lahan yang bervariasi dan didominasi oleh lereng-lereng perbukitan yang berundak-undak, sehingga pola permukiman dan penggunaan lahan sangat dipengaruhi oleh kontur tanah. Dan morfologi daerah ini mencerminkan karakteristik daerah pegunungan

dengan pola penyebaran pemukiman yang tersebar mengikuti lereng dan dataran kecil serta terpusat pada dataran yang relative datar atau di Lembah-lembah kecil. Lalu untuk pola jaringan jalan terdiri dari jalan utama yang menghubungkan desa dengan pusat kecamatan dan jalan-jalan kecil yang mengikuti kontur lereng, membentuk jalur melingkar atau zig-zag.

Sistem yang banyak digunakan dalam pemetaan geomorfologi adalah klasifikasi morfologi menurut Van Zuidam (1985) dan Verstappen (1983) untuk mengidentifikasi bentuk lahan berdasarkan aspek morfometri (ukuran dan bentuk), morfografi (karakteristik permukaan), dan morfogenesis (proses pembentukan). Menurut Van Zuidam (1985), satuan morfologi dapat dibedakan menjadi dataran, perbukitan, pegunungan dengan subdivisi berdasarkan elevasi dan bentuk lereng (Ike, 2006).

Penambahan klasifikasi oleh Verstappen (1983) mengenai bentuk lahan asal antropogenik yang merupakan modifikasi bentuk lahan asli akibat aktivitas manusia seperti pertambangan atau perubahan penggunaan lahan (Nasruddin, 2020). Dalam konteks desa Karangrejo, bentang alam didominasi oleh satuan perbukitan denudasional dan dataran rendah yang terbentuk oleh proses eksogen seperti erosi dan pelapukan serta proses endogen seperti tektonik yang membentuk struktur perbukitan tidak beraturan.

Kemiringan lereng merupakan parameter penting dalam analisis morfometri yang mempengaruhi penggunaan lahan dan risiko geohazard. Di desa Karangrejo didominasi oleh kemiringan lereng pada kelas landai hingga agak curam (8-20%) berdasarkan pada klasifikasi kemiringan lereng Van Zuidam & Cancelado (1979) :



Tabel 2. 1 Klasifikasi Van Zuidam &amp; Cancelado (1979)

Kelas Lereng	Presentase Kemiringan (%)	Deskripsi Umum
Datar	0-2	Datar
Sangat landai	2-5	Hampir datar
Landai	5-15	Landai
Agak Curam	15-30	Agak Curam
Curam	30-50	Curam
Sangat Curam	>50	Sangat Curam

Analisis morfologi dengan klasifikasi Van Zuidam dan Verstappen serta kemiringan lereng Van Zuidam & Cancelado memberikan gambaran bahwa desa Karangrejo memiliki morfologi perbukitan dengan kemiringan variatif yang mempengaruhi pola penggunaan lahan, pola pemukiman, dan jaringan jalan. Pola aliran sungai yang terbentuk juga dipengaruhi oleh struktur geologi dan kemiringan lereng, yang berdampak pada pengelolaan sumber daya air dan mitigasi risiko erosi.

### 2.3 DEMNAS

DEMNAS (Digital Elevation Model dan Batimetri Nasional) adalah model elevasi digital yang menyediakan data ketinggian permukaan bumi dan kedalaman laut di seluruh wilayah Indonesia. DEMNAS dibangun dari data mass point, TerraSAR-X, IFSAR, ALOS PALSAR, dan lainnya.. DEMNAS memiliki resolusi spasial yang lebih tinggi dari data DEM internasional, yaitu 0.27 arc-second atau sekitar 8 meter, lebih tepatnya DEMNAS memiliki resolusi 8.33 meter. Resolusi ini lebih tinggi dari resolusi SRTM DEM, ASTER GDEM, atau ALOS PALSAR yang memiliki resolusi 1 detik busur (~ 30 meter). Data DEMNAS dapat diunduh di situs web Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan membuka grid DEMNAS (Manyoe, 2022).

## 2.4 Kelurusan (*Lineament*)

Kelurusan adalah garis yang signifikan di permukaan bumi yang menyingkap arsitektur tersembunyi dari batuan dasar basement (H. W. H, 1903). Kelurusan didefinisikan sebagai fitur linier sederhana atau majemuk pada permukaan bumi yang terpetakan pada skala lebih dari 1:25.000 dan memiliki pola linier yang berbeda dengan pola di daerah sekitarnya sehingga dianggap mencerminkan fitur tersebut. Kelurusan geologi atau juga dikenal sebagai *liniaments* adalah representasi morfologi yang teramati di permukaan bumi sebagai akibat dari aktivitas gaya geologi di dalamnya. Di sini, kelurusan geologi ditentukan oleh struktur alami, yang ditunjukkan oleh karakteristik geomorfologi seperti punggung, lembah, dan kelurusan sungai, serta kelurusan yang disebabkan oleh sesar, baik sesar normal, naik, maupun mendatar.

Kelurusan geologi dapat didefinisikan sebagai komponen struktur geologi yang belum mengalami pergerakan (*displacement*), sedangkan komponen struktur geologi yang telah mengalami pergerakan disebut sesar (Farhan, 2017). Kelurusan yang dianggap penting ialah kelurusan yang menggambarkan puncak punggung bukit atau pegunungan, batas daerah yang tinggi dengan batas daerah yang rendah, drainase, sungai, garis pesisir, dan batas satuan atau formasi batuan. Sejak awal abad ke-19, para ahli geologi mulai mempelajari hubungan antara rekahan (*fracture*) dan bentukan lahan, terutama yang dikontrol oleh sistem rekahan. Oleh karena itu, erosi batuan dan bentukan alam mencerminkan proses struktur geologi yang terjadi di suatu wilayah (Tiren, 2010).

Interpretasi kelurusan dapat dibuat secara visual dengan memperhatikan beberapa aspek, yaitu:

- a. Perubahan ketinggian secara tiba-tiba
- b. Perubahan pada pola
- c. Perubahan gradien kecuraman
- d. Perpindahan daripada bidang referensi/datum

Garis kelurusan yang dideleniasi harus lurus, tidak boleh berkelok-kelok, dan antar garis yang dibuat tidak boleh bertabrakan. Kelurusan yang deleniasi yaitu kelurusan tektonik ataupun vulkanik, bukan yang dibentuk akibat erosional.

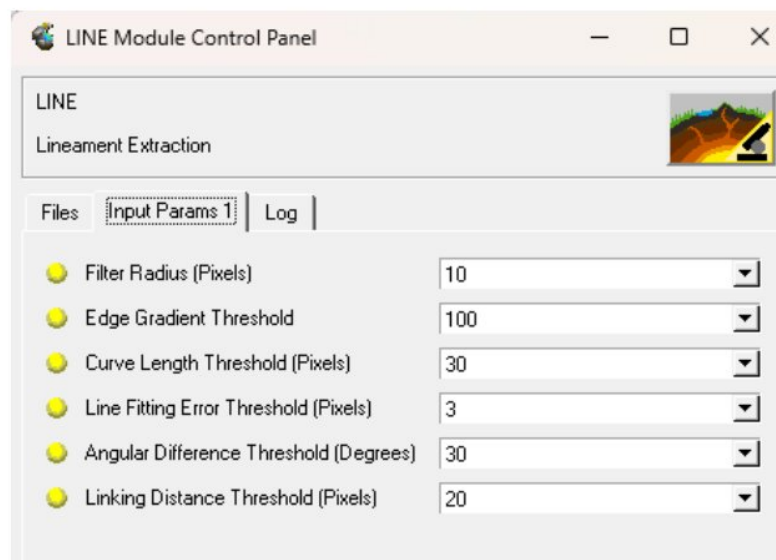
Umumnya hasil analisis kelurusan ditampilkan dalam bentuk liniament statistics yang terdiri dari liniament density maps dan rosette diagram.

Lineasi adalah istilah geologi yang mengacu pada struktur linier pada batuan, seperti garis aliran, lurik, atau susunan paralel material sedimen pada batuan sedimen atau sumbu lipatan. Linenasi sering disalahartikan dengan kelurusan, namun terdapat perbedaan yang signifikan di antara keduanya. Kelurusan lebih spesifik diartikan sebagai pola susunan morfologi yang mudah diamati pada peta tiga dimensi dan juga dikaitkan dengan pengendalian struktur geologi yang terdapat pada suatu daerah. Struktur linier erat kaitannya dengan pembentukan struktur geologi seperti patahan dan lipatan.

Secara sederhana, liniament dan liniasi adalah istilah yang digunakan dalam analisis struktur geologi. Liniament merupakan garis linier yang terbentuk oleh retakan atau patahan pada batuan, sedangkan liniasi adalah pola atau kelompok dari liniament yang memiliki arah atau orientasi yang sama.

## 2.5 Algoritma Kelurusan (*Lineament Algorithm*)

Software PCI Geomatica memiliki algoritma kelurusan yang digunakan untuk mendapatkan kelurusan secara otomatis. Jenis input algoritma LINE yang tersedia dalam software PCI Geomatica adalah sebagai berikut:



Gambar 2. 7 Parameter Lineament Extraction

1. Filter RADI (*Radius*) adalah nilai radius dari *pixel* yang akan dikenai filter penajaman tepi.
2. GTHR (*Edge Gradient Threshold*) adalah nilai ambang gradien tepi yang digunakan untuk menentukan ambang batas Tingkat gradien minimum *pixel* tepi.
3. LTHR (*Curve Length Threshold*) adalah nilai dari panjang minimum *pixel* yang dihubungkan sebagai vektor kelurusan dan digunakan untuk menentukan Panjang minimum kurva dalam *pixel*.
4. FTHR (*Line Fitting Threshold*) adalah nilai ambang batas toleransi kesalahan dan digunakan untuk menentukan kesalahan maksimum dalam *pixel*. Nilai yang rendah akan menggambarkan penyesuaian yang lebih baik tetapi juga segmen yang lebih pendek dalam *polyline*.

5. ATHR (*Angular Difference Threshold*) adalah nilai maksimum perbedaan sudut antara dua vektor yang dihubungkan. Dan parameter ini digunakan untuk menentukan sudut maksimum (dalam derajat) antara *segmen polyline*.
6. DTHR (*Linking Distance Threshold*) adalah nilai Panjang maksimum antara dua vektor (dalam *pixel*) yang akan dihubungkan. Parameter ini digunakan untuk menentukan jarak minimum antara titik akhir dua vektor untuk ditautkan (Nugroho dan Susanto, 2015).

## 2.6 Diagram Rose

Diagram rose adalah diagram yang menggambarkan nilai dari suatu penampakan kebumihan atau alam yang terdiri atas parameter vektor (arah dan besaran) dalam sudut dan arah tertentu serta banyaknya jumlah kejadian (Nugroho dan Susanto, 2015). Dan diagram ini digunakan untuk perhitungan *trend* pola kelurusan agar dapat mengetahui seberapa banyak besaran data dan arah kelurusan yang muncul.

## 2.7 Densitas Kelurusan

Metode untuk menghitung kerapatan fitur linier (kelurusan) setiap sel raster pada data DEM dikenal sebagai densitas kelurusan. Jika densitas kelurusan dapat dipetakan, ini akan memberikan informasi tentang zona permeabel di suatu area (Willian dan Marsh, 1983). Densitas kelurusan dihitung dalam satuan panjang per satuan luas. Dengan kata lain, densitas kelurusan dihitung dari panjang kelurusan per satu kilometer. Semakin panjang (rapat) kelurusan dalam satu kilometer, semakin tinggi densitasnya (Silverman, 1986).

## 2.8 FFD (Fault Fracture Density)

Metode FFD (*Fault Fracture Density*) adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi struktur patahan atau sesar dalam suatu daerah. Metode ini didasarkan pada analisis terhadap peta sebaran kelurusan DEM (*Digital Elevation Model*) atau data DEM ALOS PALSAR. Metode ini memberikan informasi mengenai zona dengan densitas rekahan yang tinggi. Metode *Fault Fracture Densitas* (FFD) telah lama digunakan sebagai studi pendahuluan eksplorasi panas bumi dan dapat mengidentifikasi kondisi struktur makro di suatu daerah dengan memanfaatkan pola dan perhitungan kerapatan garis lineasi pada citra satellite. Metode ini memberikan data tentang zona dengan densitas rekahan yang tinggi. Zona-zona ini dianggap memiliki kapasitas untuk meloloskan fluida hidrotermal dan dapat berfungsi sebagai jalur siklus hidrologi di sistem panas bumi.

Fluida dapat berasal dari fluida yang terperangkap dalam batuan atau dari fluida permukaan, dan berfungsi sebagai media untuk perpindahan energi panas secara konvektif. Fluida memainkan peran penting dalam pembentukan sistem panas bumi. Singkatnya, sirkulasi fluida ini dapat dimulai dengan proses imbuhan atau recharge di area tangkapan (*catchment area*). Kemudian, fluida memasuki sistem panas bumi melalui penetrasi vertikal ke bawah permukaan, di mana proses discharge akhirnya terjadi di permukaan.

Karena hubungannya erat dengan siklus hidrologi dan jalur masuk dan keluar fluida hidrotermal, rekahan merupakan struktur yang harus diperhatikan. Rekahan dapat mengubah batuan beku yang memiliki permeabilitas primer yang rendah menjadi memiliki permeabilitas sekunder yang tinggi (Santoso, 2004). Area dengan densitas rekahan yang tinggi dapat dianggap sebagai indikasi tingginya tingkat masuknya fluida (Soengkono, 1999). Penarikan kelurusan pada lembahan dan sungai

pada peta elevasi digital (DEM) dapat digunakan untuk melakukan analisis density fault fracture. Berikut adalah tabel klasifikasi nilai FFD (*Fault Fracture Density*):

Tabel 2. 2 Klasifikasi Nilai FFD

Nilai FFD	Klasifikasi
0 - 0.1	Sangat Rendah
0.1 – 0.3	Rendah
0.3 – 0.7	Sedang
0.7 – 1.0	Tinggi
>1.0	Sangat Tinggi

Table diatas menunjukkan kalsifikasi nilai FFD (*Fault Fracture Density*) berdasarkan distribusi nilai anomalnya. Nilai FFD digunakan untuk mengukur kepadatan patahan dan retakan di suatu wilayah. Semakin tinggi nilai FFD, semakin tinggi juga kepadatan patahan dan retakan di wilayah tersebut.

Adapun secara matematis, FFD (*Fault Fracture Density*) dirumuskan sebagai berikut:

$$FFD = \left( \frac{N}{L} \right) \times 1000$$

Keterangan: FFD = *Fault Fracture Density*

N = jumlah patahan atau retakan yang terdeteksi pada suatu area

L = Panjang garis yang digunakan untuk menghitung jumlah patahan/rekahan

1000 adalah faktor konversi untuk mengubah satuan panjang menjadi kilometer

Rumus ini digunakan untuk menghitung kepadatan patahan atau retakan pada suatu area. Semakin tinggi nilai FFD, semakin tinggi kepadatan patahan atau retakan pada area tersebut.

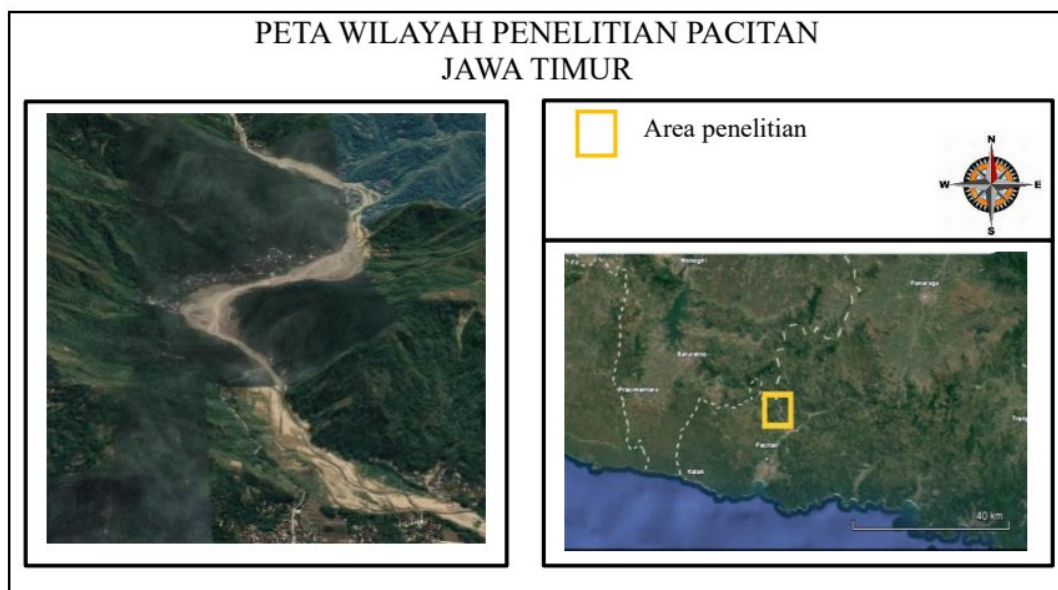


### BAB III

#### METODE PENELITIAN

##### 3.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di sekitar sumber air panas Tirta Husoso, yang terletak di Jalan Arjosari-Banyu Anget, Krajan RT.1/RW.2, Karangrejo, Arjosari, Krajan, Karangrejo, Kec. Arjosari, Kabupaten Pacitan. Sumber air panas ini dikelilingi oleh perbukitan dan pegunungan dikarenakan letaknya yang berada di lereng gunung Kelir, berjarak 15 kilometer sebelah utara kota Pacitan. Dengan koordinat daerah penelitian secara geografis terletak pada koordinat  $8^{\circ}6'4.68''$  LS -  $8^{\circ}4'59.73''$  LS dan  $111^{\circ}7'18.12''$  BT -  $111^{\circ}8'24.18''$  BT dengan luas daerah penelitian yaitu 2 km x 2 km.



Gambar 3. 1 Peta Wilayah Penelitian Pacitan

##### 3.2 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder berupa peta DEM (*Digital Elevation Model*) yang didapat melalui website sebagai berikut: <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/demnas> dan Peta Geologi daerah Pacitan.



### 3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Perangkat keras (*hardware*): menggunakan seperangkat laptop
2. Perangkat lunak (*software*) terdiri dari:
  - Google Earth : untuk menentukan titik koordinat
  - Microsoft Word 2019 : untuk penyusunan laporan
  - *PCI Geomatica* : untuk *ekstract liniament* secara otomatis
  - *RockWorks* : untuk membuat diagram *rose*
  - *ArcMap 10.6* : untuk membuat peta pemodelan

### 3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

#### 3.4.1 Pengumpulan Data

Tahap awal yang dilakukan dalam penelitian ini adaah melakukan studi literatur mengenai informasi geologi regional dan melakukan pengumpulan data. Tahap penelitian ini mengutamakan kajian literatur yang mendalam serta pengumpulan data geospasial yang berkaitan. Langkah ini sangat penting untuk menciptakan kerangka teoritis, menetapkan konteks geologi wilayah, dan menyediakan data mentah untuk kegiatan analisis di masa mendatang.



Gambar 3. 2 Tampilan Peta DEM

Pengumpulan data dalam tahap ini berpusat pada pengumpulan dua jenis data geospasial utama: Model Elevasi Digital (DEM) dan Peta Geologi Daerah.

Penggunaan DEMNAS sangat krusial karena menawarkan gambaran digital dari permukaan bumi dengan resolusi spasial yang cukup tinggi ( $8.25 \times 8.25$  meter), yang diperoleh dari penggabungan data citra radar (IFSAR dan TerraSAR-X) serta pengukuran dari Sistem Penentuan Posisi Global (GPS). data.

Data yang digunakan adalah peta DEMNAS yang didapatkan dari situs <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas> dan peta geologi regional dengan mengambil kabupaten tempat daerah penelitian, yaitu kabupaten Pacitan, Jawa Timur.

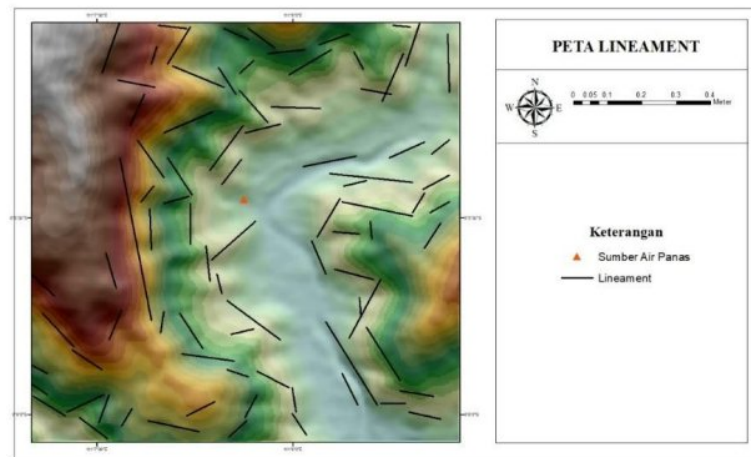
### 3.4.2 Pengolahan Data

Proses yang pertama dilakukan dalam pengolahan data adalah membuat peta FFD (*Fault Fracture Density*) atau peta densitas lineament, dengan mengambil kelurusan yang terkait dengan struktur atau refleksi topografi, seperti rekahan, sungai, lembah, dan struktur sesar. Dengan menggunakan perangkat lunak PCI Geomatica, tools fokus digunakan untuk membuat lineament pada daerah penelitian. Dengan demikian, kelurusan akan diperoleh secara otomatis berdasarkan data DEM Nasional yang telah dikonversi oleh perangkat lunak Global Mapper.

Tabel 3. 1 Nilai default pada parameter PCI Geomatica 2016 (Thannoun R.G., 2013)

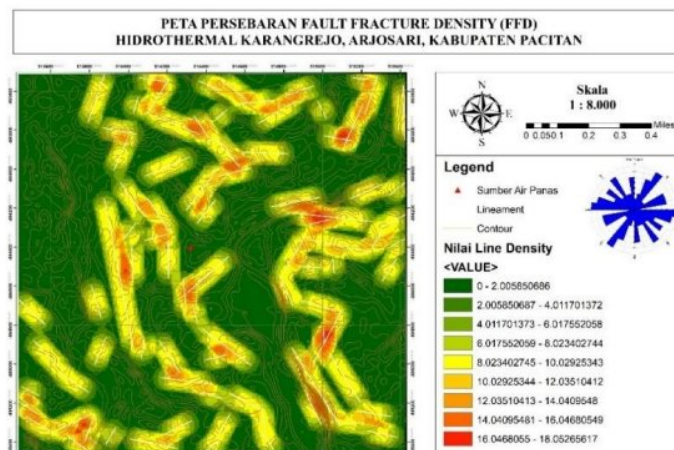
Parameter	Nilai Input
RADI ( <i>Filter Radius</i> )	5
GTHR ( <i>Gradient Threshold</i> )	75
LTHR ( <i>Length Threshold</i> )	10
FTHR ( <i>Line Fitting Error Theshold</i> )	2
ATHR ( <i>Angular Difference Threshold</i> )	20
DTHR ( <i>Linking Distance Threshold</i> )	1

Output yang akan dihasilkan oleh PCI Geomatica adalah peta DEM dengan nilai lineament extraction yang kemudian dikoreksi kembali oleh ArcGIS menggunakan SplitLine sebagai berikut:



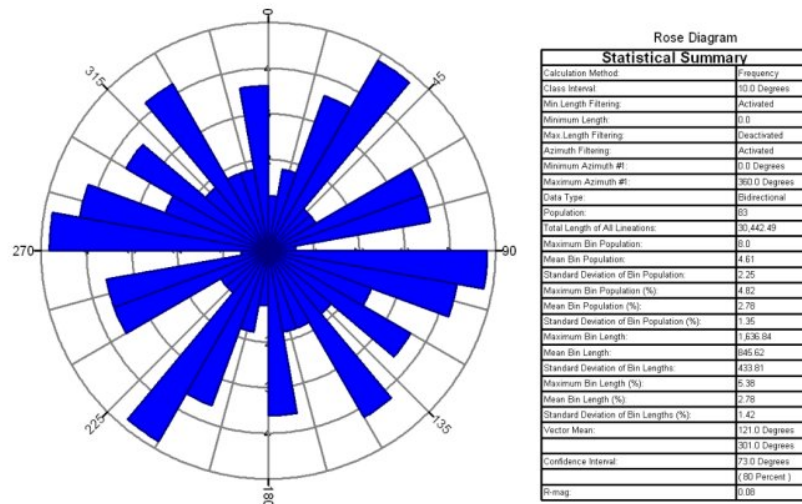
Gambar 3. 3 Peta Lineament Extraction

Peta lineament extraction yang telah didapatkan kemudian diolah hingga menghasilkan peta line density dan nilainya.



Gambar 3. 4 Peta Line Density

Proses selanjutnya adalah membuat *rosette diagram* untuk mengetahui arah dengan persebaran terbesar dan dilakukan di *software RockWorks*.

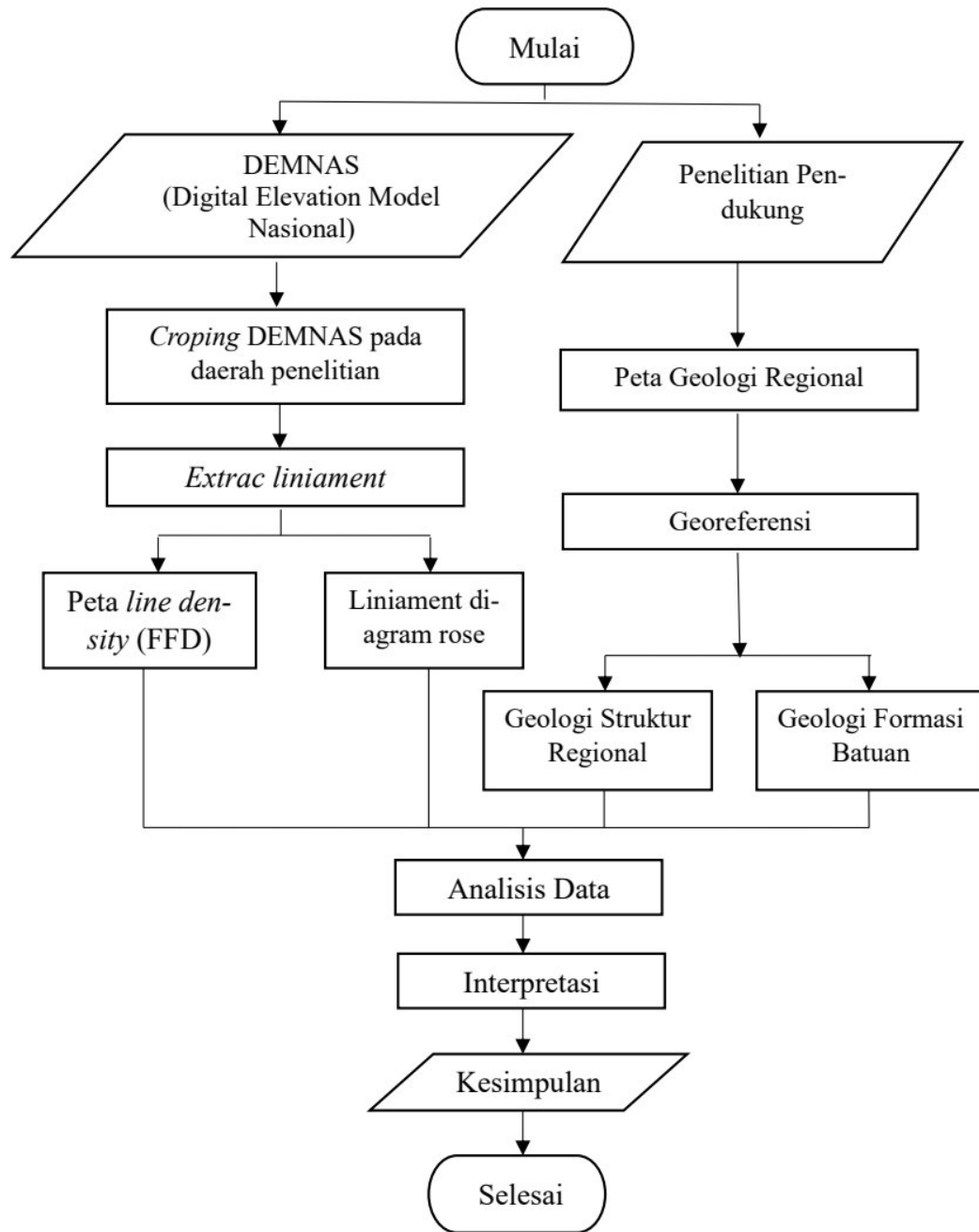


Gambar 3. 5 Diagram Rose

### 3.4.3 Interpretasi Data

Interpretasi data dilakukan setelah menganalisis data yang terdiri dari peta *line density* (FFD) dan diagram rose yang kemudian dibandingkan dengan geologi struktur regional dan geologi formasi batuan pada daerah penelitian. Dari pembacaan tersebut akan diketahui kawasan permeabel di daerah penelitian.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 6 Diagram Alir

## **BAB IV**

### **ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

FFD (*Fault Fracture Density*) merupakan metode sederhana yang diterapkan dalam eksplorasi *geothermal* untuk menemukan area yang memiliki nilai keretakan tinggi. Dalam sistem panas bumi, patahan, rekahan, ataupun interaksi antara batuan intrusiv dengan batuan di sekitarnya dapat menjadi saluran untuk air panas. Area ini kemungkinan tinggi terkait dengan reservoir *hidrothermal* di kedalaman tersebut. Sebagai contoh di beberapa daerah yang mempunyai sistem panas bumi vulkanik dataran rendah New Zealand seperti TeKopia, Mokai, dan Rotokawa menerapkan metode ini. Kawasan dengan nilai FFD tinggi biasanya berkorelasi baik dengan manifestasi termal dan reservoir bawah permukaan dan berkebalikan jika diterapkan pada sistem panas bumi dataran tinggi non-vulkanik (Suryantini dan Hendro, 2010).

#### **4.1 Analisis Data Penginderaan Jauh**

Data penginderaan jauh yang digunakan adalah data *Digital Elevation Model* (DEM) dari DEMNAS dan peta geologi Pacitan. Dengan luasan wilayah penelitian  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  meliputi koordinat  $8^{\circ}6'4.68'' \text{ LS} - 8^{\circ}4'59.73'' \text{ LS}$  dan  $111^{\circ}7'18.12'' \text{ BT} - 111^{\circ}8'24.18'' \text{ BT}$ , tepatnya di daerah Karangrejo, Arjosari, kabupaten Pacitan, Jawa Timur.

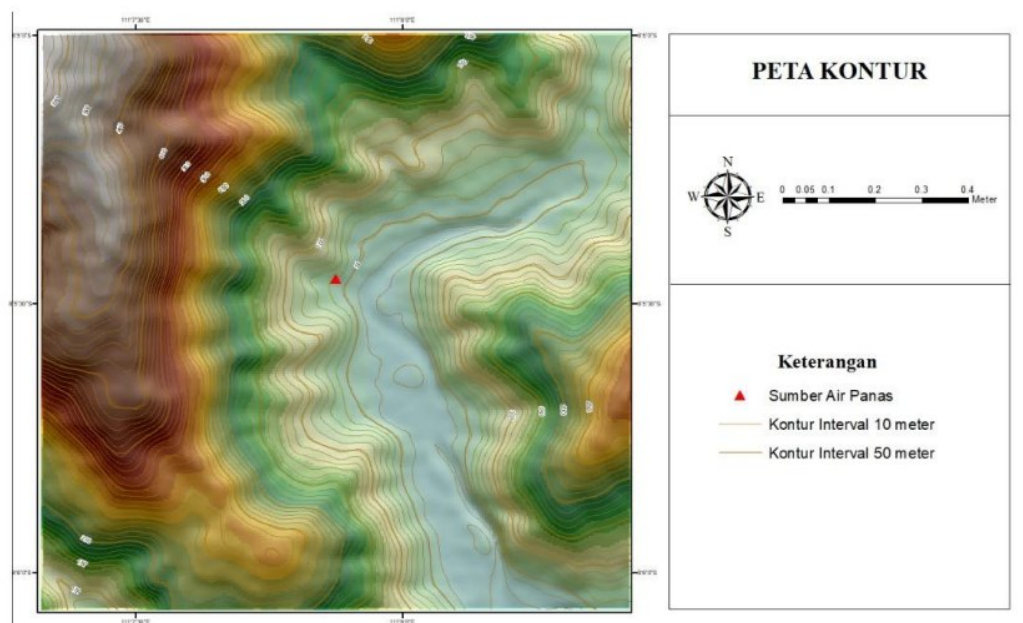
##### **4.1.1 Ekstraksi DEM dan Analisis Topografi**

Pemilihan data DEM dikarenakan DEMNAS dikembangkan menggunakan berbagai sumber data, termasuk mass point, TerraSAR-X, IFSAR, ALOS PALSAR, dan lainnya. Sehingga data DEM yang disediakan oleh DEMNAS sudah bisa



langsung digunakan dalam analisis topografi dan geologi tanpa perlu melakukan ekstraksi data. Dengan resolusi spasial yang mencapai 0,27 arc-detik atau sekitar 8 meter, DEMNAS menawarkan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan dengan data DEM internasional, yaitu 8,33 meter.

Lokasi penelitian memiliki luasan  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  dengan topografi yang mendominasi adalah lingkungan morfologi pegunungan dan embah dan mengalir sungai di bawahnya. Pembentukan morfologi ini dikarenakan aktivitas tektonik dan vulkanik yang terjadi di Kawasan Pegunungan Selatan Jawa Timur.

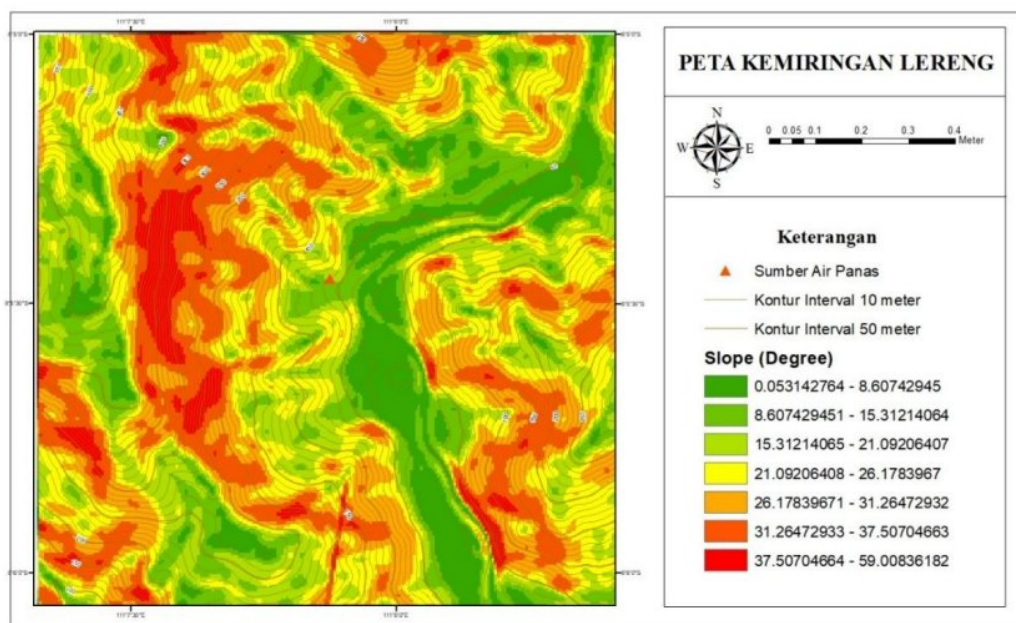


Gambar 4. 1 Peta Kontur

Pola sebaran kontur memiliki elevasi 10 meter menunjukkan variasi morfologi mulai dari dataran relative landai hingga lerejaringan ng yang lebih curam. Kerapatan kontur menunjukkan kemiringan lereng yang tinggi, sedangkan penampakan kontur yang berjauhan menunjukkan area yang lebih landai. Kontur elevasi menunjukkan variasi ketinggian yang signifikan karena adanya perbukitan dan lembah yang relative sempit. Kemiringan Lembah yang signifikan juga berkaitan

dengan struktur geologi yang dapat menjadi jalur migrasi fluida panas bumi seperti sesar atau rekahan.

Berdasarkan peta kontur diatas menunjukkan variasi pada relief yang signifikan. Bagian barat laut didominasi oleh pegunungan atau perbukitan dengan lereng yang curam disertai puncak-puncak yang jelas. Pada bagian tengah dan timur cenderung landai dengan adanya jaringan aliran sungai dan lembah-lembah kecil. Sedangkan pada bagian barat menunjukkan struktur punggungan yang memanjang. Untuk sumber air panas sendiri terletak di area dengan ketinggian yang relative tinggi dan dekat dengan lereng yang curam, yang mengindikasikan area pegunungan.



Gambar 4. 2 Peta Kemiringan Lereng

Kemiringan suatu lereng berkaitan dengan potensi keberadaan struktur geologi dan zona permeable. Misalnya seperti lereng curam mengindikasikan area dengan erosi tinggi akibat sedar atau patahan yang terekspos dan zona ini dapat menjadi jalur fluida hidrothermal. Atau perubahan kemiringan yang tiba-tiba mengindikasikan keberadaan scarp sesar atau perubahan litologi yang mempengaruhi terhadap



erosi. Berdasarkan gambar peta kemiringan lereng diatas menyajikan informasi mengenai tingkat kemiringan lereng yang bervariasi dan merepresentasikan kelas-kelas kemiringan yang berbeda. Jika didasarkan pada klasifikasi kemiringan Van Zuidam & Cancelado (1979), secara ringkas dapat dijelaskan dalam table di bawah ini:

Tabel 4. 1 Tingkat Kemiringan Wilayah Penelitian

Rentang Nilai (Derajat)	Perhitungan Persentase Kemiringan	Rentang Persentase Kemiringan	Kelas Kemiringan Lereng Van Zuidam & Cancelado (1979)
0.05 - 8.61	$\tan(0.05^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(8.61^\circ) \times 100\%$	0.09% - 15.12%	Hampir Datar - Sangat Landai
8.61 - 15.31	$\tan(8.61^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(15.31^\circ) \times 100\%$	15.12% - 27.34%	Landai
15.31 - 21.09	$\tan(15.31^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(21.09^\circ) \times 100\%$	27.34% - 38.57%	Agak Curam
21.09 - 26.18	$\tan(21.09^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(26.18^\circ) \times 100\%$	38.57% - 49.14%	Agak Curam - Curam
26.18 - 31.26	$\tan(26.18^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(31.26^\circ) \times 100\%$	49.14% - 60.78%	Curam
31.26 - 37.51	$\tan(31.26^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(37.51^\circ) \times 100\%$	60.78% - 76.78%	Curam
37.51 - 59.00	$\tan(37.51^\circ) \times 100\%$ s.d. $\tan(59.00^\circ) \times 100\%$	76.78% - 166.43%	Sangat Curam - Terjal

Derajat (*degrees*) menunjukkan sudut kemiringan terhadap bidang datar, dengan rentang nilai dari 0°(datar) hingga 90°(vertikal). Sedangkan persen (*percent rise*) menunjukkan persentase kenaikan vertical terhadap jarak horizontal ( $\text{rise/sun} \times 100\%$ ), misalnya lereng dengan sudut 45° setara dengan 100% kemiringan, dan semakin curam lerengnya, nilai persen ini bisa melebihi 100% (ESRI, 2021).

Sebaran warna pada peta menunjukkan bahwa Sebagian besar wilayah memiliki lereng dengan Tingkat kemiringan yang signifikan, terutama pada area yang berwarna orange dan merah. Area dengan lereng landai (hijau muda) kemungkinan merupakan dataran yang lebih datar atau bagian lembah yang melebar. Distribusi

kemiringan lereng dapat mempengaruhi pola aliran air permukaan dan bawah permukaan yang berpetan dalam sirkulasi fluida hidrotermal.

#### 4.1.2 Identifikasi Lineament

Dalam konteks geologi struktur dan geomorfologi, lineament merupakan kenampakan linear atau hamper linear pada permukaan bumi yang mencerminkan adanya struktur geologi seperti sesar, patahan, kekar, atau batas litologi di bawahnya. Identifikasi lineament ini akan memberikan indikasi keberadaan zona-zona lemah atau permeabel yang berpotensi sebagai jalur pergerakan fluida hidrotermal dan mengontrol pembentukan struktur geologi di wilayah penelitian (O'Leary et.al, 1979).

Ekstraksi lineament pada penelitian ini dilakukan secara otomatis menggunakan software PCI Geomatica, dikarenakan kemampuannya untuk memproses data citra secara efisien dan objektif, serta memberikan hasil sejumlah besar lineament yang dapat dianalisis lebih lanjut. Algoritma yang digunakan oleh PCI Geomatica dalam proses ekstraksi lineament adalah algoritma berbasis deteksi tepi (EDGE).

Algoritma deteksi tepi bekerja dengan mengidentifikasi perubahan signifikan dalam intensitas piksel dalam citra . Intensitas mengidentifikasi perubahan signifikan pada intensitas piksel dalam citra . ini sering kali disertai dengan sejumlah fitur yang berbeda , seperti kenampakan linier garis lurus (Gonzalez & Woods, 2018). Secara umum, algoritma deteksi tepi di PCI Geomatica mengidentifikasi algoritma dalam beberapa langkah kunci :

- a. Penghalusan (*Smoothing*): langkah pertama ini bertujuan untuk mengurangi noise atau variasi fotografi yang tidak signifikan dalam teks.

Penghalusan dilakukan dengan menggunakan filter ( misalnya, filter Gaussian ) untuk menyesuaikan piksel di sekitar area fokus sehingga karakteristik kecocokan lebih signifikan ( Jain , 1989 ).

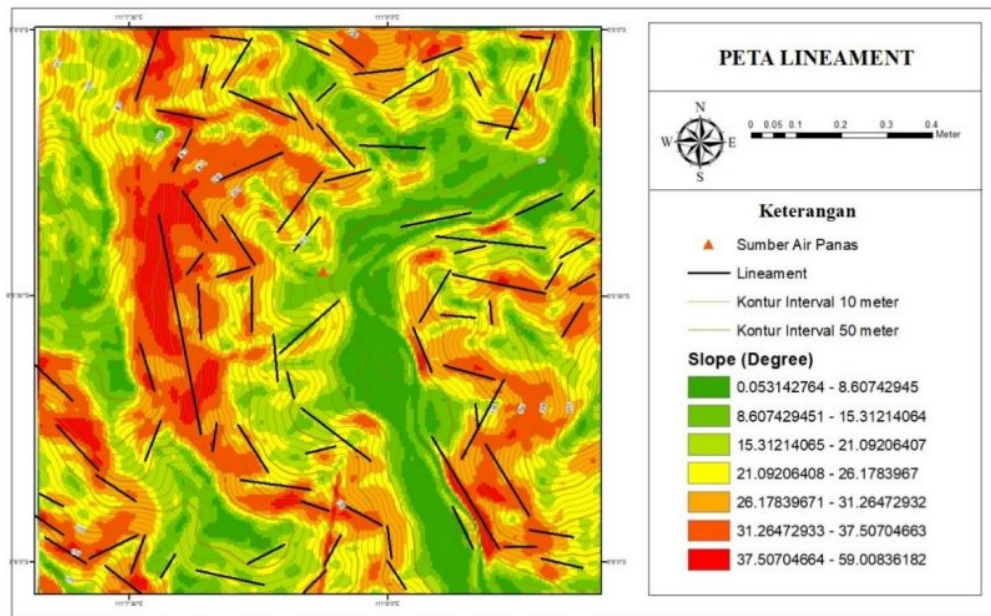
- b. Pendektasian Gradien (*Gradien Calculation*): gradien menunjukkan besar dan arah perubahan intensitas untuk setiap piksel dalam citra. Piksel dan gradien yang tinggi menandakan perubahan intensitas yang tajam dan berpotensi menjadi bagian dari tepi (batas lineament).
- c. Penipisan (*Edge Thinning*): hasil perhitungan gradien sebelumnya seringkali menghasilkan garis tepi yang tebal, maka dari itu tujuan dari dilakukan penipisan adalah untuk mempersempit tepi menjadi garis setipis satu piksel sehingga menghasilkan representasi lineament yang akurat (Marr & Hildreth, 1980).
- d. Ambang batas (*Thresholding*): pada tahap ini melibatkan penerapan ambang batas (*threshold*) pada nilai gradien untuk memisahkan piksel yang merupakan bagian dari tepi (*lineament potensial*) dari piksel lainnya. Pemilihan nilai ambang batas ini penting untuk menghasilkan lineament relevan dan mengurangi kenampakan linear yang bukan struktur geologi (*false positives*).
- e. Penghubungan tepi (*Edge Linking*): tahap ini bertujuan untuk menghubungkan segmen-segmen tepi yang berdekatan menjadi lineament yang lebih kontinyu dikarenakan ada kemungkinan setelah proses *thresholding* tepi-tepi yang terdeteksi mungkin terputus-putus.

Pada penelitian ini input yang digunakan dalam membuat lineament di software PCI Geomatica adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 2 Input Nilai Lineament Extraction

Parameter	Nilai Input	Keterangan
RADI ( <i>Filter Radius</i> )	5	Jarak antar garis dalam pixel. Contoh: DEM-NAS memiliki 7.5 m pixel, jika memilih nilai input 10 maka $7.5 \text{ m} \times 10 = 75 \text{ m}$ , maka jarak antar garis adalah 75 meter.
GTHR ( <i>Gradient Threshold</i> )	5	Ambil nilai terkecil
LTHR ( <i>Length Threshold</i> )	10	Panjang dari garis struktur (per pixel). Semakin besar nilai yang diambil, akan mendapatkan garis struktur yang panjang tapi sedikit jumlahnya, jika nilai semakin kecil akan mendapatkan jumlah garis struktur banyak namun pendek-pendek (memotong garis struktur panjang menjadi pendek).
FTHR ( <i>Line Fitting Error Theshold</i> )	100	Yang dapat ditoleransi adalah 95 – 100 %
ATHR ( <i>Angular Difference Threshold</i> )	10	Pembagian spasi antar roset dalam diagram rose
DTHR ( <i>Linking Distance Threshold</i> )	5	Spasi antar garis dalam pixel

Hasil ekstraksi lineament yang didapatkan dalam *software* PCI Geomatica kemudian diolah kembali di ArcGIS. Sebelum dilakukan pengolahan *line density*, terlebih dahulu peta lineament (yang berupa garis-garis Panjang yang merepresentasikan fitur linear seperti patahan dan kekar) di ArcGIS, dilakukan *Split Line* (pemecahan) untuk menghasilkan segmen-segmen garis yang lebih representative dari bagian-bagian struktur geologi berdasarkan perubahan arahnya. Ini akan menghasilkan peta kerapatan patahan dan kekar yang lebih akurat dan detail dibandingkan dengan tidak memecah garis serta akan membantu dalam menangkap variasi kerapatan local dan mempermudah analisis orientasi selanjutnya. Hasil setelah dilakukan *split line* liniament khususnya akan terlihat sebagai berikut:



Gambar 4. 3 Peta Lineament

Keberadaan lineament seringkali berkaitan dengan zona lemah geologi yang dapat menjadi jalur pergerakan air panas ke permukaan. Pada gambar peta diatas, garis-garis putih merepresentasikan lineament. Didukung oleh diagram rose yang diperoleh, orientasi lineament tersebar tidak acak, melainkan memiliki kecendrungan ke arah timur laut – barat daya, timur – barat, dan barat laut – Tenggara. Pola ini mengindikasikan adanya control struktur geologi yang signifikan terhadap pembentukan kenampakan linear di wilayah tersebut.

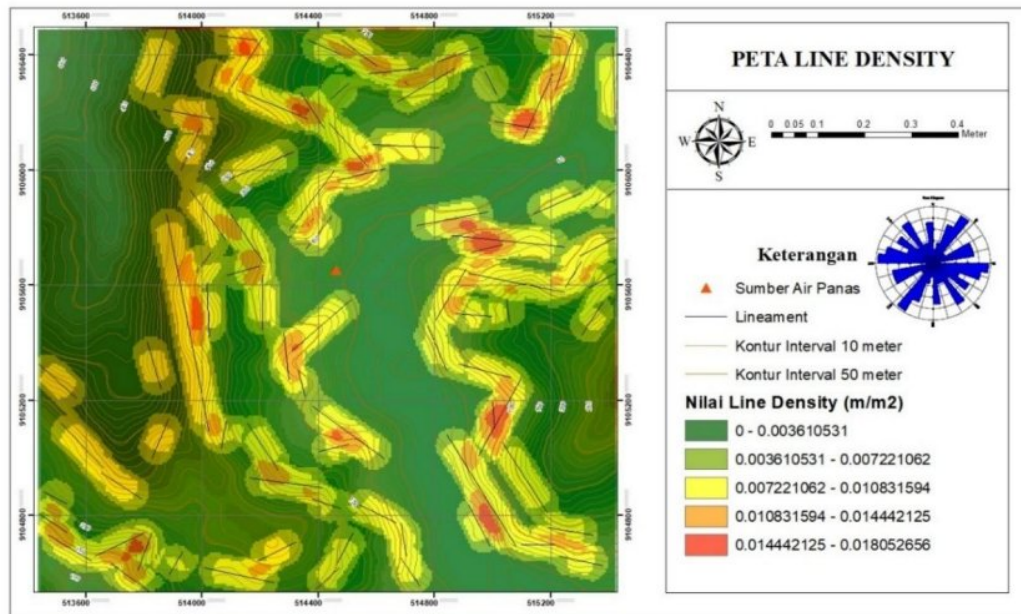
## 4.2 Analisis Kerapatan dan Orientasi Lineament

### 4.2.1 Perhitungan Kerapatan Lineament (Line Density)

Untuk menganalisis sebaran lineament, maka dilakukan perhitungan *Line Density* (kerapatan garis) menggunakan tool Line Density yang terdapat dalam *software* ArcGIS. Metode ini akan menghitung total Panjang lineament per unit area, dan akan menghasilkan Gambaran kuantitatif mengenai konsentrasi kelurusan di berbagai bagian wilayah (Koike et.al., 1995). Langkah-langkah perhitungan *Line Density* sebagai berikut:

- a. Input Data: menggunakan file layer lineament yang telah di ekstraksi dan memiliki sistem koordinat yang telah sesuai.
- b. Tool *Line Density*: analisis *line density* dilakukan menggunakan tool *Line Density* yang terdapat dalam Geoprocessing > ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Density > Line Density.
- c. Parameter Input:
  - Input Polyline Features: input layer vector lineament
  - Population Field (opsional): digunakan jika setiap lineament memiliki atribut bobot, tapi tidak digunakan dalam penelitian ini
  - Output Raster: menentukan lokasi dan nama penyimpanan peta *line density*
  - Cell Size: terisi secara otomatis berdasarkan resolusi data input
  - Search Radius: parameter yang menentukan ukuran area di sekitar sel output yang akan digunakan untuk menghitung kerapatan
  - Output Values: unit kerapatan yang dihasilkan adalah meter garis per meter persegi ( $m/m^2$ )
- d. Proses Perhitungan: tool *line density* menghitung kerapatan berdasarkan total Panjang lineament dalam radius pencarian di sekitar setiap sel output, dibagi dengan luas area pencarian.
- e. Visualisasi Hasil: peta raster *line density* divisualisasikan dengan skema warna untuk menonjolkan variasi kerapatan.



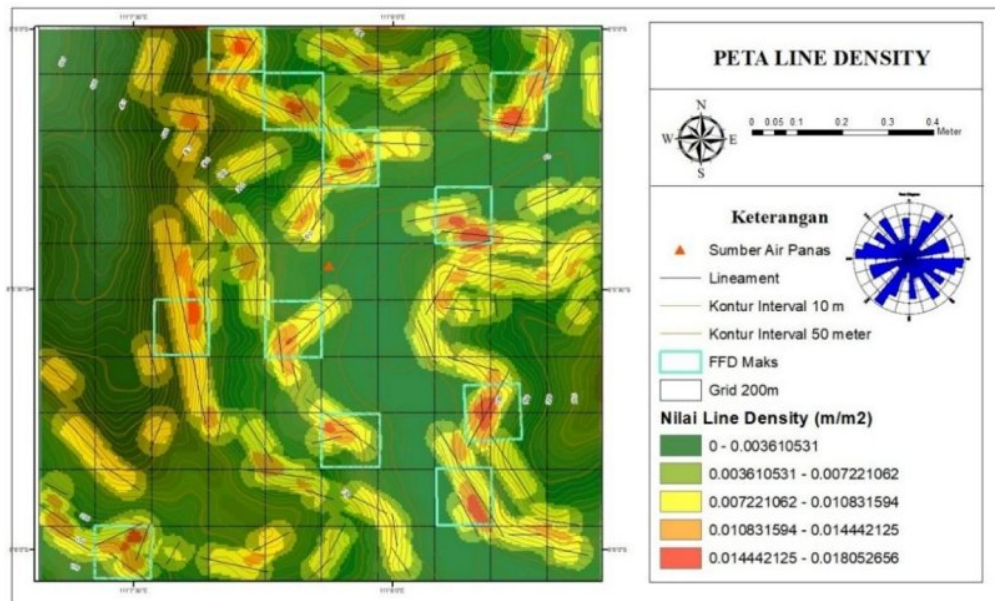


Gambar 4. 4 Peta Line Density

Unit kerapatan yang digunakan adalah meter garis per meter persegi ( $m/m^2$ ), yang berarti setiap nilai pada peta raster kerapatan menunjukkan total panjang lineament dalam meter yang terdapat dalam area seluas satu meter persegi di sekitar lokasi sel tersebut. Unit meter ini dipilih karena sesuai dengan skala peta yang detail dan akan memudahkan interpretasi pada skala lokal.

#### 4.2.1 Peta Zonasi Fault Fracture Density (FFD)

Peta *line density* yang ditampilkan dengan pengaturan *default* ArcGIS menggunakan klasifikasi *Natural Breaks*. Metode klasifikasi menggunakan zonasi *natural breaks* dikarenakan metode ini dapat memisahkan zona-zona dengan perubahan nilai densitas yang signifikan, sehingga lebih representative terhadap sebaran data sebenarnya.



Gambar 4. 5 Peta Line Density Maks

Pada peta ini, digunakan 5 kelas zonasi dengan keterangan nilai yang dapat dilihat pada legenda :

- 0 – 0.003610531 (hijau tua)
- 0.003610531 – 0.007221062 (hijau muda)
- 0.007221062 – 0.010831594 (kuning)
- 0.010831594 – 0.014442125 (oranye)
- 0.014442125 – 0.018052656 (merah)

Dalam penyajian statistic deskriptif nilai FFD (*Fault Fracture Density*) nilai minimum adalah 0  $m/m^2$ , nilai maksimum adalah 0.018052686  $m/m^2$  dengan nilai rata-rata berada di 0.003849282262833815 dikarenakan rentang kelas cukup merata dan distribusi *line density* cenderung ke area yang bernilai rendah. Sedangkan untuk nilai standar deviasi, dengan rentang nilai dari 0 – 0.018 dan 5 kelas, berada pada nilai 0.004255048544313106.



#### 4.2.2 Analisis Statistik Nilai FFD

Berdasarkan peta *Line Density* di atas, zona kerapatan tinggi yang ditandai oleh warna merah-oranye ( $0.01444\text{--}0.01805\text{ m/m}^2$ ) terdapat di beberapa lokasi yaitu barat laut, Tengah, timur laut, barat daya, dan tenggara yang mana zona-zona ini berasosiasi dengan tanda kotak biru muda (FFD Maks) dan berada di jalur pegunungan atau lereng curam yang berdekatan dengan manifestasi panas bumi di tengah area. Lalu zona kerapatan sedang yang ditandai dengan warna kuning ( $0.00722\text{--}0.01444\text{ m/m}^2$ ) membentuk jalur memanjang yang mengelilingi zona merah/orange dan tersebar di seluruh area baik di barat, Tengah, maupun timur. Kemudian untuk zona kerapatan rendah yang ditandai dengan warna hijau tua dan hijau muda ( $0\text{--}0.0072\text{ m/m}^2$ ) mendominasi area di luar jalur lineament utama, terutama di bagian timur, selatan, dan sebagian tengah, dan area ini dicirikan oleh batuan masif dengan sedikit rekahan.

#### 4.2.3 Interpretasi Pola Spasial Kerapatan Lineament

Hubungan spasial dengan topografi yang terlihat di peta menunjukkan pada zona kerapatan tinggi cenderung berada di lereng curam/punggungan (pada peta ditunjukkan dengan kontur rapat) yang menandakan deformasi intens aktivitas tektonik aktif dan berasosiasi dengan jalur lineament utama yang diberi plot FFD Maks. Pada zona kerapatan sedang mengikuti jalur lineament dan menjadi zona transisi antara area rekahan intens dan batuan masif. Sedangkan untuk zona kerapatan rendah berada di area lembah/datar (dengan kontur yang renggang) dengan permeabilitas rendah serta jauh dari jalur utama lineament.

Segitiga merah yang terletak di tengah area merupakan lokasi Pemandian air panas Tirta Husodo tempat munculnya manifestasi *hidrotermal*, dan berdasarkan

peta berada di area yang berdekatan dengan zona kerapatan tinggi dan sedang, yang menandakan bahwa jalur rekahan intens menjadi jalur migrasi fluida *hidrotermal*.

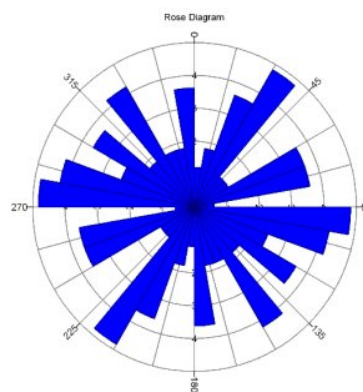
Interpretasi makna perbedaan kerapatan *Fault Fracture Density* pada kerapatan tinggi menunjukkan zona patahan utama (*damage zone*) dengan intensitas deformasi maksimal dan permeabilitas sekunder tinggi yang berfungsi sebagai jalur utama migrasi fluida panas bumi. Pada kerapatan sedang merupakan zona patahan sekunder atau cabang yang masih cukup permeabel dan berperan sebagai laur fluida tambahan. Lalu untuk kerapatan rendah merupakan area batuan massif dengan permeabel rendah sehingga kurang berperan dalam system panas bumi.

Pola zonasi *Fault Fracture Density* pada peta dikontrol oleh struktur geologi regioanal berupa sistem sesar besar yang mengatur distribusi deformasi dan rekahan di wilayah tersebut. Pola linear kerapatan FFD yang mengikuti arah barat laut-tenggara (NW-SE) dan timur laut-barat daya (NE-SW) mencerminkan keberadaan sesar regional aktif atau sesar besar yang mengontrol deformasi kerak bumi di area tersebut. Sesar ini merupakan zona lemah utama yang memfasilitasi terbentuknya rekahan dan patahan sekunder yang membentuk pola lineament dan kerapatan rekahan. Zona interseksi sesar menjadi area konsentrasi deformasi dan permeabilitas maksimum, yang berperan penting untuk jalur migrasi fluida panas bumi. Pola linear yang dominan mengindikasikan pengaruh tegasan regional dan mekanisme tektonik sesar, tanpa pola radial signifikan yang biasanya terkait aktivitas vulkanik pusat.

#### **4.2.4 Analisis Orientasi Lineament (Diagram Rose)**

Untuk lebih memvisualisasikan, digunakan diagram rose sebagai alat visualisasi dan kuantifikasi orientasi serta frekuensi arah struktur geologi seperti patahan,

rekahan, kekar, atau kelurusan morfologi di suatu wilayah. Pembuatan diagram rose menggunakan data hasil ekstraksi lineament yang telah diperoleh dari hasil digitasi pada peta, kemudian disimpan dalam format koordinat titik awal (X1, Y1) dan titik akhir (X2, Y2) pada CAD atau DXF. Kemudian file DXF yang berisi data akan diimpor ke *software* RockWorks untuk kemudian secara otomatis akan menghitung orientasi (azimuth) setiap lineament berdasarkan koordinat titik awal-akhir. Hingga hasilnya akan keluar berupa plot diagram rose yang menunjukkan frekuensi orientasi lineament pada setiap interval sudut.



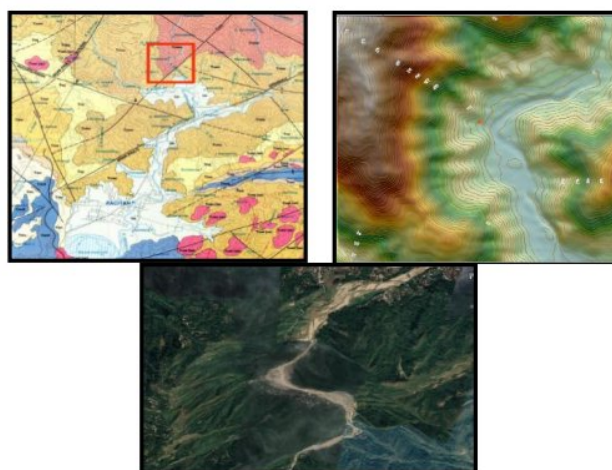
Gambar 4. 6 Diagram Rose Wilayah Penelitian

Arah dominan lineament berdasarkan statistik dengan rata-rata lineament (*Vector Mean*) adalah  $121.01^\circ$  arah tenggara/SE. Pada bin dengan populasi count terbanyak yang mencakup 12 lineament, berarti sekitar 13,64% dari total 88 lineament yang dianalisis, dan mereka semua mengarah pada arah tersebut. Meskipun ada satu arah dominan, distribusi orientasi garis sejauh ini relatif tersebar, dengan rata-rata populasi per bin 6,6 lineament (7,58%) disertai standar deviasi 3,25. Itu berarti meskipun ada tren mayor, ada cukup kekuatan di arah lain yang berserak dan terdistribusi di berbagai areal. Signifikan, nilai R-mag yang rendah 0,08 menunjukkan bahwa sebaran lineament tidak terpusat pada satu arah, tetapi

cenderung menyebar secara relatif, hal itu juga didukung pada confidence interval yang cukup signifikan  $73^\circ$  menyiratkan garis janji yang substansial pada arah rata-rata.

### 4.3 Interpretasi Struktur Geologi Berdasarkan Orientasi Lineament

Analisis yang terkumpul hingga saat ini, belum mendefinisikan kawasan daerah penelitian ke dalam sub-area, sehingga variasi arah dominan di bulan lineament pada bagian-bagian kawasan masih belum teridentifikasi secara tepat. Namun, akan sangat mungkin ditemukan variasi arah dominan yang berbeda antara bagian-bagian wilayah apabila analisis dilakukan per sub-area. Variasi ini dapat mengindikasikan adanya domain-domain struktur yang berbeda, yang mungkin disebabkan oleh pengaruh sesar lokal, interseksi zona rekahan, atau pergeseran pola tegasan akibat regional stress. Diferensiasi domain struktur yang berbeda ini untuk mesian geologi lokal dan kontrol-struktur yang berperan dalam perilaku rekahan serta sejumlah potensi jalur migrasi fluida panas bumi.



Gambar 4. 7 Topografi dan Struktur Geologi Wilayah Penelitian

Dalam pemeriksaan peta lineament, pola distribusi NW-SE dan NE-SB muncul sebagai dua arah dominan pada peta kepadatan garis dan diagram rose. Pola ini sangat konsisten dengan arah patahan regional utama yang terlihat pada peta

geologi, di mana daerah penelitian dilalui oleh patahan utama dengan arah yang sama.

Secara genetik, lineament-lineament ini merupakan produk dari aktivitas tektonik regional yang didominasi oleh tegasan utama akibat interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia di Jawa Timur. Tegasan regional menghasilkan strike-slip fault (sesar geser) dan rekahan sekunder yang terbentuk sejajar atau miring terhadap arah maksimum tegasan (Pollard & Fletcher, 2005).

Variasi pola jurus dan zona perpotongan dua arah yang ada (NW-SE dan NE-SW) merupakan indikasi adanya interaksi antara sesar utama dan sesar sekunder. Zona dengan densitas tinggi (merah/oranye) pada peta densitas garis sebagian besar berada di sepanjang dan di sekitar perpotongan garis, yang disebut sebagai zona kerusakan - daerah dengan konsentrasi deformasi tinggi dan permeabilitas maksimum.

#### **4.4 Hubungan Pola Kelurusan dengan Tektonik Regional**

Sesar utama berkembang mengikuti orientasi tegangan regional, sedangkan sesar sekunder dan kumpulan sambungan merupakan hasil dari tegangan lokal atau penyimpangan dari pola tegangan. Hubungan ini signifikan karena zona perpotongan merupakan jalur yang lebih disukai untuk migrasi fluida hidrotermal, yang juga dibuktikan dengan adanya mata air panas di daerah konsentrasi garis yang kuat (Twiss & Moores, 2007; Gudmundsson, 2011).

Dominasi lineament dua arah dengan sudut-sudut perpotongan yang besar (mendekati  $60-90^\circ$ ) mengindikasikan bahwa daerah ini kemungkinan besar berada di bawah pengaruh rejim strike-slip atau kombinasi rejim geser-tekan (transresif). Rejim geser membentuk dua kelompok sesar utama dan rekahan yang berpotongan, seperti yang digambarkan pada peta geologi dan diagram rose. Transpresi dapat

terjadi apabila ada komponen kompresi yang menstimulasi sesar naik atau rekahan sekunder.

Jika terdapat lineament yang tegak lurus terhadap arah utama atau miring terhadap arah utama, maka hal ini dapat menunjukkan adanya kekar tarik (extensional joints) karena adanya perubahan tegasan arah lokal (Fossen, 2016).

Peta geologi menggambarkan bahwa lokasi penelitian terletak di antara dua satuan batuan yang terpotong oleh sesar utama. Satuan batuan lain dapat mempengaruhi pola rekahan dan permeabilitas. Peta topografi dan lineament menunjukkan bahwa lineament mengikuti pola morfologi, terutama pada bagian punggung dan lembah, yang mengindikasikan adanya kontrol geologi struktural pada bentang alam. Konsentrasi sumber air panas pada daerah dengan kerapatan lineament yang tinggi memperkuat bahwa struktur geologi regional dan pola rekahan secara substansial mengontrol jalur migrasi fluida dan potensi sistem panas bumi.

Zona dengan densitas lineament yang tinggi sangat prospektif sebagai jalur migrasi fluida hidrotermal dan target eksplorasi panas bumi. Interfeksi utama dan sekunder menjadi area prioritas survei lanjutan karena berpotensi memiliki zona permeabilitas maksimum. Satuan batuan yang berbeda pada peta geologi haruslah diperhatikan karena dapat mempengaruhi distribusi rekahan dan kualitas reservoir.

Arah dominan yang teramati (NW-SE dan NE-SW) sangat sesuai dengan orientasi struktur geologi skala besar dan orientasi sumbu-sumbu regional tekanan tektonik yang telah dipetakan di Pacitan dan Jawa Timur. Pola ini sesuai dengan hasil analisis morfotektonik dan arah sesar aktif seperti Sesar Grindulu yang berarah NE-SW dan membagi Pacitan menjadi dua bagian besar.



Berbagai makalah dan penelitian geologi dan seismotektonik di Pacitan dan Jawa Timur mengindikasikan bahwa wilayah ini dikontrol oleh beberapa arah struktur yang signifikan:

- NW - SE (N310°E - N330°E): Disebut juga sebagai Pola Sumatra, merupakan tren sesar-sesar signifikan seperti Sesar Grindulu, Sesar Dayakan, dan Sesar Tegalombo.
- NE-SW (N045°E-N050°E): Sesar ini dikenal dengan nama Pola Meratus, yang berkembang kuat di Kawasan ini.
- E-W (N080° E): Pola Jawa, juga terdeteksi namun tidak begitu tegas
- N-S (N350°E-N010°E): Pola Sunda, terjadi lebih jauh ke utara Jawa dan di struktur local

Rekonstruksi tegasan purba Pacitan menunjukkan tegasan maksimum ( $\sigma_1$ ) telah berbalik dari Miosen ke Kuartar namun masih memberikan kontribusi terhadap sesar, lipatan, dan rekahan yang berarah NW-SE dan NE-SW sesuai dengan polanya. Jika terjadi perbedaan tersendiri antara arah lineament lokal dan arah struktur regional, perbedaan tersebut mungkin disebabkan oleh pengaruh struktur lokal, perubahan pola tegasan minor, atau nilai semantik litologi bagian atau lapisan.

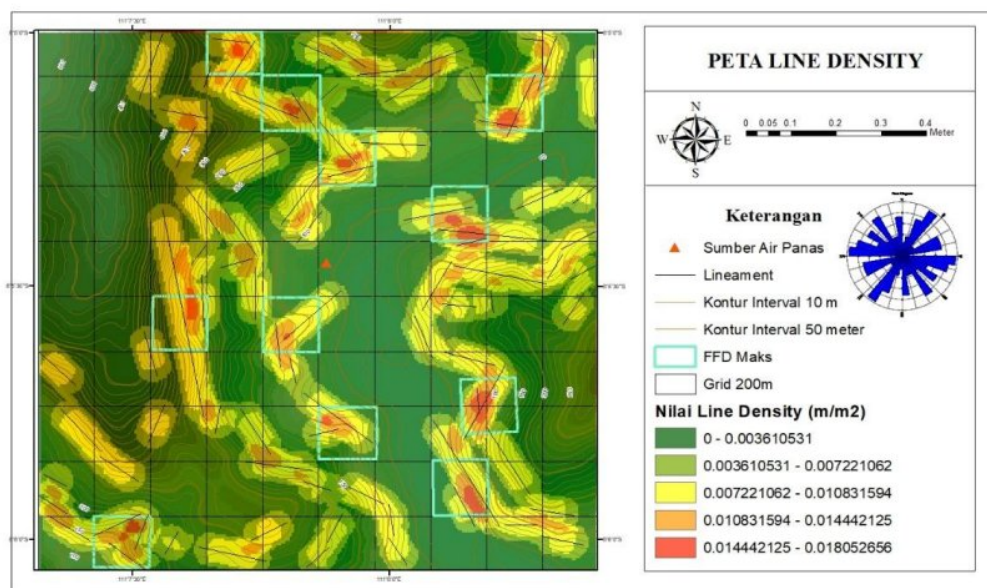
## **4.5 Analisis Zona Permeabel dan Potensi Panas Bumi**

### **4.5.1 Penentuan Karakteristik Zona Permeabel Daerah Penelitian**

Zona permeabel adalah bagian bawah tanah dengan banyak pori dan retakan, yang memfasilitasi pergerakan fluida panas bumi (baik air panas maupun uap) dengan lancar. Keberadaan zona ini sangat krusial dalam sistem panas bumi, karena

berfungsi sebagai jalan utama bagi fluida untuk berpindah dari reservoir menuju ke permukaan (Moeck, 2014).

Analisis Kerapatan Sesar dan Rekahan (FFD) adalah salah satu cara yang sering dipakai untuk menemukan zona permeabel. FFD mengukur seberapa rapat sesar dan rekahan di suatu area, yang datanya diperoleh dari gambar satelit, DEM, serta survei geologi. Area dengan nilai FFD tinggi menandakan banyaknya sesar dan rekahan, yang biasanya menandakan permeabilitas yang tinggi.

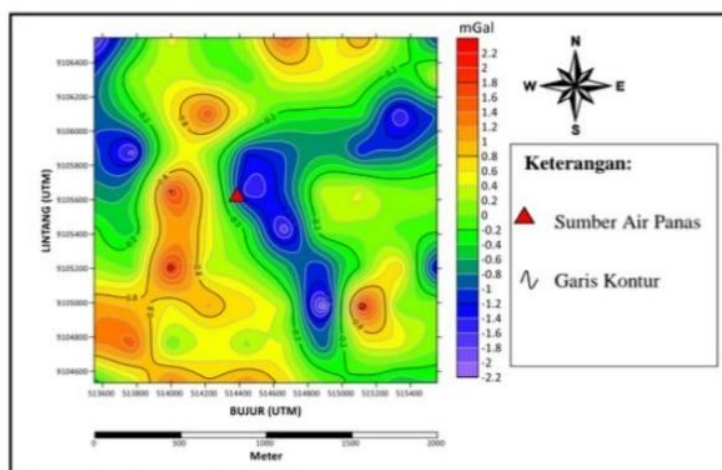


Gambar 4. 8 Peta Line Density Zona Permeabilitas

Dengan melihat hasil kajian *Fault Fracture Density* (FFD) yang tergambar dalam peta *Line Density*, kita bisa mengenali zona yang mudah dilalui air atau fluida berdasarkan seberapa rapat garis-garis atau patahan di suatu area. Warna merah dan oranye di peta menunjukkan nilai FFD paling tinggi, yang artinya banyak sesar dan rekahan. Ini sangat penting karena area dengan garis-garis yang rapat biasanya memiliki batuan yang mudah dilalui air, jadi fluida panas bumi bisa bergerak lebih lancar dan efisien lewat jalur-jalur patahan tersebut. Zona yang mudah ditembus air ini akan jadi jalan utama untuk fluida hidrotermal dari dalam bumi naik ke



permukaan, sehingga menjadi petunjuk kuat jika di area itu ada potensi panas bumi. Sebaliknya, area dengan warna kuning dan hijau menunjukkan nilai FFD yang sedang sampai rendah, yang berarti rekahan tidak terlalu banyak dan air sukar lewat, sehingga potensi sebagai zona yang mudah ditembus air juga berkurang.



Gambar 4. 9 Peta Gravity Wilayah Penelitian

Peta kepadatan lineamen dan peta anomali magnetik dari lokasi penelitian yang sama di sekitar manifestasi geotermal (sumber mata air panas) menunjukkan korelasi yang kuat antara keberadaan struktur geologis dan proses hidrotermal yang disebutkan. Pada Peta Kepadatan Lineamen, mata air panas secara jelas terkait dengan area zona kepadatan lineamen tinggi (ditandai dengan warna kuning hingga merah), menunjukkan adanya banyak retakan atau patahan yang mungkin berfungsi sebagai saluran permeabel untuk fluida. Sesuai dengan hal ini, Peta Anomali Magnetik menunjukkan anomali magnetik negatif yang mencolok (ditandai dengan warna biru) di lokasi yang sama, menunjukkan adanya proses alterasi hidrotermal yang intensif di mana mineral magnetik dalam batuan sekitar telah diubah menjadi non-magnetik oleh fluida panas.

Dengan demikian, integrasi kedua dataset ini mengonfirmasi bahwa sistem geotermal di lokasi ini secara struktural dikendalikan oleh garis-garis yang

memfasilitasi sirkulasi fluida panas, yang pada gilirannya menyebabkan perubahan komposisi mineral batuan yang terdeteksi sebagai anomali magnetik negatif.

Fenomena panas bumi di permukaan, seperti sumber air panas yang ditandai dengan segitiga merah di peta, seringkali ditemukan dekat dengan zona FFD tinggi, memperkuat dugaan bahwa ada hubungan antara struktur geologi yang rapat dan keberadaan zona yang mudah ditembus air.

Selain itu, area yang bertanda kotak biru muda di peta menandakan lokasi dengan nilai FFD tertinggi, yang jadi incaran utama untuk eksplorasi panas bumi karena karakternya sangat mendukung pergerakan fluida panas bumi. Jadi, peta kepadatan garis FFD ini memberikan gambaran yang jelas tentang ciri-ciri zona yang mudah ditembus air di area penelitian, yaitu area dengan garis-garis yang rapat sehingga bisa jadi jalur fluida panas bumi dan berpotensi jadi lokasi reservoir panas bumi.

Zona permeabel di daerah penelitian memiliki karakter yang unik yang diatur secara ketat oleh struktur geologi, lebih tepatnya oleh sesar dan rekahan yang rapat. Berdasarkan analisis Fault and Fracture Density (FFD) pada data SRTM dan data lapangan, zona permeabel umumnya terdapat pada daerah dengan kerapatan sesar yang tinggi yang membentang mengikuti tren struktur regional, yaitu sesar dan rekahan yang aktif.

Zona ini memungkinkan terbentuknya jalur fluida yang baik dari batuan fluida panas yang melaluinya air tanah dan fluida hidrotermal dapat mengalir dari reservoir ke permukaan, membentuk ekspresi manifestasi panas bumi seperti mata air panas, fumarol, dan kolam lumpur. Zona permeabel ini biasanya berasosiasi dengan batuan yang retak dan memiliki permeabilitas tinggi dan merupakan saluran utama untuk sirkulasi fluida dari batuan fluida panas pada sistem hidrotermal.

Secara umum, karakteristik zona permeabel pada reservoir panas bumi di daerah penelitian sebanding dengan karakteristik zona permeabel pada reservoir panas bumi lainnya di Indonesia dan di seluruh dunia. Secara umum, zona permeabel dibentuk oleh struktur geologi seperti patahan dan rekahan yang menciptakan saluran untuk aliran fluida panas dari reservoir ke permukaan. Zona ini biasanya didasari oleh keberadaan batuan yang sangat berpori dan permeabel, dan umumnya dihubungkan dengan manifestasi permukaan dari aktivitas panas bumi. Selain itu, zona permeabel juga umumnya terletak di daerah dengan aktivitas tektonik yang relatif tinggi, yang mengakibatkan terciptanya rekahan baru atau pelebaran rekahan yang sudah ada sehingga membuat batuan menjadi lebih permeabel (Hochstein & Browne, 2000).

Keunikan spesifik dari lapangan penelitian dalam hal ini adalah kecenderungan linieritas densitas berdasarkan struktur regional dengan orientasi tertentu (misalnya, barat laut-tenggara atau utara-selatan), yang merupakan indikator keterlibatan tektonik lokal dalam pembentukan zona permeabel. Selain itu, manifestasi aktivitas panas bumi di wilayah tersebut, seperti fumarol bersuhu sedang dan mata air panas, juga menjadi saksi sistem hidrotermal yang aktif dan zona permeabel yang efisien sebagai saluran fluida panas. Hal ini mengimplikasikan bahwa zona berpori yang diteliti tidak hanya sebagai jalur fluida, tetapi juga merupakan bagian dari sistem panas bumi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi.

Dengan demikian, karakter zona permeabel di daerah penelitian cukup sebanding dengan karakter umum zona permeabel pada sistem panas bumi, yaitu densitas rekahan yang tinggi, berasosiasi dengan manifestasi panas bumi, dan adanya batuan dengan permeabilitas tinggi yang terinduksi secara tektonik. Hal ini

menjadi bukti pentingnya identifikasi zona permeabel sebagai langkah awal dan penting dalam eksplorasi dan pengembangan panas bumi.

#### **4.5.2 Potensi Pengembangan Panas Bumi**

Plot densitas yang ditampilkan di bawah ini menunjukkan bahwa potensi pengembangan panas bumi di area studi sangat menjanjikan, terutama di area dengan nilai Fault and Fracture Density (FFD) yang tinggi. Daerah yang berwarna merah dan oranye pada peta memiliki nilai FFD yang berkisar antara 0.014442125 hingga 0.018052656 m/m<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan kepadatan sesar dan rekahan yang sangat tinggi yang berkontribusi langsung terhadap peningkatan permeabilitas formasi geologi. Tingkat permeabilitas yang tinggi merupakan karakter dasar dari sistem panas bumi, yang memungkinkan pergerakan bebas cairan hidrotermal dari reservoir panas bumi ke permukaan, sehingga meningkatkan potensi energi panas bumi.

Daerah dengan nilai FFD yang tinggi, yang ditunjukkan dengan warna biru pucat pada peta, merupakan daerah target untuk pengembangan sumber daya panas bumi. Keberadaan sumber fluida panas yang secara spasial berhubungan dengan area dengan FFD tinggi mendukung indikasi adanya sistem geologi yang aktif di dalam bumi. Tanda-tanda ini menunjukkan bahwa solusi dari rekahan dan patahan di wilayah tersebut berfungsi sebagai saluran untuk pergerakan fluida panas bumi, yang merupakan bagian dari kondisi pertama yang sangat menguntungkan untuk pengembangan dan pemanfaatan panas bumi. Dibandingkan dengan evaluasi keseluruhan yang dilakukan di daerah panas bumi lainnya, nilai FFD yang diperoleh dari area studi investigasi saat ini berada dalam kisaran yang jauh lebih tinggi. Studi terdahulu yang dikutip oleh Moeck (2014) dan Cumming (2009) menunjukkan

bahwa daerah prospek panas bumi umumnya memiliki nilai FFD yang tinggi, seringkali melebihi rata-rata regional, dan secara khas disertai dengan ekspresi permukaan. Nilai FFD yang lebih besar dari  $0,01 \text{ m/m}^2$ , seperti yang ditemukan di daerah yang sedang diselidiki, dianggap berada dalam kisaran yang sangat prospektif untuk eksploitasi panas bumi. Area produksi utama dari beberapa lapangan panas bumi utama di Indonesia, termasuk lapangan Wayang Windu dan Lahendong, juga terletak di area yang memiliki jaringan rekahan dan sesar yang sangat terkonsentrasi, sesuai dengan nilai FFD yang dievaluasi dalam penyelidikan saat ini.

Oleh karena itu, berdasarkan konteks geologi dan hasil analisis FFD, area penyelidikan menunjukkan potensi yang sangat menjanjikan untuk pengembangan panas bumi. Area dengan nilai FFD yang tinggi harus menjadi target pada tahap eksplorasi selanjutnya, yang terdiri dari survei geofisika, pengeboran eksplorasi, dan penentuan kelayakan teknis. Selain itu, potensi tersebut juga diperkuat dengan adanya kemiripan dengan area panas bumi yang sudah produktif di lokasi yang berbeda, baik di Indonesia maupun di luar negeri, yang menunjukkan bahwa peluang pengembangan panas bumi di area studi sangat positif.

#### **4.6 Kajian Keislaman**

Mengelola dan memanfaatkan potensi panas bumi merupakan tugas manusia dalam mengelola sumber daya alam yang Allah berikan di permukaan bumi. Dalam Islam semua benda di dunia adalah amanah yang harus dimanfaatkan dengan bijak untuk keberlangsungan umat manusia dan generasi masa depan. Pemanfaatan energi panas bumi melalui analisis zona permeabel pada peta line density mencerminkan tanggung jawab manusia sebagai khalifah di bumi untuk mengelola sumber daya alam dengan tanggung jawab tanpa menyebabkan kerusakan lingkungan.

Pengembangan teknologi panas bumi dengan metode Fault and Fracture Density (FFD) berfungsi sebagai contoh aplikasi nilai-nilai Islam yang menginspirasi umatnya untuk berkelanjutan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi serta pengembangan potensi alam sesuai aturan etika dan prinsip keberlanjutan.

Al-Qur'an berisi banyak ayat yang menyoroti tugas penting untuk memanfaatkan bumi dan potensinya secara maksimal melalui praktik-praktik yang etis dan bertanggung jawab. Sebuah ayat relevan adalah firman Allah SWT yang terdapat dalam surat Fushshilat (41) Ayat 10:

{وَجَعَلَ فِيهَا رَوَاسِيَ مِنْ فَوْقِهَا وَبَارَكَ فِيهَا وَقَدَّرَ فِيهَا أَقْوَامًا فِي أَرْبَعَةِ أَيَّامٍ سَوَاءً لِّلسَّائِلِينَ}

Artinya: *"Dan Dia ciptakan padanya (bumi) gunung-gunung yang kokoh di atasnya. Lalu Dia melimpahkan berkah padanya dan Dia tentukan makanan-makanan (bagi penghuni)nya dalam empat masa, merata bagi yang memerlukannya."*

Manusia dipandu untuk menjelajahi bumi dan menggunakan potensi energinya termasuk energi panas bumi sebagai ekspresi rasa syukur atas berkah-berkah yang Allah berikan. Pemanfaatan sumber daya alam harus selalu mempertimbangkan pelestarian lingkungan sesuai dengan ajaran QS. Al-A'raf ayat 56:

\*إِصْلَاحِهَا بَعْدَ الْأَرْضِ فِي تَنْفُسِدُوا وَلَا\*

Artinya: *"Janganlah kamu menimbulkan kerusakan pada muka bumi sesudah Allah telah memperbaikinya".*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan hasil interpretasi pengolahan data dan pembahasan dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Analisis Struktur Permeabel: Metode FFD berhasil mengidentifikasi pola kelurusan dominan (NW-SE dan NE-SW) yang memiliki kerapatan tinggi (FFD 0.01444-0.01805 m/m<sup>2</sup>) dan berfungsi sebagai jalur utama (permeabel) bagi pergerakan fluida panas bumi di Pacitan.
2. Penentuan Zona Prospek: Pemetaan FFD tinggi secara spasial berasosiasi dengan lokasi manifestasi air panas, membuktikan metode ini efektif dalam memodelkan dan memprioritaskan zona permeabel yang layak dijadikan target eksplorasi panas bumi lanjutan.

#### **5.2. Saran**

Analisis FFD harus diintegrasikan dengan data geofisika lain, bersama dengan validasi lapangan untuk memastikan rekahan aktif. Penelitian juga harus melakukan analisis lebih detail per sub-area untuk melacak variasi domain struktur dan kemungkinan jalur fluida.



## DAFTAR PUSTAKA

- Arrofi, Daffa, Israa S. Abu-Mahfouz, Sinatrya Diko Prayudi. 2022. *Investigating high permeable zones in non-volcanic geothermal systems using lineament analysis and fault fracture density (FFD): northern Konawe Regency, Indonesia*. Research Geothermal Energy: Department of Geosciences, College of Petroleum Engineering and Geosciences, King Fahd University Petroleum and Minerals, Dhahran, Saudi Arabia
- Bermana, Ike. 2006. *Klasifikasi Pemetaan Geomorfologi Yang Dibakukan*. Bulletin of Scientific Contribution Volume 4 Nomer 2, Agustus 2006: 161-173
- Bujung, A.N. Cyrke, S. Alamte, M. Dicky, H. Febri, dan S. Adjat. 2011. *Identifikasi prospek panas bumi berdasarkan Fault and Fracture Density (FFD): Studi kasus Gunung Patuha, Jawa Barat*. Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi, Vol. 2 No. 1 April 2011: 67 – 75.
- ESRI. 2021. *ArcGIS Pro: Slope (Spatial Analyst)*. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/slope.htm>
- Fossen, H. 2016. *Structural Geology (2<sup>nd</sup> Edition)*. Wiley Blackwell
- Gani, Resyi A, Fitri Siti Sundari, Yuli Mulyawati. 2021. *Bumi dan Antariksa Kajian Konsep, Pengetahuan dan Fakta*. Yogyakarta: Penerbit Deepublish
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. 2018. *Digital image processing (4th ed.)*. Pearson
- Gudmundsson, A. 2011. *Rock Fractures in Geological Processes*. Cambridge University Press
- H. W. H. 1903. *Lineaments of the Atlantic Border Regions*. Geol. Soc. Am. Bull. 15 pp. 483-506
- Hadimuljono, M. Basuki, Paulus Kurniawan, Wartono Rahardjo. 2018. *Geothermal Economics Handbook In Indonesia*. Jakarta: Penerbit Andi
- Hamdi. 2016. *Energi Terbarukan*. Jakarta: Penerbit Kencana
- Isa, Muhammad. 2018. *Eksplorasi Energi Panas Bumi*. Aceh: Penerbit Syiah Kuala University Press
- Iswandi, U, Indang Dewata. 2020. *Pengelolaan Sumber Daya Alam*. Yogyakarta: Penerbit Deepublish
- Jain, A. K. 1989. *Fundamentals of digital image processing*. Prentice Hall
- Kausar, A Al. 2018. *Rock Geochemistry Related to Mineralization Processes in Geothermal Areas*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 118 012071
- Koike, K., Ichikawa, M., Ohmi, M., & Snyder, W. S. 1995. *Lineament analysis of satellite images using a parallel processing system*. Computers & Geosciences, 21(1), 119-128.



- Lestari, Tri Eva, Nugroho Budi Wibowo, Denny Daemawan. 2016. *Interpretasi Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Panas Bumi Desa Karangrejo Kecamatan Arhosari, Pacitan Menggunakan Metode Geomagnet*. Jurnal Fisika Vol.5 No.1, Universitas Negeri Yogyakarta
- Manyoe, I N, R Hutagalung. 2022. *The Extraction and Analysis of Liniament Density From Digital Elevation Model (DEM) in Libungo Geothermal Area Gorontalo*. 4<sup>th</sup> IGEOS IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science
- Marr, D., & Hildreth, E. 1980. *Theory of edge detection. Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences*, 207(1167), 187–217
- Moeck, I.S. 2014. *Catalog of geothermal play types based on geologic controls*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 867–882.
- Nasruddin, Nurlina, Arif Rahman Nugroho. 2020. *Buku Ajar Geomorfologi (Konsep dan Implementasi)*. Universitas Lambung Mangkurat Banjarmasin: program studi geografi, fakultas Ilmu social dan Ilmu politik
- Noorollahi, Y., Itoi, R., Fujii, H., & Tanaka, T. 2007. *Geothermal resource exploration using remote sensing and GIS*. Geothermics, 36(4), 367–381.
- Nugroho, U.C dan Susanto. 2015. *Ekstraksi Kelurusan (Lineament) Secara Otomatis Menggunakan Data DEM SRTM Studi Kasus: Pulau Bangka*. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XX. 775-780
- O’Leary, D. W., Friedman, J. D dan Pohn, H. A. *Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms*, *Geological Society America Bulletin*. Vol.87, 1463-1469.
- O. D.W and F. J.D. 1978. *Towards a Workable Lineament Symbology*. Proceedings of the Third International Conference on the New Basement Tectonics, Basement Tectonics Committee Publication #3 pp. 29-31
- Pollard, D.D. & Fletcher, R.C. 2005. *Fundamentals of Structural Geology*. Cambridge University Press
- Ramadhan, Aji, Rizal Tawakal, Fajar Rizki Widiatmoko, Oktoberiman. 2015. *Identification of Geothermal Potential Based on Fault Fracture Density (FFD), Geological Mapping and Geochemical Analysis, Case Study : Bantarkawung, Brebes, Central Java*. Conference Paper Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
- Santoso, D. 2004. *Catatan Kuliah Eksplorasi Energi Geothermal*. Bandung: Penerbit ITB
- Sidik, M., & Harmoko, U. 2022. *Potensi Energi Panas Bumi di Jawa Timur Sebagai Energi Alternatif Pengganti Energi Fossil*. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*. 3(1), 49-60. <https://doi.org/10.14710/jekk.v%vi%i.13395>
- Silverman, B. 1986. *Destiny Estimation for Statistics and Data Analysis*. New York: Chapman and Hall

- Soengkono, S. 1999. Analysis of Digital Topographic Data for Exploration and Assesment of Geothermal System. Geothermal Institute, University of Auckland
- Soeparman, Sudjito. 2015. *Teknologi Tenaga Surya: Pemanfaatan dalam Bentuk Energi Panas*. Malang: Universitas Brawijaya Press
- Sumotarto, U, F. Hendrasto, M. Meirawati, I. Azzam. 2020. *Geology of Ajosari Geothermal Area, Pacitan, East Java*. AIP Conference Proc. <https://doi.org/10.1063/5.0007201>
- Tiren, S. 2010. *Swedish Radiation Safety Authority Report No. 2010:33-Liniament Interpretation Short Review and Methodology*. Online
- Twiss, R.J. & Moores, E.M. 2007. *Structural Geology (2<sup>nd</sup> Edition)*. W.H. Freeman
- Wibowo, Hendro H dan Suryantini. 2010. *Application of Fault and Fracture Density (FFD) Method for Geothermal Exploration in Non-Volcanic Geothermal System; a Case Study in Sulawesi-Indonesia*. Proceedings World Geothermal Congress 2010
- Wijayanti, Murwarni Dewi. 2023. *Energi Panas Bumi*. Jakarta Timur: Penerbit Bumi Aksara
- Wijayanto, Wahyudi. 2022. *Geografi: Mengenal Batuan*. Surabaya: CV Media Edukasi Creative
- William, R.S.J dan Marsh, S.E. 1983. *Geological Applications*. American Society Photogrammetry. 2(1): 1667-1669
- Zuhdi, Muhammad. 2019. *Buku Ajar Pengantar Geologi*. Lombok NTB: Penerbit Duta Pustaka Ilmu

## LAMPIRAN

Lampiran 1.1 Data *Liniament Extraction*

X1	Y1	X2	Y2	Bearing	Length	Midpoint-X	Midpoint-Y
XY_UTM_METERS	XY UTM METERS	XY UTM METERS	XY UTM METERS		LINEAR METERS	XY UTM METERS	XY UTM METERS
514,009.27	9,104,617.02	514,248.90	9,104,567.44	246	245.60	1,356,331.53	9,733,808.71
513,687.00	9,104,633.55	513,819.21	9,104,534.39	271	165.80	1,356,221.29	9,733,445.64
514,686.86	9,104,650.08	514,752.96	9,104,550.92	291	119.60	1,356,509.29	9,734,377.78
515,232.23	9,104,658.34	515,380.97	9,104,625.29	247	152.90	1,356,654.06	9,734,953.27
513,934.90	9,104,674.87	513,885.32	9,104,592.23	355	96.70	1,356,223.10	9,733,611.75
515,100.02	9,104,699.66	515,215.70	9,104,699.66	234	116.10	1,356,551.86	9,734,828.84
514,323.27	9,104,707.92	514,191.06	9,104,641.81	28	148.30	1,356,292.56	9,733,957.48
513,472.16	9,104,732.71	513,620.90	9,104,641.81	266	174.90	1,356,057.33	9,733,280.04
514,521.59	9,104,740.97	514,463.75	9,104,633.55	353	122.40	1,356,354.69	9,734,187.17
513,827.48	9,104,740.97	513,777.90	9,104,608.76	345	141.70	1,356,149.72	9,733,521.74
513,802.69	9,104,740.97	513,629.16	9,104,658.34	29	192.90	1,356,098.68	9,733,446.35
515,190.91	9,104,757.50	515,347.92	9,104,732.71	243	159.50	1,356,543.34	9,734,950.08
514,686.86	9,104,774.03	514,703.38	9,104,658.34	316	117.30	1,356,390.59	9,734,390.36
513,439.10	9,104,807.08	513,538.26	9,104,740.97	268	119.60	1,355,955.96	9,733,251.85
514,918.23	9,104,840.13	514,992.60	9,104,691.39	298	166.90	1,356,424.85	9,734,655.51
514,521.59	9,104,848.40	514,670.33	9,104,774.03	261	166.90	1,356,268.31	9,734,325.16
514,381.12	9,104,856.66	514,480.27	9,104,823.61	253	104.90	1,356,188.64	9,734,175.80
513,455.63	9,104,881.45	513,538.26	9,104,840.13	261	92.70	1,355,875.37	9,733,287.04
514,166.27	9,104,931.03	514,414.17	9,104,897.97	242	251.00	1,356,073.19	9,734,064.49

X1	Y1	X2	Y2	Bearing	Length	Midpoint-X	Midpoint-Y
XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS		LINEAR METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS
513,653.95	9,104,947.55	513,794.42	9,104,856.66	267	167.90	1,355,907.18	9,733,517.90
514,505.06	9,105,046.71	514,397.64	9,105,021.92	41	110.60	1,356,008.96	9,734,256.63
515,033.91	9,105,054.98	515,190.91	9,104,807.08	292	294.50	1,356,315.74	9,734,857.98
514,843.86	9,105,079.77	515,083.49	9,104,691.39	293	458.00	1,356,312.57	9,734,701.09
514,158.01	9,105,121.08	514,265.43	9,104,955.82	291	197.80	1,355,929.68	9,734,028.18
513,513.47	9,105,121.08	513,662.21	9,104,964.08	281	217.00	1,355,729.65	9,733,431.33
514,083.64	9,105,129.35	514,067.11	9,105,030.19	334	100.90	1,355,847.22	9,733,910.44
513,885.32	9,105,137.61	513,827.48	9,104,997.13	347	152.50	1,355,790.28	9,733,696.60
514,381.12	9,105,178.93	514,629.01	9,104,997.13	271	308.50	1,355,974.34	9,734,325.01
515,000.86	9,105,195.45	515,009.12	9,105,104.56	319	91.60	1,356,072.03	9,734,823.80
515,100.02	9,105,278.08	514,951.28	9,105,005.40	353	311.70	1,356,086.45	9,734,841.01
514,331.54	9,105,302.87	514,356.33	9,105,211.98	309	94.50	1,355,761.29	9,734,223.76
514,885.17	9,105,327.66	515,066.96	9,105,278.08	250	189.10	1,355,916.38	9,734,844.11
513,439.10	9,105,327.66	513,571.32	9,105,203.72	277	181.90	1,355,489.77	9,733,422.22
513,810.95	9,105,402.03	513,860.53	9,105,236.77	308	173.10	1,355,542.15	9,733,756.00
514,281.96	9,105,435.09	514,298.48	9,105,269.82	319	166.70	1,355,653.30	9,734,202.12
514,777.75	9,105,459.88	514,843.86	9,105,302.87	301	170.90	1,355,789.17	9,734,710.33
514,876.91	9,105,501.19	515,000.86	9,105,492.93	238	124.70	1,355,718.51	9,734,869.49
515,380.97	9,105,542.51	515,306.60	9,105,426.82	357	138.00	1,355,857.64	9,735,253.80
515,050.44	9,105,550.77	515,058.70	9,105,468.14	319	83.30	1,355,742.98	9,734,984.30
514,513.33	9,105,550.77	514,306.75	9,105,368.98	13	276.10	1,355,587.96	9,734,350.76
514,017.53	9,105,608.61	514,025.80	9,105,418.56	322	190.90	1,355,414.41	9,733,995.28
514,207.59	9,105,633.40	514,207.59	9,105,443.35	324	190.70	1,355,449.07	9,734,181.33

X1	Y1	X2	Y2	Bearing	Length	Midpoint-X	Midpoint-Y
XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS		LINEAR METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS
515,422.28	9,105,641.67	515,331.39	9,105,592.09	26	103.90	1,355,741.26	9,735,327.04
514,918.23	9,105,641.67	515,248.76	9,105,575.56	246	338.30	1,355,657.00	9,735,043.19
514,909.96	9,105,658.19	514,802.54	9,105,476.40	355	211.90	1,355,625.20	9,734,812.33
514,199.32	9,105,666.46	514,083.64	9,105,633.40	38	120.70	1,355,321.35	9,734,153.01
515,306.60	9,105,682.98	515,248.76	9,105,592.09	357	108.10	1,355,690.30	9,735,238.46
514,034.06	9,105,716.04	513,976.22	9,105,641.67	2	94.50	1,355,250.77	9,734,031.38
515,033.91	9,105,740.83	514,926.49	9,105,716.04	41	110.60	1,355,509.66	9,734,981.81
515,422.28	9,105,765.62	515,298.34	9,105,699.51	26	141.00	1,355,625.15	9,735,347.54
514,860.38	9,105,773.88	515,248.76	9,105,732.56	240	391.90	1,355,509.27	9,735,060.90
514,447.22	9,105,839.99	514,356.33	9,105,724.30	2	147.60	1,355,276.39	9,734,444.12
514,100.16	9,105,848.25	514,215.85	9,105,674.72	291	209.30	1,355,219.59	9,734,203.91
513,877.06	9,105,848.25	514,025.80	9,105,088.03	313	777.30	1,355,435.91	9,733,913.66
514,984.33	9,105,856.51	514,736.44	9,105,806.93	43	253.70	1,355,372.98	9,734,899.39
515,306.60	9,105,922.62	515,141.33	9,105,848.25	30	181.90	1,355,435.74	9,735,264.86
515,422.28	9,105,930.88	515,339.65	9,105,864.78	16	106.20	1,355,473.20	9,735,419.29
513,959.69	9,105,930.88	514,083.64	9,105,757.35	289	214.00	1,355,097.51	9,734,099.16
514,455.48	9,105,996.99	514,298.48	9,105,790.41	1	260.40	1,355,161.65	9,734,455.41
514,629.01	9,106,005.25	514,463.75	9,105,963.93	40	170.90	1,355,127.73	9,734,646.38
514,315.01	9,106,063.09	514,083.64	9,105,963.93	31	252.60	1,354,990.94	9,734,322.73
514,587.70	9,106,087.88	514,819.07	9,106,079.62	236	232.30	1,355,082.01	9,734,828.07
513,992.74	9,106,145.73	513,926.64	9,105,996.99	348	163.30	1,354,860.17	9,734,111.16
514,438.96	9,106,162.25	514,571.17	9,106,013.51	283	199.70	1,355,015.72	9,734,639.23
515,009.12	9,106,170.52	515,149.60	9,106,145.73	244	143.10	1,355,128.86	9,735,211.91

X1	Y1	X2	Y2	Bearing	Length	Midpoint-X	Midpoint-Y
XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS		LINEAR METERS	XY_UTM_METERS	XY_UTM_METERS
513,868.79	9,106,211.83	514,042.32	9,106,178.78	245	177.30	1,354,740.04	9,734,146.15
514,339.80	9,106,269.67	514,422.43	9,106,145.73	291	149.50	1,354,861.89	9,734,558.05
514,124.95	9,106,277.94	514,364.59	9,106,178.78	257	260.20	1,354,799.24	9,734,433.82
514,505.06	9,106,302.73	514,438.96	9,106,244.88	13	88.10	1,354,827.08	9,734,665.97
515,207.44	9,106,335.78	515,108.28	9,106,112.67	348	245.00	1,355,090.15	9,735,307.95
514,976.07	9,106,344.04	515,017.39	9,106,261.41	298	92.70	1,354,964.25	9,735,178.13
514,868.65	9,106,352.31	514,670.33	9,106,236.62	24	230.40	1,354,900.76	9,734,957.67
514,744.70	9,106,352.31	514,571.17	9,106,335.78	49	174.90	1,354,818.17	9,734,866.30
514,050.59	9,106,368.83	514,025.80	9,106,286.20	341	86.60	1,354,639.25	9,734,266.93
515,414.02	9,106,426.68	515,422.28	9,106,153.99	323	273.80	1,355,108.56	9,735,578.28
514,951.28	9,106,426.68	514,810.80	9,106,377.10	35	149.50	1,354,832.82	9,735,098.38
514,480.27	9,106,451.47	514,604.22	9,106,360.57	271	154.20	1,354,722.39	9,734,774.86
514,364.59	9,106,451.47	514,480.27	9,106,401.89	257	126.30	1,354,664.93	9,734,666.48
514,207.59	9,106,459.73	514,100.16	9,106,286.20	356	204.80	1,354,632.03	9,734,392.12
515,157.86	9,106,467.99	515,240.49	9,106,459.73	240	83.30	1,354,873.38	9,735,422.87
514,058.85	9,106,467.99	514,191.06	9,106,451.47	241	133.70	1,354,539.76	9,734,391.66
515,281.81	9,106,476.26	515,215.70	9,106,277.94	343	209.80	1,354,972.14	9,735,443.14
513,877.06	9,106,484.52	513,794.42	9,106,244.88	343	254.40	1,354,539.97	9,734,084.52





### JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

#### IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 19640057  
Nama : NUR HASANAH  
Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI  
Jurusan : FISIKA  
Dosen Pembimbing 1 : AHMAD LUTHFIN, M.Si  
Dosen Pembimbing 2 : FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD, M.Si  
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : ANALISIS ZONA PERMEABEL DI WILAYAH PANAS BUMI PACITAN BERDASARKAN DATA PENGINDRAAN JAUH MENGGUNAKAN METODE FFD (FAULT FRACTURE DENSITY) (STUDI KASUS: SUMBER AIR PANAS DESA KARANGREJO, KECAMATAN ARJOSARI, KABUPATEN PACITAN, JAWA TIMUR)

#### IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	24 Juli 2023	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi topik dan judul	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
2	28 September 2023	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi bab I dan II	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
3	27 November 2023	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi Bab I dan II	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
4	08 Mei 2024	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi revisi laporan bab III	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
5	05 Agustus 2024	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi Bab I, II, dan III	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
6	04 Oktober 2024	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi pengolahan data bab IV	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
7	11 Desember 2024	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi pengolahan data bab IV	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
8	24 Februari 2025	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi
9	10 Maret 2025	AHMAD LUTHFIN, M.Si	Konsultasi bab IV	Genap 2024/2025	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui  
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

  
FIKRIYATUL AZIZAH SU'UD, M.Si

Malang, 4 Juni 2025

Dosen Pembimbing 1

  
AHMAD LUTHFIN, M.Si

