

**ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN FLUIDA  
HIDROTERMAL BERDASARKAN MODEL 2D HASIL  
SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY  
RATAI**

**(Laporan Skripsi)**

**Oleh**

**RYAS HARY PRIHANTORO  
NPM. 1715051034**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

**ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN FLUIDA  
HIDROTERMAL BERDASARKAN MODEL 2D HASIL  
SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY  
RATAI**

**Oleh  
RYAS HARY PRIHANTORO**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
SARJANA TEKNIK**

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2022**

## **ABSTRAK**

### **ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL BERDASARKAN MODEL 2D HASIL SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI**

**Oleh**

**RYAS HARY PRIHANTORO**

Kegiatan eksplorasi panas bumi di Way Ratai pada saat ini masih dalam status eksplorasi, khususnya untuk memastikan keberadaan zona reservoir panas bumi yang potensial pada area ini. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan data pendukung untuk penentuan model konseptual panas bumi di Way Ratai. Tujuan dari penelitian ini adalah mensimulasikan model numerik pola sebaran permeabilitas dan zona potensi reservoir, menganalisis model permeabilitas pada laju aliran fluida hidrotermal, dan menentukan lokasi potensi sumur eksplorasi (*well targeting*) di lapangan panas bumi Way Ratai.

Penelitian ini dilakukan dalam dua tahapan, tahapan yang pertama dilakukan pengukuran permeabilitas relatif langsung di lapangan dan pengujian permeabilitas absolut di laboratorium pada beberapa sampel batuan yang diambil di lapangan. Selanjutnya dibangun model permeabilitas menggunakan simulasi numerik berdasarkan algoritma Newton - Raphson pada software Hydroterm Interactive 2D. Hasil simulasi menunjukkan adanya area impermeabel yang sangat tebal di bawah Gunung Ratai, berkisar antara 800 – 2000m bahkan bisa lebih dari itu. Hasil ini diinterpretasikan sebagai batuan penutup atau cap rock yang sangat tebal, sehingga menyebabkan belum ditemukannya manifestasi berupa fumarola maupun solfatara di area panas bumi Way Ratai pada saat ini.

Kata kunci : *geothermal*, permeabilitas, way ratai, simulasi numerik, *software* hydroterm interactive 2D

## **ABSTRACT**

### ***PERMEABILITY ANALYSIS OF HIDROTHERMAL FLUID FLOW WITH INTERACTIVE HYDROTHERM MODELING IN WAY RATAI, LAMPUNG***

**By**

**RYAS HARY PRIHANTORO**

*Geothermal exploration activities in Way Ratai are currently still in exploration status, specifically to ensure the existence of a potential geothermal resource/reservoir zone. Therefore, this research is fundamental to be carried out to provide and increase data support related to the determination of the hydrothermal fluid permeability model for the potential of geothermal energy reserves in Way Ratai. The purpose of this study is to measure the permeability of surface rocks and analyze the permeability model in hydrothermal fluid flow, eventually to determine the location of potential well targeting in the Way Ratai geothermal field.*

*This activity is carried out in two stages, first is the measurement of relative permeability directly in the field and absolute permeability testing in the laboratory on several rock samples taken in the field. Furthermore, a permeability model was built using a numerical simulation based on the Newton-Raphson algorithm on hydrotherm software. The simulation results show that there is a very thick impermeable area under Mount Ratai, ranging from 800 – 2000m or even more. This result is interpreted as a very thick cover rock or cap rock, thus causing no manifestations of fumarola or solfatara to be found in the Way Ratai geothermal area at this time.*

**Keywords :** *geothermal, permeability, way ratai, numeric modeling, software hydroterm interactive 2D*

Judul Skripsi : **ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN  
FLUIDA HIDROTERMAL  
BERDASARKAN MODEL 2D HASIL  
SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN  
PANAS BUMI WAY RATAI**

Nama Mahasiswa : Ryas Hary Prihantoro

Nomor Pokok Mahasiswa : 1715051034

Program Studi : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik

Pembimbing 1

**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP. 19691230 199802 1001

Pembimbing 2

**I Gede Boy Darmawan. S.Si., M.Eng.**  
NIP. 19880505 201903 1019

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP. 19691230 199802 1001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

Ketua : Karyanto, S.Si., M.T.

Sekretaris : I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.

Anggota : Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T.

**2. Dekan Fakultas Teknik**



**Prof. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**

**NIP. 197509282001121002**

Tanggal Ujian Skripsi : 27 Juli 2022

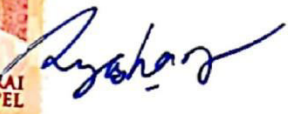
## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar lampung, 1 Agustus 2022



  
Ryas Hary Prihantoro  
NPM. 1715051034

## RIWAYAT HIDUP



Ryas Hary Prihantoro (lahir 3 Juli 1999) adalah seorang pembelajar asal Tangerang. Ia menamatkan pendidikan tinggi dari Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung pada tahun 2022. Skripsinya ditulis dengan judul **“ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN FLUIDA HIDROTHERMAL BERDASARKAN MODEL 2D HASIL SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI”**. Pada tahun 2017, ia lulus dari Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 95 Jakarta. Pada tahun 2014, penulis juga lulus dari Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 205 Jakarta, dan pada 2011 penulis lulus dari Sekolah Dasar Negeri (SDN) 10 Jakarta Barat.

Selama masa kuliah, penulis aktif dalam kegiatan organisasi intra-kampus maupun eks-kampus. Pada tahun 2020 menjadi Kepala Divisi *Funding and Grants* AAPG SC Universitas Lampung. Pada tahun 2019-2021 menjadi anggota di bidang Sains dan Teknologi Himpunan Mahasiswa (HIMA) TG BHUWANA. Pada tahun 2018 penulis juga mengambil bagian menjadi Staff Divisi Pengembangan Sains. Pada tahun 2017-2020 mengikuti program Rumah Kepemimpinan dan Tahfidz Yayasan Daarul Hikmah Bandar Lampung.

Pada semester enam, penulis melakukan penelitian Kerja Praktik di Lapangan Panas bumi Way Ratai, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung dengan judul **“AKUISISI DAN PERHITUNGAN DATA PERMEABILITAS DAN KADAR AIR TANAH DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG DENGAN METODE FALLING-HEAD”** Pada akhir masa studi, penulis banyak melakukan penelitian yang berkaitan dengan panas bumi, *geothermal system*, dan *sustainable green energy*.



## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur Allah Azza wa Jalla dan Shalawat kepada Rasulullah Muhammad Salallahu Alaihi wa Sallam, skripsi ini dipersembahkan kepada:

**Ayahanda Hamim Thohari**

**Ibunda Suprapti Rahayu**

**Mas Ryan, Mas Rio, Mas Wanda**

**Mba Yuliza, Mba Dewi**

**Nadiem, Mazaya, Mikha, Zhafran**

**Teknik Geofisika Unila 2017**

**Umat Manusia**

## MOTTO HIDUP

“Manusia yang **paling baik**, adalah manusia **yang berguna** untuk manusia lainnya”

“Barang siapa yang menjadikan mudah urusan orang lain, **pasti Allah akan memudahkannya di dunia dan di akhirat**. Barang siapa yang menutupi aib seorang muslim, pasti Allah akan menutupi aibnya di dunia dan di akhirat. Allah senantiasa menolong hamba Nya selama hamba Nya itu suka menolong saudaranya”

“Seburuk-buruknya hidupmu, jangan tinggalkan **sholat 5 waktu**”

“Lebih baik selesaikan sesuatu walaupun itu gak **sempurna**. Daripada terobsesi sama kesempurnaan, tapi gak pernah **selesai ngerjain apapun**”

*“Life gets better when you **expect less**”*

Ryas Hary Prihantoro

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Azza wa Jalla, atas segala rahmat, hidayah, dan inayah-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat serta salam senantiasa selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad Salallahu Alaihi wa Sallam yang telah mengantarkan kita melewati masa jahiliyah sampai ke masa sekarang ini.

Skripsi ini mengangkat judul “ANALISIS PERMEABILITAS ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL BERDASARKAN MODEL 2D HASIL SIMULASI NUMERIK DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI”. Skripsi ini merupakan hasil dari Tugas Akhir yang penulis laksanakan di Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Skripsi ini tidak lepas dari kesalahan. Karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun dari pembaca untuk kemajuan kita bersama. Semoga skripsi ini dapat berguna dan dapat menunjang perkembangan ilmu pengetahuan serta dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan juga bagi pembaca pada umumnya.

Bandar lampung, 1 Agustus 2022  
Penulis,

**Ryas Hary Prihantoro**

## SANWACANA

Puji syukur penulis haturkan kepada Allah Azza wa Jalla. yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah serta karunia-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi ini berjudul “Analisis Permeabilitas Aliran Fluida Hidrotermal Berdasarkan Model 2D Hasil Simulasi Numerik di Lapangan Panas bumi Way Ratai”. Penulis berharap karya ini dapat bermanfaat di kemudian hari. Banyak pihak yang terlibat langsung dalam memberikan kontribusi ilmiah, spiritual, dan informasi baik secara langsung maupun tidak langsung hingga terbentuk skripsi ini. Pada kesempatan kali ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada :

1. Allah Azza wa Jalla Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan hidayah-Nya dan Shalawat kepada Rasullullah Muhammad Salallahu Alaihi wa Sallam, segala pertolongan dan kebaikan-Mu yang telah menuntun penulis untuk menjalani Tugas Akhir ini dengan yakin dan selalu berhusnudzon akan adanya rencana terbaik yang sudah Allah siapkan.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu menjadi kebanggaan hidup penulis Bapak Hamim Thohari dan Mama Suprpti Rahayu yang telah senantiasa mendoakan, memberi dukungan materi, moril, mencintai dan menyayangi dengan sepenuh hati dari kecil hingga dewasa.
3. Bapak Karyanto, S.Si. M.T. selaku pembimbing utama dan Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
4. Bapak I Gede Boy Darmawan. S.Si. M.Eng. selaku pembimbing kedua dan guru yang paling berjasa atas skripsi saya. Karena *humble* dan keluasan ilmu bapak skripsi saya dapat selesai.
5. Bapak Ir. Bagus Sapto Mulyatno, S.Si., M.T. selaku penguji dalam Tugas Akhir ini yang telah memberikan masukan, saran, serta kritiknya.
6. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati, dan Staff Tata Usaha penuh ucap terima kasih untuk segala bantuan yang diberikan.
7. Mas-mas ku Ryan Yudi Andila, S.AN., M.IP., Rio Hary Wibowo, S.S., dan Riwanda Hario Suwandi, S.S., yang menemani dan menjadi *role model* masa kecilku hingga saat ini
8. Mba-mba ku Yuliza Fitrianti, S.AN., M.IP., Dewi Retno Kemuning, S.S., yang selalu memberikan *insight* baru dan selalu memotivasi penulis

9. Ponakanku yang lucu Nadiem, Mazaya, Mikha, dan Affan yang selalu menghibur dan bahagia di masa kecilnya.
10. Kepada Lilis Trisnawati, S.Si. yang telah banyak membantu dalam perihal semangat, materi, dan juga banyak hal lainnya.
11. Kepada angkatanku Teknik Geofisika 2017 Dzaki (Jack), Ito, Bryan, Faiq, Fajri, Azhar, Fatur, Acep, Adief, Bagus (Yoyok), Rafi (Baong), Bima, Faiz, Gede, Guruh, Madi, Nico, Paulus, Rizky (Naibaho), Tajar, Dea, Varen, Fifah, Devita, Irehaz, Lisa, Aryka, Oca, Zelica, Tiwi, Ukhti, Mustika, Mesa, Rere, Felia, Risa, Alfina, Heni, Sukma, Tasya, Denisa, Danti, Azizah, Intan, Uli, Vivi, Mia, dan Alma.
12. Teman dan Asatidz PPM dan Masjid Daarul Hikmah Ust.Khumaidi, Basri, Ucan, Arik, Anhar, dan semuanya.
13. Kepada Bang Ai dan Mba Ani yang telah memberikan tempat tinggal sementara di Palapa 10 Blok H
14. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandar lampung, 1 Agustus 2022  
Penulis,

**Ryas Hary Prihantoro**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>PERSETUJUAN.....</b>	<b>iv</b>
<b>PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>PERNYATAAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>vii</b>
<b>PERSEMBAHAN.....</b>	<b>viii</b>
<b>MOTTO HIDUP .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>x</b>
<b>SANWACANA .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xiv</b>
<b>I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Batasan Penelitian .....	2
1.4 Manfaat Penelitian .....	2
<b>II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Daerah Penelitian .....	3
2.2 Geologi Regional Dan Stratigrafi .....	4
2.3 Tektonik Regional.....	5
2.4 Sistem Panas bumi Way Ratai .....	7
2.5 Geomorfologi .....	8

2.6 Struktur Sesar .....	9
<b>III TEORI DASAR .....</b>	<b>11</b>
3.1 Panas bumi .....	11
3.1.1 Sistem Panas bumi.....	11
3.1.2 Manifestasi Panas bumi .....	12
3.2 Permeabilitas .....	15
3.3 Persamaan Aliran Air Tanah.....	19
3.4 Persamaan Perpindahan Energi Panas .....	21
3.5 Persamaan Fungsi Permeabilitas.....	22
3.6 Solusi Persamaan Numerik .....	22
3.6.1 Algoritma Newton-Raphson .....	22
3.6.2 Solusi Persamaan Linier.....	24
<b>IV METODE PENELITIAN.....</b>	<b>24</b>
4.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	24
4.2 Alat dan Bahan .....	24
4.3 Jadwal Penelitian .....	24
4.4 Prosedur Penelitian .....	25
4.4.1 Permeabilitas Metode <i>Falling Head</i> .....	25
4.4.2 Pengolahan Data .....	26
4.5 Diagram Alir .....	29
<b>V HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>30</b>
5.1 Hasil Penelitian.....	30
5.1.1 Karakteristik Batuan .....	30
5.1.2 Akuisisi dan Pengukuran Permeabilitas .....	31
5.1.3 Simulasi Hydroterm Interactive 2D .....	33
5.2 Pembahasan .....	34
5.2.1 Lintasan Berarah Barat Daya – Timur Laut ( <i>Line 1</i> ).....	34
5.2.2 Lintasan Berarah Barat Laut – Tenggara ( <i>Line 2</i> ) .....	41
5.2.3 Model <i>Dummy Well</i> .....	46
<b>VI KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>49</b>
6.1 Kesimpulan.....	49
6.2 Saran .....	49
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>50</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta Letak dan Lokasi Penelitian .....	3
2. Peta Geologi Regional Way Ratai.....	4
3. Konfigurasi Tektonik Secara Makro di Indonesia (Katili, 1973) .....	6
4. Peta Struktur Geologi Regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021) .....	9
5. Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2013).....	12
6. Permeabilitas .....	15
7. Ilustrasi model reservoir panas bumi sistem konveksi vulkanis (a) dan model sumur eksplorasi yang menyebabkan fluida hidrotermal mengalir dari reservoir (b) (Gudjonsdottir dkk., 2015). .....	17
8. Diagram Alir Penelitian .....	29
9. Peta Letak dan Lokasi Penelitian .....	31
10. Proses Pengukuran Permeabilitas di Laboratorium .....	32
11. Sebaran Permeabilitas Area Pengukuran .....	33
12. Peta Daerah Penelitian .....	34
13. Profil Sayatan Line 1 Geologi dan Parameter Input pada Model Simulasi Numerik Way Ratai .....	35



14. Pola Model Perpindahan Panas Line 1 Hasil Simulasi Numerik untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.000.....	37
15. Model Aliran Massa Fluida Air Line 1 Hasil Simulasi Numerik Untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.000.....	38
16. Model Aliran Massa Fluida Uap Line 1 Hasil Simulasi Numerik Untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.00.....	40
17. Profil Sayatan Line 2 Geologi dan Parameter Input pada Model Simulasi Numerik Way Ratai .....	39
18. Pola Model Perpindahan Panas Line 2 Hasil Simulasi Numerik untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.000.....	42
19. Model Aliran Massa Fluida Air Line 2 Hasil Simulasi Numerik Untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.000.....	43
20. Model Aliran Massa Fluida Uap Line 2 Hasil Simulasi Numerik Untuk Iterasi Tahun Ke 1.000 – 50.000.....	45
21. Profil Suhu dan Tekanan Lintasan-1 .....	46
22. Profil Suhu dan Tekanan Lintasan-2.....	47

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Jadwal Penelitian Tugas Akhir .....	25
2. Hasil Karakteristik Batuan Penelitian .....	30
3. Hasil Pengukuran Permeabilitas .....	32

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Lapangan energi panas bumi atau *geothermal* merupakan suatu energi alternatif yang bersifat *renewable* (dapat diperbaharui), yang bersumber dari aktivitas tektonik di dalam bumi. Sumber energi panas bumi di Indonesia tersebar hampir di seluruh wilayah Indonesia. Provinsi Lampung sendiri memiliki potensi panas bumi yang cukup tinggi yang tersebar di beberapa daerah, salah satunya berada di daerah Way Ratai yang masih dalam status eksplorasi. Keberadaan sesar menjadi kontrol dalam siklus hidrologi pada daerah panas bumi. Dalam mengidentifikasi sesar dan pengontrol sistem panas bumi yang lain dari suatu lokasi diperlukan metode geofisika yang relevan untuk menggambarkan sistem yang mengontrol panas bumi. Potensi ini terkait dengan kondisi geologi Indonesia yang merupakan daerah subduksi dan gunungapi (Haerudin dkk., 2017).

Analisis permeabilitas aliran fluida hidrotermal lapangan panas bumi Way Ratai bertujuan untuk mengetahui distribusi temperatur. Metode yang dapat digunakan yaitu dengan pemodelan *steady state*, metode ini merupakan salah satu cara untuk mengetahui kinerja sistem aliran fluida hidrotermal dengan menggunakan simulator komputer (*software*). Metode ini melibatkan parameter fisika seperti densitas, permeabilitas, *heat capacity*, temperatur permukaan, dan porositas. Peramalan perilaku (kinerja) sistem aliran fluida hidrotermal dengan berbagai alternatif digunakan sebagai dasar dalam menentukan kebijaksanaan strategi pengembangan lapangan kedepannya.

Belum meningkatnya status tahapan eksplorasi di Way Ratai diakibatkan oleh salah satunya belum adanya sumur uji atau sumur eksplorasi. Salah satu tahapan dalam kegiatan eksplorasi ini adalah menentukan lokasi potensi untuk

menempatkan sumur eksplorasi/uji yang ada di lapangan panas bumi (Kristensen dkk., 2016).

## 1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah :

1. Mensimulasikan model numerik pola sebaran permeabilitas dan zona potensi reservoir di lapangan panas bumi Way Ratai.
2. Menganalisis model permeabilitas pada laju aliran fluida hidrotermal di lapangan panas bumi Way Ratai.
3. Menentukan lokasi potensi sumur eksplorasi (*well targeting*) di lapangan panas bumi Way Ratai.

## 1.3 Batasan Penelitian

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah pengukuran permeabilitas dilakukan dalam dua tahapan yaitu pengukuran permeabilitas relatif secara langsung di lapangan dan pengujian permeabilitas absolut di laboratorium. Serta membuat model dan menganalisis aliran fluida hidrotermal menggunakan *software* Hydrotherm Interactive 2D, pada lapangan panas bumi Way Ratai.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian tugas akhir ini adalah :

1. Mendapatkan model *steady state* 2D aliran fluida hidrotermal di lapangan panas bumi Way Ratai.
2. Mendapatkan lokasi potensi untuk dilakukan pengeboran sumur eksplorasi (*well targeting*) di lapangan panas bumi Way Ratai.
3. Data pendukung dalam pengembangan daerah panas bumi Way Ratai

## II. TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1 Daerah Penelitian

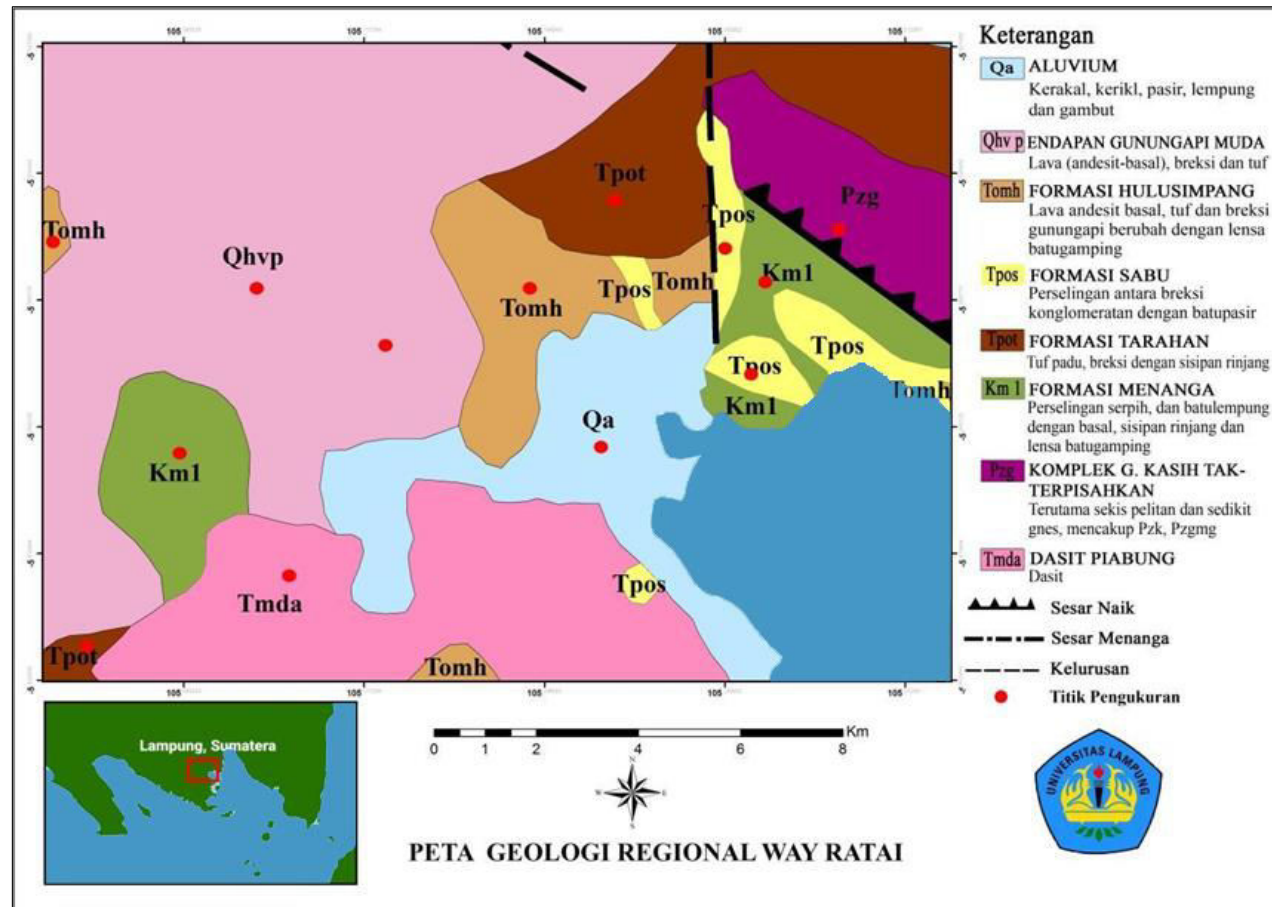
Adapun daerah penelitian berada pada area lapangan panas bumi Way Ratai, Kecamatan Way Ratai serta Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Berikut daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



### Gambar 1. Peta Letak dan Lokasi Penelitian

## 2.2 Geologi Regional dan Stratigrafi

Secara umum daerah penelitian panas bumi Way Ratai berada pada geologi regional Tanjung Karang. Adapun peta geologi regional daerah Way Ratai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Peta Geologi Area Penelitian (Modifikasi dari Gafoer dkk, 1993)

Pada peta geologi daerah penelitian batuan didominasi oleh batuan yang merupakan produk dari Gunung Api Muda (Qhv) yang terdiri dari batuan lava (andesit-basal), breksi, dan tuff, terdapat juga Aluvium (Qa) yang terdiri atas batuan jenis batuan kerikil, pasir, lempung, dan gambut yang berumur Holosen, formasi Hulusimpang (Tomh) yang terdiri atas lava andesit basal, tuf, dan breksi gunungapi berubah dengan batugamping yang berumur Oligosen-Miosen awal, Formasi Sabu (Tpos) yang terdiri atas persilangan antara breksi konglomerat dengan batupasir berumur Paleosen-Oligosen, Formasi Tarahan (Tpot) yang terdiri dari batuan tuf padu dan breksi dengan sisipan rijang, Dasit Piabung (Tmda) terdiri dari batuan dasit, Kompleks Gunung Kasih tak terpisahkan (Pzg) formasi ini terdiri dari sekis pelitan dan sedikit gnes yang mencakup Pzk, Pzgm dan Formasi Menanga (Km) yang terdiri atas persilangan serpih, dan batulempung dengan basal, sisipan rijang, dan batugamping yang berumur Kapur awal (Mangga dkk., 1993).

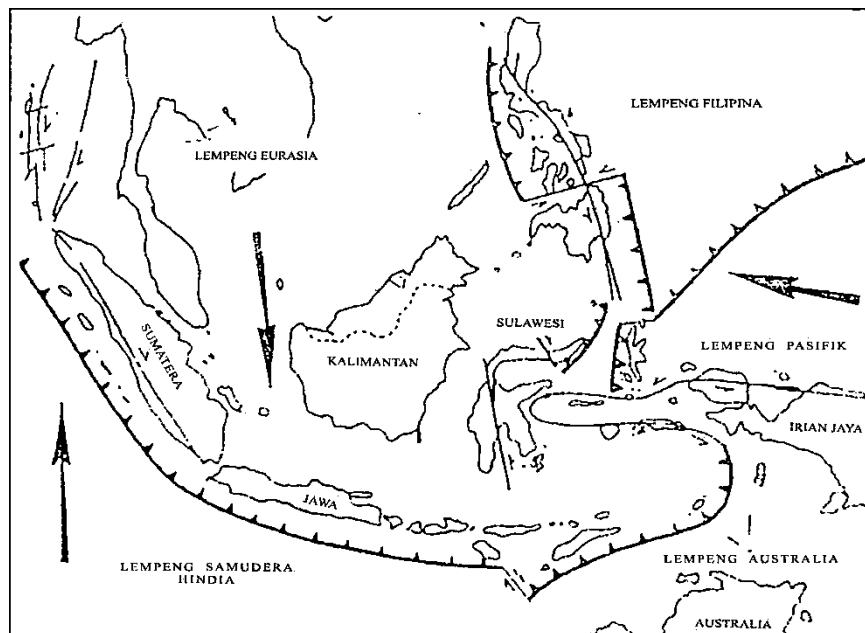
Stratigrafi regional daerah ini tersusun oleh batuan-batuan dari runtutan Pra-Tersier, Runtutan Tersier, Runtutan Kuartar dan Batuan Terobosan. Runtutan tersier terdiri dari batuan tertua adalah runtutan malihan derajat rendah-sedang, yang terdiri dari sekis, genis, pualam dan kuarsit yang termasuk Kompleks Gunungkasih, Kompleks Gunungkasih terdiri dari sekis, kuarsa pelitik grafitik, pualam dan sekis gampingan, kuarsit serisit, suntika migmatit, sekis amfibol dan ortogenes. Dengan asumsi bahwa penyebaran litologi ini mencerminkan keadaan geologi kompleks tersebut, memberikan dugaan kuat bahwa runtutan batuan beku Malihan (Pzg) merupakan sisa-sisa busur magma Paleozoikum serta sisa-sisa runtutan sedimen malih parit atau tanah muka yang berhubungan dengan busur tersebut (Putri dkk., 2014).

### **2.3 Tektonik Regional**

Pulau Sumatera terletak pada daerah zona tektonik aktif. Selain ditunjukkan oleh adanya zona penunjangan lempeng di bagian barat pulau, juga terdapat jalur sesar aktif dan rentetan gunung api aktif dari ujung utara Pulau Sumatera sampai daerah Selat Sunda. Pulau Sumatera terpotong oleh

sesar aktif Sumatera (Semangko) dan merupakan sesar aktif terpanjang yang terdapat di Indonesia.

Tektonik di Sumatera terbentuk oleh lempeng samudra Hindia yang menunjang dari arah Barat atau barat daya kedalam pulau Sumatera di bagian Timur. Secara umum kondisi Sumatera terbentuk oleh deretan kepulauan lepas di sebelah baratnya (P. Mentawai, P. Nias dan sebagainya) yang tersusun oleh batuan sedimen tersier yang terletak di atas batuan metamorf, dan di beberapa tempat diterobos oleh batuan beku mafik dan ultramafik. Di sebelah timurnya terbentuk oleh cekungan busur yang terdiri dari sedimen serpih, batugamping dan sedimen vulkanik Miosen-Pleistosen. Di tengah Pulau Sumatera terbentuk oleh busur vulkanik (*magmatic arc*) pada Pegunungan Bukit Barisan. Pegunungan Bukit Barisan terbentuk oleh batuan sedimen berumur Mio-Pliosen yang terlipat dan terpatahkan, batuan metamorf, batuan granitic, serta terobosan batuan mafik dan vulkanik yang ditutupi oleh deretan gunung api. Gunung api tersebut terbentuk berupa deretan memanjang dan sejajar dengan garis zona penunjang. Ke arah timur berikutnya terbentuk oleh cekungan belakang busur vulkanik (*foreland basin*) dari batuan sedimen klastik batu pasir, serpih napal, batu lempung, dan batu gamping Oligosen-Pliosen. Selanjutnya sebagai inti benua terbentuk oleh batuan metamorf Pra-Tersier (Naryanto, 1997).



**Gambar 3.** Konfigurasi Tektonik Secara Makro di Indonesia (Katili, 1973)



## 2.4 Sistem Panas bumi Way Ratai

Alterasi yang terdapat di permukaan dapat menggambarkan keadaan sistem panas bumi Way Ratai. Jika ditinjau dari segi hidrologi sistem panas bumi Way Ratai ditunjukkan oleh mineral hidrotermal dan *fluids inclusions*. Manifestasi berupa adanya beberapa sumur air panas dapat mengindikasikan adanya sumber panas bumi.

Proses hidrologi pada sistem panas bumi ditandai dengan adanya air hujan (*rainwater*) yang turun ke permukaan bumi kemudian akan meresap dan masuk kedalam tanah melalui pori-pori atau saluran rongga-rongga yang ada pada butir-butir batuan. Jika kapasitas air hujan yang turun ke permukaan cukup deras, maka akan menyebabkan pori-pori butiran batuan menjadi jenuh atau terisi penuh. Bila jumlah air yang turun melebihi kapasitas yang ada, maka air akan mengalir ke tempat yang lebih rendah dari lokasi tersebut. Setiap batuan atau lapisan batuan memiliki permeabilitas atau daya serap yang berbeda tergantung dari jenis batuan tersebut. Potensi panas bumi pada daerah gunung api biasanya ditemukan struktur sesar (*fault*) dan kaldera (*caldera*) yang merupakan hasil dari aktivitas gunung ataupun proses tektonik lainnya.

Kemunculan struktur tersebut bukan hanya membuka pori-pori atau rongga-rongga antar butiran yang ada, tetapi bahkan bisa menciptakan *fracture zone* yang cukup lebar dan vertikal sehingga air dapat turun ke tempat yang lebih dalam lagi dengan mudah dan sampai bertemu dengan batuan panas (*hot rock*). Air tidak lagi turun ke bawah tetapi akan bergerak menuju lapisan batuan yang masih memiliki ruang untuk dapat diisi air. Pada waktu tertentu, air kemudian terakumulasi dan terpanaskan oleh *hot rock*. Sehingga menyebabkan peningkatan temperatur air, volume serta tekanan. Pada proses ini terdapat dua wujud, yaitu yang berwujud air panas, serta yang wujudnya berubah menjadi uap panas.

Fluida panas akan menekan batuan panas yang mengelilinginya akibat dari naiknya tekanan untuk mencari jalan terobosan. Ketika fluida mendapatkan jalan yang dapat membawanya menuju arah permukaan bumi, maka dari sini akan muncul sumur-sumur air panas berupa manifestasi. Namun jika jalan

untuk menerobos tidak tersedia, maka fluida panas tersebut akan tetap terperangkap di sana selamanya. Tempat fluida panas tersebut diistilahkan dengan sebutan reservoir panas bumi (*geothermal reservoir*).

Sedangkan lapisan batuan di bagian atas yang menutupinya dinamakan sebagai *cap rock* yang bersifat impermeabel (Suharno dkk., 2016). Penelitian yang berkaitan dengan potensi energi panas bumi di Way Ratai telah dilakukan oleh tim peneliti bermula dengan menggunakan metode geolistrik. Metode ini berhasil mencitrakan dua sumber manifestasi mata air panas yang saling berhubungan (Karyanto, 2003; Pratama & Rustadi, 2019).

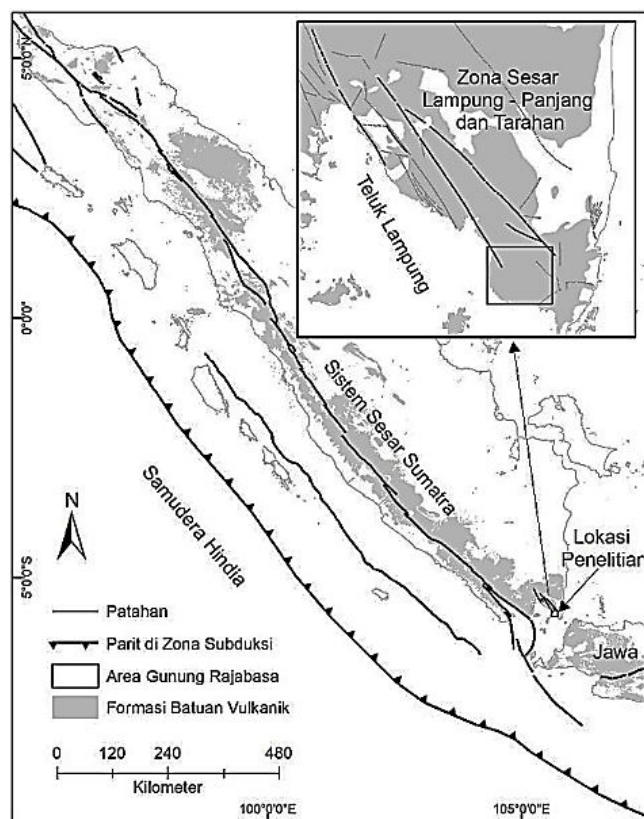
## 2.5 Geomorfologi

Lapangan panas bumi Way Ratai berada di dalam lingkungan kompleks gunungapi yang memiliki dua kerucut gunungapi berdampingan, yaitu Gunung Ratai di sebelah barat daya dan Gunung Betung di sebelah timur laut. Pembentukan bentang alam kompleks gunungapi yang mendasari pembentukan sistem panas bumi daerah Way Ratai dipengaruhi oleh proses endogen dan eksogen yang terjadi selama zaman Kuartar. Proses endogen berasal dari dinamika gunungapi Ratai dan Betung, serta tektonik regional yang berpengaruh di kawasan tersebut. Sementara itu, proses eksogen merupakan proses hidrosfer yang diakibatkan oleh erosi permukaan bumi. Kedua proses alam ini pada akhirnya menghasilkan suatu bentang alam berupa perbukitan dan daratan.

Masing-masing bentang alam dikelompokkan berdasarkan karakteristik bentang alamnya, seperti bentuk atau dimensi morfologi, kemiringan lereng, tekstur dan pola aliran sungai. Berdasarkan parameter tersebut, morfologi Way Ratai dan sekitarnya dikelompokkan menjadi tujuh satuan morfologi, yaitu morfologi kubah lava, perbukitan bertekstur kasar, perbukitan bertekstur halus, perbukitan tua, daratan bergelombang lemah, daratan landai, dan perbukitan terisolir (Gafoer, Amirudin, A., & Sidarto, 1993).

## 2.6 Struktur Sesar

Struktur sesar di lapangan panas bumi Way Ratai dan sekitarnya didominasi oleh struktur sesar berarah barat laut – tenggara dan timur laut – barat daya yang diduga kuat sebagai sesar normal. Di samping kedua struktur sesar normal yang disebutkan di atas, daerah penyelidikan juga dicirikan oleh kelurusan-kelurusan (*lineaments*) berarah utama timur laut – barat daya dan barat laut – tenggara. Kelurusan-kelurusan (*lineaments*) hadir cukup banyak, terutama di bagian barat, barat daya, selatan dan sedikit di bagian tengah daerah penyelidikan.



**Gambar 4.** Peta Struktur Geologi Regional Sumatera  
(Darmawan dkk., 2021)

Mekanisme pembentukan sesar normal diakibatkan oleh gaya tarik (*extention*) dan cenderung menimbulkan *open space* yang cukup lebar. Karena itu, kehadirannya dianggap penting sebab dapat menyokong tingginya permeabilitas batuan di zona reservoir panas bumi Way Ratai. Karena itu pembahasan struktur sesar adalah sangat penting, khususnya untuk struktur

sesar normal berarah timur laut – barat daya, sesar normal berarah barat laut – tenggara dan kelurusan-kelurusan yang diperkirakan mempengaruhi zona prospek panas bumi di Way Ratai.

Berikut ini akan dijelaskan secara rinci mengenai penjelasan dari kedua struktur sesar yang ada di lapangan panas bumi Way Ratai.

#### 1. Sesar normal berarah barat laut – tenggara

Terutama berada di sekitar puncak, atau sedikit di utara Gunung Betung dan di sebelah selatan–tenggara kawah puncak Gunung Ratai. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal di sekitar puncak Gunung Betung tampak berbeda, yaitu satu diantaranya memperlihatkan blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara.

Kedua sesar normal barat laut – tenggara di sekitar puncak Gunung Betung ini membentuk struktur graben. Sedangkan sesar normal berarah barat laut – tenggara di sekitar puncak Gunung Ratai memperlihatkan blok timur laut yang relatif turun terhadap blok barat daya. Struktur sesar normal yang berarah barat laut–tenggara lainnya (relatif kecil), terdapat di sisi tenggara, selatan, barat daya dan barat daerah penyelidikan. Pergerakan sesar normal yang kecil-kecil ini sangat beragam, ada yang blok timur laut relatif turun terhadap blok barat daya, dan sebaliknya ada yang blok barat daya relatif turun terhadap blok timur laut. Sebagai tambahan, satu pasang struktur sesar normal yang berarah barat laut–tenggara di kaki tenggara Gunung Ratai membentuk struktur graben.

#### 2. Sesar normal berarah timur laut – barat daya

Terutama dicirikan oleh dua struktur sesar normal, yaitu yang pertama memotong puncak kawah Gunung Betung, sedangkan yang kedua di kaki tenggara Gunung Betung. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal ini relatif sama, yaitu blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara. Kedua sesar normal timur laut – barat daya ini membentuk *step fault*.

Struktur sesar normal yang berarah timur laut – barat daya lainnya tampak relatif pendek, terdapat di sisi timur, tenggara, selatan dan barat daerah penyelidikan. Pergerakan sesar normal yang kecil-kecil ini sangat beragam (Gafoer dkk., 1993).

### III. TEORI DASAR

#### 3.1 Panas bumi

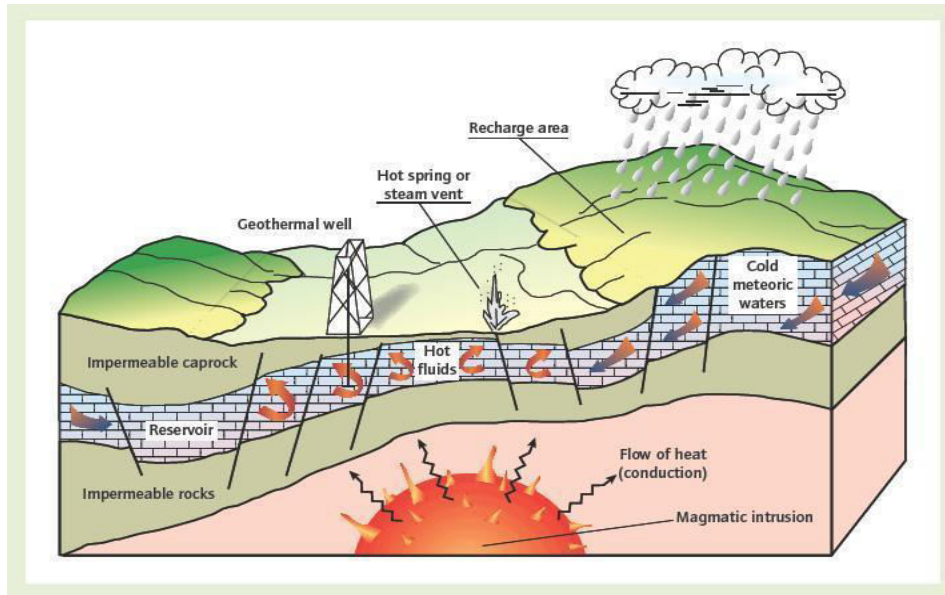
Panas bumi secara umum dapat diartikan sebagai jumlah kandungan panas yang tersimpan dalam bumi dan membentuk sistem panas bumi yang telah ada sejak bumi terbentuk. Sistem panas bumi tersebut mencakup sistem hidrotermal yang merupakan sistem tata air, proses pemanasan dan kondisi sistem dimana air yang terpanasi terkumpul, sehingga sistem panas bumi mempunyai persyaratan harus tersedianya air, batuan pemanas, batuan sarang dan batuan penutup (Alzwar dkk., 1987).

Sumber daya panas bumi (*geothermal energy*) dapat ditemui di banyak tempat di muka bumi ini. Tetapi, tidak semua panas bumi dapat dijadikan dan dimanfaatkan sebagai sumber listrik. Ada beberapa jenis reservoir panas bumi, yaitu reservoir hidrotermal (*hydrothermal reservoir*), reservoir bertekanan tinggi (*geopressured reservoir*), reservoir batuan panas kering (*hot dry rock reservoir*), dan reservoir magma (Edwards dkk., 1982).

##### 3.1.1 Sistem Panas bumi

Sistem panas bumi tersusun oleh beberapa parameter kebumihan, seperti sumber panas, reservoir, batuan penudung, sumber fluida, dan siklus hidrologi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Air hujan (*rain water*) akan merembes kedalam tanah melalui saluran pori-pori atau rongga-rongga di antara butir-butir batuan, sehingga air dengan leluasa menerobos turun ke batuan panas (*hot rock*). Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas (*hot rock*), akibatnya temperatur air meningkat, volume bertambah dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang terus meningkat menyebabkan air panas naik ke atas melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan di dalam

permukaan. Sumber panas bumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu di permukaan ditentukan oleh konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi di dalam sirkulasi fluida. Suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman posisi di bawah permukaan bumi (Suharno, 2012).



**Gambar 5.** Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2013)

### 3.1.2 Manifestasi Panas bumi

Manifestasi panas bumi adalah sirkulasi fluida yang berasal dari daerah *recharge* yang muncul ke permukaan melalui *upflow* dan *outflow* dimana fluida tersebut akan keluar dan melewati batuan. Komposisi mineral pada batuan tersebut berubah dan menghasilkan mineral ubahan kemudian fluida yang muncul ke permukaan akan menjadi air panas atau uap air melalui rekahan batuan (Ibradi dkk., 2019).

Panas bumi di permukaan dapat berbentuk, seperti *warm ground*, *steaming ground*, kolam lumpur panas, kolam air panas, *fumarole*, sumber air panas, rembesan, geyser, dan daerah alterasi hidrotermal selalu dikaitkan dengan proses geologi dan model sistem panas bumi. *Warm ground* adalah tanah panas yang keluar karena konduktivitas termal pada lapisan bagian atas dan gradien temperatur lebih dari  $25^{\circ}\text{C}$ - $30^{\circ}\text{C}$ . Aliran panas yang tinggi dapat dideteksi dengan infra merah. *Steaming ground* diartikan sebagai tanah beruap. Uap

yang keluar berasal dari penguapan air panas pada kedalaman dangkal atau dari kedalaman yang dalam. Kolam lumpur panas atau *mud vulkano* adalah kubangan lumpur panas, sedikit mengandung uap dan gas CO<sub>2</sub> dan tidak terkondensasi.

Gas CO<sub>2</sub> keluar dari salah satu celah dengan temperatur lebih kecil dari titik didih. Kolam air panas biasanya terdapat di tengah-tengah suatu kubang hidrotermal minor purba dan bisa juga berbentuk *hot lake*. Kolam air panas terjadi dari *fumarole* yang sudah tidak aktif lagi. Kolam air panas yang bersistem uap air biasanya berlumpur dan berwarna abu-abu, sedangkan yang bersistem air panas biasanya bersih dan sedikit abu-abu, yang bersistem air panas asam terjadi pada kedalaman yang sangat dalam. Fumarol adalah hembusan gas magnetik dan uap yang keluar dengan suhu tinggi, dimana uap air umumnya lebih banyak dengan temperatur kurang dari 100°C (Basid dkk., 2014). Selain itu, pengaruh termal sangat bergantung pada gradien termal *existing*, ketebalan reservoir dan permeabilitasnya (Lipsey dkk., 2016).

Manifestasi panas bumi di permukaan sangat penting untuk mendapatkan prakiraan awal. Data hasil analisis air yang diambil dari manifestasi permukaan, sangat berguna untuk memperkirakan asal sumber air, jenis reservoir, suhu di bawah permukaan, karakter dan jenis fluida reservoir (Suharno, 2013). Manifestasi di lapangan panas bumi Way Ratai berhasil diidentifikasi sebagai bagian dari struktur geologi yang berarah barat laut-tenggara, yaitu melintasi manifestasi mata air panas Bambu Kuning dan Margodadi (Haerudin dkk., 2016). Struktur geologi yang diduga sebagai sesar tersebut juga mempengaruhi hasil pengukuran konduktivitas termal di Way Ratai (Donovan dkk., 2018). Hasil studi ini selaras dengan hasil inversi data pengukuran Audio Magnetotelurik (AMT) di Way Ratai yang menggambarkan konseptual model panas bumi dengan *cap rock* berada pada kedalaman 100-750 meter, reservoir pada kedalaman 300-1600 meter dan batuan basement yang berada pada kedalaman 700-3000 meter (Suryadi dkk., 2017). Penelitian lainnya berupa analisis geokimia dengan geotermometer Na-K telah menginterpretasikan bahwa suhu reservoir di lapangan panas bumi Way Ratai berkisar antara 196°C sampai dengan 218°C (Dewi, 2018).

Fluida panas bumi yang terkandung dalam reservoir hidrothermal berasal dari air permukaan, antara lain air hujan (air meteorik) yang meresap masuk ke bawah permukaan dan terpanaskan oleh suatu sumber panas. Air tersebut akan masuk melalui rekahan-rekahan kedalam batuan permeabel. Apabila disekitar batuan tersebut terdapat sumber panas, maka panas akan dirambatkan melalui batuan (secara konduksi) dan melalui fluida (secara konveksi). Geokimia panas bumi mempelajari komposisi kimia fluida panas bumi (air dan uap) untuk mengetahui karakteristik fluida dan proses yang mempengaruhi tersebut, baik di reservoir maupun saat fluida tersebut naik ke permukaan. Survey geokimia bertujuan untuk mencari indikasi mineralisasi pada suatu daerah dimana metode ini digunakan untuk memperoleh data yang berkaitan dengan pola geokimia yang tidak normal atau dikenal dengan istilah anomali (Fadhly dkk., 2017). Tipe air panas bumi berdasarkan kandungan anion dominan berupa Cl, SO<sub>4</sub>, dan HCO<sub>3</sub> terbagi menjadi (Nicholson dalam Rony dkk., 2019):

a. Air Klorida

Merupakan tipe fluida panas bumi dalam atau *deep geothermal fluid* yang umumnya ditemukan pada sistem panas bumi bertemperatur tinggi. Mata air panas dengan tipe air klorida memiliki temperatur tinggi, debit yang besar, rasio Cl/SO<sub>4</sub> tinggi, pH 5-9 dan kandungan klorida yang tinggi yang berasal langsung dari reservoir.

b. Air Sulfat

Merupakan tipe fluida panas bumi yang terbentuk akibat kondensasi gas panas bumi pada air permukaan Hidrogen Sulfida (H<sub>2</sub>S) yang terdapat dalam uap panas tersebut mengalami oksidasi menjadi sulfat. Tipe air panas ini juga disebut sebagai *steam-heated water*. Mata air panas bertipe sulfat biasanya berasal dari reservoir dangkal, memiliki pH rendah, kandungan klorida rendah dan sulfat tinggi.

c. Air Bikarbonat

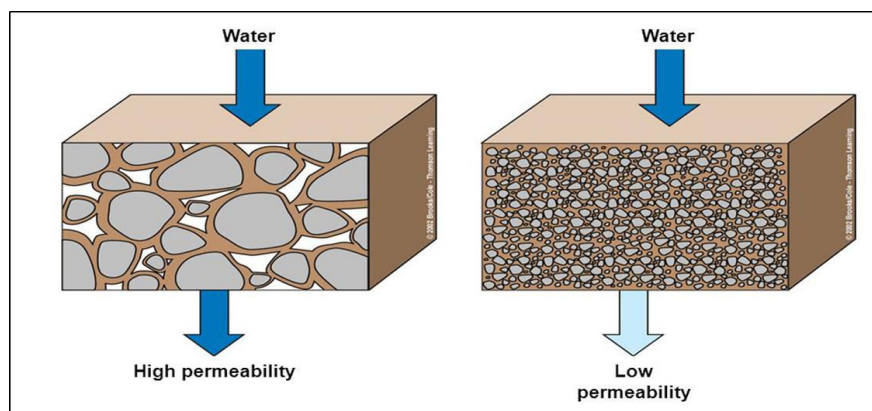
Merupakan tipe fluida panas bumi yang terbentuk akibat kondensasi uap dan gas kedalam air permukaan yang minim oksigen. Tipe air bikarbonat biasanya memiliki pH mendekati netral akibat adanya reaksi dengan batuan selama migrasi lateralnya.



### 3.2 Permeabilitas

Permeabilitas adalah tanah yang dapat menunjukkan kemampuan tanah meloloskan air. Tanah dengan permeabilitas tinggi dapat menaikkan laju infiltrasi sehingga menurunkan laju air larian. Pada ilmu tanah, permeabilitas didefinisikan secara kualitatif sebagai pengurangan gas-gas, cairan-cairan atau penetrasi akar tanaman atau lewat. Selain itu permeabilitas juga merupakan pengukuran hantaran hidrolis tanah. Hantaran hidrolis tanah timbul adanya pori kapiler yang saling bersambungan antara satu dengan yang lain.

Permeabilitas menunjukkan kemampuan tanah untuk meloloskan air struktur, tekstur, serta unsur organik lainnya juga ikut ambil bagian dalam menaikkan laju inflasi dan menurunkan laju air. Tekstur tanah merupakan salah satu sifat fisik tanah, begitu juga dengan permeabilitas. Permeabilitas dapat mempengaruhi kesuburan tanah. Permeabilitas berbeda dengan drainase yang lebih mengacu pada proses pengaliran air saja, permeabilitas dapat mencakup bagaimana air, bahan organik, bahan mineral, udara dan partikel – partikel lainnya yang terbawa bersama air yang akan diserap masuk kedalam tanah.



**Gambar 6.** Ilustrasi Kemampuan Permeabilitas Lapisan

Permeabilitas tanah diukur dengan menggunakan metode Hukum Darcy. Hukum Darcy untuk satu dimensi yaitu aliran secara vertikal. Sifat ini dipengaruhi oleh geometri (ruang) pori dan sifat dari cairan yang mengalir di dalamnya. Air dapat mengalir dengan mudah di dalam tanah yang mempunyai pori-pori besar. Pori kecil dengan hubungan antar pori yang seragam akan

mempunyai permeabilitas lebih rendah, sebab air akan mengalir melalui tanah lebih lambat. Kemungkinan tanah yang pori-porinya besar, permeabilitasnya mendekati nol, yaitu jika pori-pori tersebut terisolasi sesamanya. Permeabilitas juga mendekati nol, yaitu jika pori-pori tanah sangat kecil, seperti tanah bertekstur lempung. Air di dalam tanah tidak bergerak vertikal, akan tetapi ke arah horizontal, dinamai rembesan lateral. Rembesan lateral disebabkan oleh permeabilitas berbagai lapisan tanah yang tidak seragam. Air yang masuk lapisan tanah dengan laju agak cepat, mungkin tertahan oleh lapisan yang permeabilitasnya lambat atau kedap air. Ada dua macam permeabilitas, yaitu permeabilitas jenuh dan tak jenuh. Permeabilitas jenuh (aliran jenuh) adalah permeabilitas terjadi apabila seluruh pori terisi oleh air. Nilai permeabilitas ditentukan dengan data lapangan dan data analisis laboratorium berbeda dengan nilai permeabilitas tanah dalam keadaan jenuh.

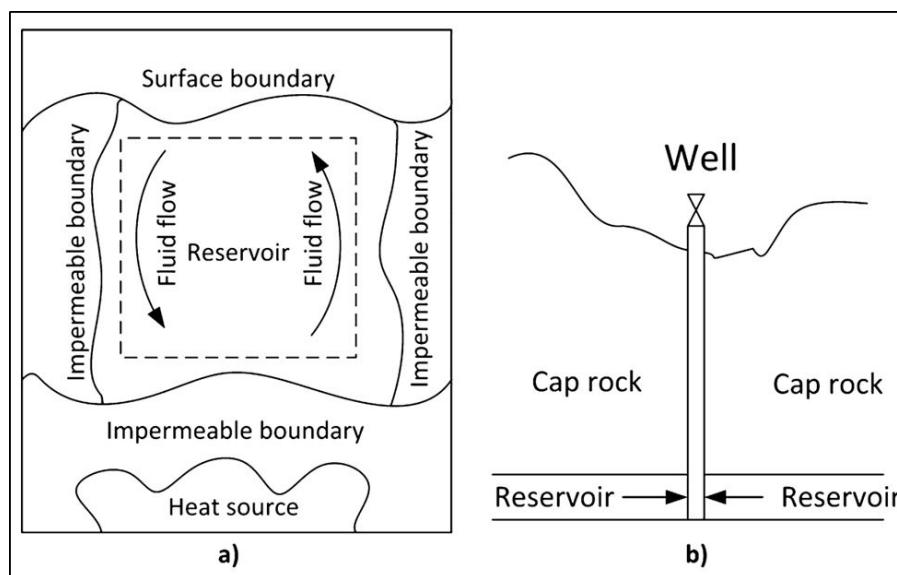
Dalam sistem panas bumi, salah satu parameter terpenting adalah porositas dan permeabilitas batuan (Bauer dkk., 2019). Pengujian untuk nilai permeabilitas tanah di laboratorium biasanya dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan pengujian permeabilitas lapangan dan permeabilitas laboratorium. Untuk pengujian permeabilitas laboratorium, ada dua metode yang digunakan, yaitu metode *Constant Head* dan *Falling Head*.

Metode *constant head* adalah metode pengujian permeabilitas yang biasanya digunakan untuk tanah yang memiliki butiran kasar dan memiliki koefisien permeabilitas yang tinggi, seperti pasir, kerikil atau beberapa campuran pasir dan lanau. Kemudian untuk metode *falling-head* adalah metode pengujian permeabilitas yang biasanya digunakan untuk tanah yang memiliki butiran halus dan memiliki koefisien permeabilitas yang rendah seperti tanah lempung.

Permeabilitas relatif dapat digunakan untuk mengevaluasi aliran massa fluida dalam reservoir, dimana produktivitas sistem panas bumi khususnya di wilayah tektonik yang aktif dikontrol oleh permeabilitas pada zona patahan (Brehme dkk., 2016; Gudjonsdottir dkk., 2015). Metode analisis model permeabilitas panas bumi dilakukan dengan pembuatan simulasi model numerik. Simulasi numerik dapat menggambarkan mekanisme aliran fluida

hidrotermal dan menghitung massa dan entalpi fluida panas bumi (Saibi, 2011). Simulasi ini juga mampu menggambarkan aliran panas, distribusi temperatur background dan pola *mass flux* sampai beberapa tahun ke depan (Setyawan dkk., 2010).

Nilai permeabilitas relatif dibutuhkan dalam pemodelan menggunakan *Software Hydrotherm*. Namun, nilai permeabilitas ini tidak dapat ditentukan secara langsung karena umumnya saturasi air di dalam reservoir tidak diketahui (Gudjonsdottir dkk., 2015). Oleh karena itu, pada penelitian ini, pendekatan nilai saturasi hasil pengukuran lapangan dan laboratorium digunakan dalam pemodelan. Pendekatan pemodelan numerik dilakukan dengan merepresentasikan model reservoir sebagai zona permeabel dan dibatasi oleh zona impermeable di sekitarnya, serta cap rock sebagai penutup reservoir seperti gambar di bawah ini.



**Gambar 7.** Ilustrasi model reservoir panas bumi sistem konveksi vulkanis (a) dan model sumur eksplorasi yang menyebabkan fluida hidrotermal mengalir dari reservoir (b) (Gudjonsdottir dkk., 2015).

Perhitungan permeabilitas pada penelitian ini didasarkan pada Hukum Darcy dengan dua pendekatan, yaitu perhitungan permeabilitas relatif yang dilakukan langsung di lapangan dan pengukuran di laboratorium. Persamaan yang digunakan untuk menghitung relatif di lapangan adalah:

$$k = \frac{QL}{Ath} \quad (1)$$

dengan:

- $k$  = Permeabilitas ( $cm/det$ )
- $Q$  = Laju aliran infiltrasi ( $ml/det$ )
- $L$  = Tebal lapisan sampel ( $cm$ )
- $A$  = Luas permukaan sampel ( $cm^2$ )
- $t$  = Waktu pengukuran hingga sampel jenuh air dan konstan ( $det$ )
- $h$  = Tinggi permukaan air dari permukaan sampel ( $cm$ )

Persamaan ini digunakan dengan penyederhanaan densitas air adalah  $1 \text{ gr/cm}^3$ . Sementara untuk menghitung nilai permeabilitas sampel di laboratorium menggunakan persamaan berikut (Lamur dkk., 2017):

$$k = \frac{Q\mu L}{A\Delta P} \quad (2)$$

dengan:

- $k$  = Permeabilitas ( $cm/det$ )
- $Q$  = Laju aliran infiltrasi ( $ml/det$ )
- $\mu$  = Viskositas air
- $L$  = Tebal lapisan sampel ( $cm$ )
- $A$  = Luas permukaan sampel ( $cm^2$ )
- $\Delta P$  = Perbedaan tekanan pori ( $MPa$ )

dimana nilai  $Q$  diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut ini:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3)$$

dimana:

$Q$  = Laju aliran infiltrasi ( $ml/det$ )

$V$  = Volume air ( $ml$ )

$t$  = Waktu pengukuran hingga sampel jenuh air dan konstan ( $jam$ )

Untuk mendapatkan laju aliran pada pengukuran lapangan dilakukan dengan menentukan volume air yang digunakan di awal pengukuran pada saat kondisi sampel jenuh air. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan pendekatan besaran laju aliran mendekati kondisi reservoir.

Metode pemodelan permeabilitas pada aliran fluida hidrotermal dilakukan dengan menggunakan *Software Hydrotherm*. Metode ini menggunakan algoritma Newton-Raphson untuk sistem diferensial non linier dan *Slice Successive Over Relaxation* (SSOR) maupun *Generalizedd Minimum Residual* (GMRES) untuk sistem linier. Simulasi numerik menggunakan *Software Hydrotherm* mampu mengidentifikasi zona saturasi air dari permukaan tanah sampai dengan ke kedalaman muka air tanah.

### 3.3 Persamaan Aliran Air Tanah

Persamaan aliran komponen air (Faust dan Mercer, 1979), didasarkan pada kekekalan massa air dalam elemen volume, kemudian ditambah dengan hukum Darcy untuk aliran multifase melalui berpori, sedangkan untuk perpindahan energi panas, konservasi entalpi pada fase fluida dan fase padat keduanya digunakan dengan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{\square k_{rw} \rho_w}{\mu_w} [\nabla p + \rho_w g \hat{e}_z] - \nabla \cdot \quad (4) \\ \frac{\square k_{rs} \rho_s}{\mu_s} [\nabla p_g + \rho_s g \hat{e}_z] - q_{sf} = 0 \end{aligned}$$

dimana:

$\Phi$  = Porositas

$\rho$  = Densitas ( $kg/m^3$ )

$S_p$  = Saturasi Air di Fase P

$k$	= Permeabilitas ( $m^2$ )
$k_r$	= Permeabilitas Relatif
$\mu$	= Viskositas (kekentalan) (Pa-s)
$p$	= Tekanan Fluida Fase Cair (Pa)
$p_g$	= Tekanan Fluida Fase Gas (Pa)
$g$	= Gravitasi ( $m/s^2$ )
$\vec{e}_z$	= Vektor Arah Z
$q_{sf}$	= Intensitas Arus ( $kg/s \cdot m^3$ )
$t$	= Waktu (s)
$\nabla$	= Gradient Spasial ( $m^{-1}$ )

Subskrip fase  $w$  dan  $s$  masing-masing mengacu pada air dan uap. Pada zona komponen tunggal (air),  $p_g = p$  dikarenakan tekanan kapiler diasumsikan 0. Sedangkan dalam zona tak jenuh dengan dua komponen (udara-air) mengacu pada **persamaan (2)** dengan tidak melibatkan uap. **Persamaan (2)** menghubungkan perubahan massa air total dalam fase cair dan gas dengan aliran air bersih dan sumber aliran airnya. Di zona tersebut, tidak ada persamaan aliran yang perlu dirumuskan karena komponen udara diasumsikan berada pada tekanan atmosfer dengan demikian air tidak mengalir. Titik simulasi berada di zona komponen tunggal adatu dua komponen sehingga persamaan saturasi menjadi sebagai berikut :

$$S_w + S_g = 1 \quad (5)$$

Dimana  $h_r$  adalah entalpi spesifik dari fase padat matriks berpori (J/kg) dan  $\rho_r$  adalah Densitas dari poros-matriks fase solid ( $kg/m^3$ ).

Berdasarkan asumsi di atas,  $S_g$  mewakili saturasi uap air atau udara pada titik tertentu. Tidak ada ketentuan yang pasti untuk uap dan udara agar bisa berdampikan dalam simulator *Hydrotherm*. Kecepatan interstisial atau pori ( $V_p$ ) untuk komponen air dalam fase  $p$  diperoleh dari hukum Darcy sebagai berikut :

$$V_p = -\frac{kk_{rp}}{\theta S_p \mu_p} [\nabla_p + \rho_p g \hat{e}_z] \quad (6)$$

Dimana  $V_p$  adalah vektor kecepatan interstisial untuk air dalam fase  $P$  dan  $P$  air atau uap (m/s).

Permukaan air didefinisikan sebagai permukaan dari tekanan atmosfer dan konfigurasinya dapat di determinasikan dari solusi tekanan. Menggunakan formula zona saturasi parsial mengartikan bahwa wilayah simulasi aliran dapat meluas ke permukaan tanak dan tidak perlu disesuaikan untuk menyelaraskan dengan konfigurasi permukaan air selama simulasi berlangsung.

### 3.4 Persamaan Perpindahan Energi Panas

Persamaan perpindahan panas dibuat berdasarkan konservasi entalpi dalam fase padat dan fluida dari medium berpori dalam wilayah elemen. Entalpi adalah sifat turunan yang mengandung energi internal dan energi aliran. Dapat didefinisikan menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1 - \phi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot \\ K_a \nabla T + \nabla \cdot \phi(S_w \rho_w h_w V_w + S_s \rho_s h_s V_s) - q_{sh} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Dimana  $h$  adalah Entalpi spesifik dari fase fluida (J/kg),  $h_r$  adalah entalpi dari fase padat matriks berpori (J/kg),  $\rho_r$  adalah densitas dari fase padat matriks berpori (kg/m<sup>3</sup>),  $K_a$  adalah konduktivitas termal efektif dari medium berpori (W/m·°C),  $\mathbf{I}$  adalah matriks identitas orde 3 (tidak berdimensi),  $T$  adalah Temperatur (°C), dan  $q_{sh}$  adalah intensitas laju aliran dari sumber entalpi (W/m<sup>3</sup>).

Fase subskrip  $w$  dan  $s$  mengacu pada air dan uap. **Persamaan (5)** menghubungkan laju perubahan fluida dan entalpi media berpori menjadi *net conductive enthalpy flux*, lalu menjadi *net advective flux*, dan menjadi sumber panas. Persamaan tersebut ditulis untuk satuan volume yang mengandung fase cair, gas, dan padat.

### 3.5 Persamaan Fungsi Permeabilitas

Persamaan fungsi permeabilitas dibuat berdasarkan Hukum Darcy, dimana Hukum Darcy adalah persamaan yang mendefinisikan kemampuan suatu fluida mengalir melalui media berpori, seperti batur. Hal ini bergantung pada prinsip bahwa jumlah aliran antara dua titik adalah berbanding lurus dengan perbedaan tekanan antara titik-titik dan kemampuan media melalui yang mengalir untuk menghambat arus (Djarwanti, 2008). Dapat didefinisikan menjadi:

$$Q = k \times I \times A \quad (8)$$

$$k = (Q \times L) \div (\Delta h / A) \quad (9)$$

dimana,

$Q$  = Debit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$k$  = Koefisien Permeabilitas (Darcy)

$A$  = Luas Penampang ( $\text{m}^2$ )

$i$  = Koefisien Hidrolik =  $\Delta h / L$

### 3.6 Solusi Persamaan Numerik

#### 3.6.1 Algoritma Newton Raphson

Algoritma ini digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan perbedaan non linier untuk setiap langkah waktu. Persamaan aliran dan perpindahan energi termal diselesaikan secara bersama untuk fluida, tekanan, dan entalpi. Perbedaan non linier ini ditulis untuk aliran dan perpindahan panas dalam sekuen untuk setiap titik aktif. Persamaan tersebut ditulis dalam bentuk nilai residual untuk  $N$  titik aktif adalah

$$f(u) = 0 \quad (10)$$

Dimana  $f$  adalah vektor nilai residual dari persamaan beda hingga non linier (W),  $u$  adalah Blok vektor  $2 \times 1$  yang tidak diketahui (tekanan entalpi) dengan panjang  $N_a$ , dan  $N_a$  adalah jumlah titik aktif dalam *mesh*.



Vektor  $f$  dan  $u$  adalah panjang  $2N_a$ , dimana dapat dibagi menjadi dua komponen, karena terdapat dua persamaan dengan dua yang tidak diketahui untuk setiap titik aktif. Dapat diasumsikan bahwa semua titik aktif, sehingga  $N = N$ . Metode Newton-Raphson, diumpamakan ke sekumpulan persamaan, melibatkan penyelesaian,

$$J(u^{(v)})(u^{(v+1)} - u^{(v)}) + f(u^{(v)}) = 0 \quad (11)$$

Dengan

$$J(u^{(v)}) = \left[ \frac{\partial f_1}{\partial u_1} \dots \frac{\partial f_1}{\partial u_N} : : \frac{\partial f_N}{\partial u_1} \dots \frac{\partial f_N}{\partial u_N} \right]_{u=u^{(v)}} \quad (12)$$

dan

$$u^{(v+1)} - u^{(v)} = \left[ u_1^{(v+1)} - u_1^{(v)} : u_N^{(v+1)} - u_N^{(v)} \right] \quad (13)$$

Dimana  $J$  adalah Matriks Jacobian  $2 \times 2$  dengan ukuran  $N_a \times N_a$  dan  $U^{(v)}$  adalah vektor dari nilai tekanan dan entalpi dalam setiap titik aktif pada iterasi  $v$ .

Sel batas dengan tekanan dan entalpi tertentu serta sel *seepage-surface* yang merembes tidak dimasukkan dalam uji konvergensi karena residunya tidak menjadi kecil saat larutan mendekati. Sebenarnya, residu mereka menentukan laju aliran melalui permukaan batas regional sel tersebut.

### 3.6.2 Solusi Persamaan Linier

Satu set dari persamaan newton beda hingga linierisasi (**Persamaan 11**) diselesaikan dengan salah satu dari dua algoritma untuk persamaan linear, matriks jarang, digunakan Metode *Slice-successive-over-relaxation* (SSOR) atau metode *Generalized-minimum-residual* (GMRES). Keduanya merupakan metode iterasi untuk tiga dimensi *mesh*, sedangkan metode SSOR menjadi metode langsung untuk dua dimensi *mesh* yang terdiri dari satu *slice* *vertical*.

## **IV. METODE PENELITIAN**

### **4.1 Waktu dan Tempat Penelitian**

Penelitian dilaksanakan pada:

Waktu : 1 September – 31 Desember 2021

Tempat : Laboratorium Pengolahan dan Pemodelan Data Geofisika,  
Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

### **4.2 Alat dan Bahan**

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian antara lain:

- a. Laptop
- b. GPS
- c. *Software Hydrotherm Interactive 2D*
- d. *Software ArcGis*
- e. *Software Microsoft Office*
- f. Data Karakteristik Batuan
- g. Data Permeabilitas
- h. Data Topografi
- i. Alat Pengukur Permeabilitas (Tipe *Falling Down*)
- j. Alat Hidrolik
- k. Pipa Plastik
- l. Tabung Sampel Tanah
- m. Gelas Ukur
- n. *Stopwatch*

### 4.3 Jadwal Penelitian

Adapun rincian waktu jadwal penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Jadwal Penelitian Tugas Akhir

No.	Kegiatan	Tahun 2022 Bulan																											
		Minggu Ke-																											
		Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni				Juli			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Studi Literatur																												
2	Persiapan dan Pengumpulan Data																												
3	Pengolahan Data																												
4	Analisis dan Interpretasi Data																												
5	Penyusunan Laporan																												
6	Bimbingan Seminar Proposal																												
7	Seminar Proposal																												
8	Pemodelan Lanjutan																												
9	Analisis dan Interpretasi Data																												
10	Bimbingan Seminar Hasil																												
11	Seminar Hasil																												
12	Bimbingan dan Fiksasi Laporan																												
13	Ujian Komprehensif																												

### 4.4 Prosedur Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan beberapa langkah prosedur penelitian, yaitu:

a. Studi Literatur

Prosedur ini dilakukan untuk memahami konsep dasar dari geologi panas bumi maupun geofisika dari penelitian yang dilakukan.

b. Akuisisi Data Lapangan

Pengukuran permeabilitas dilakukan pada lapangan panas bumi Way Ratai dengan jumlah titik pengukuran sebanyak 13 titik, yang dimana masing-masing titiknya mewakili litologi batuan pada daerah tersebut.

c. Data Pendukung (Sekunder)

Data geologi pada lapangan panas bumi Way Ratai menggunakan data peta geologi lembar Tanjung Karang dan Kota Agung untuk menganalisis serta menginterpretasi struktur geologi pada area ini. Adapun karakteristik batuan pada penelitian ini diambil dari pengujian lab pada Laboratorium Sipil serta referensi dari beberapa sumber. Karakteristik batuan yang digunakan yaitu porositas (%),

permeabilitas ( $\text{m}^2$ ), konduktivitas termal ( $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ), kalor jenis batuan ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ), densitas batuan ( $\text{g/cm}^3$ ). Fungsi data karakteristik batuan adalah untuk membuat batas-batas awal dalam simulasi numerik.

d. Tahap Pengolahan Data

Langkah pertama dari pembuatan model numerik adalah dengan membuat bagian batas dari model awal atau *initial model*. Secara horizontal, model awal dapat mencakup seluruh reservoir atau hanya sebagian reservoir. Pembuatan model awal batas atas ini memerlukan data topografi yang dapat diambil dari sumber data IFSAR (*Inter-ferometric Synthetic Aperture Radar*) dengan resolusi 5m, yang dapat diunduh di DEMNAS. Data topografi dibuat berdasarkan data DEM (*Digital Elevation Model*) yang menghasilkan penampang ketinggian. Penampang ketinggian tersebut didapatkan dari analisis *line interpolation* menggunakan perangkat lunak *arcgis*, dari data tersebut dimasukkan kedalam perangkat lunak *Hydrotherm Interactive* dengan menggunakan fungsi *Load Site Map* dalam *window Site Map* pada kolom *Active Data*. Data kedalaman yang digunakan pada penelitian ini adalah sedalam 5000 meter. Dari gambar penampang tersebut dimasukkan menggunakan fungsi *Load Site Map* untuk membuat batasan kedalaman beserta panjang *domain* simulasi. dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa *domain* yang terbentuk, memiliki panjang penampang 16 kilometer dan ketinggian 5,3 kilometer.

e. Interpretasi

Hasil dari *running* model lintasan 10.000 tahun iterasi, didapatkan nilai model permeabilitas berdasarkan pola aliran fluida hidrotermal hasil simulasi numerik di Gunung Ratai, yang selanjutnya dikorelasikan dengan penelitian dengan metode lainnya pada daerah tersebut guna didapatkan kontras perpindahan panas, perpindahan massa fluida dan perpindahan massa fluida uap.

#### 4.4.1 Permeabilitas Metode *Falling Head*

Dalam perhitungan permeabilitas dengan metode lapangan lalu dengan metode *falling-head* pada laboratorium menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$K = Q/t \times L/h \times 1/A \quad (14)$$

$$Q = V/t \quad (15)$$

dengan:

$Q$  = Infiltrasi ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$V$  = Volume air (liter)

$K$  = Permeabilitas ( $\text{cm/s}$ )

$L$  = Tebal contoh tanah (m)

$h$  = “*water head*” ialah tinggi permukaan air dari permukaan contoh tanah (m)

$A$  = Luas permukaan contoh tanah ( $\text{m}^2$ )

$t$  = Waktu pengukuran saat tanah jenuh dan konstan (s)

#### 4.4.2 Simulasi Numerik

Pada penelitian kali ini digunakan model numerik yang mengambil referensi dari dua jenis profil sayatan, yang pertama melintang berarah barat laut – tenggara dan melintang berarah utara - selatan, diawali dari puncak gunung ratai sampai dengan memotong area manifestasi panas bumi Way Ratai. Penggunaan dua jenis profil sayatan ini bertujuan untuk mendapatkan referensi kondisi saat ini yang diperoleh dari pengukuran langsung maupun hasil penelitian sebelumnya. Referensi ini dipilih karena belum ada data pemboran maupun sumur eksplorasi di daerah penelitian. Selain itu, dengan menggunakan lintasan yang memotong area manifestasi, simulasi numerik dapat dihentikan saat model aliran fluida panas bumi mulai muncul di permukaan pada area referensi. Kondisi model saat penghentian iterasi ini dianggap sebagai

model kondisi stabil awal (*preliminary steady-state model*) untuk pendekatan model sistem panas bumi Way Ratai saat ini.

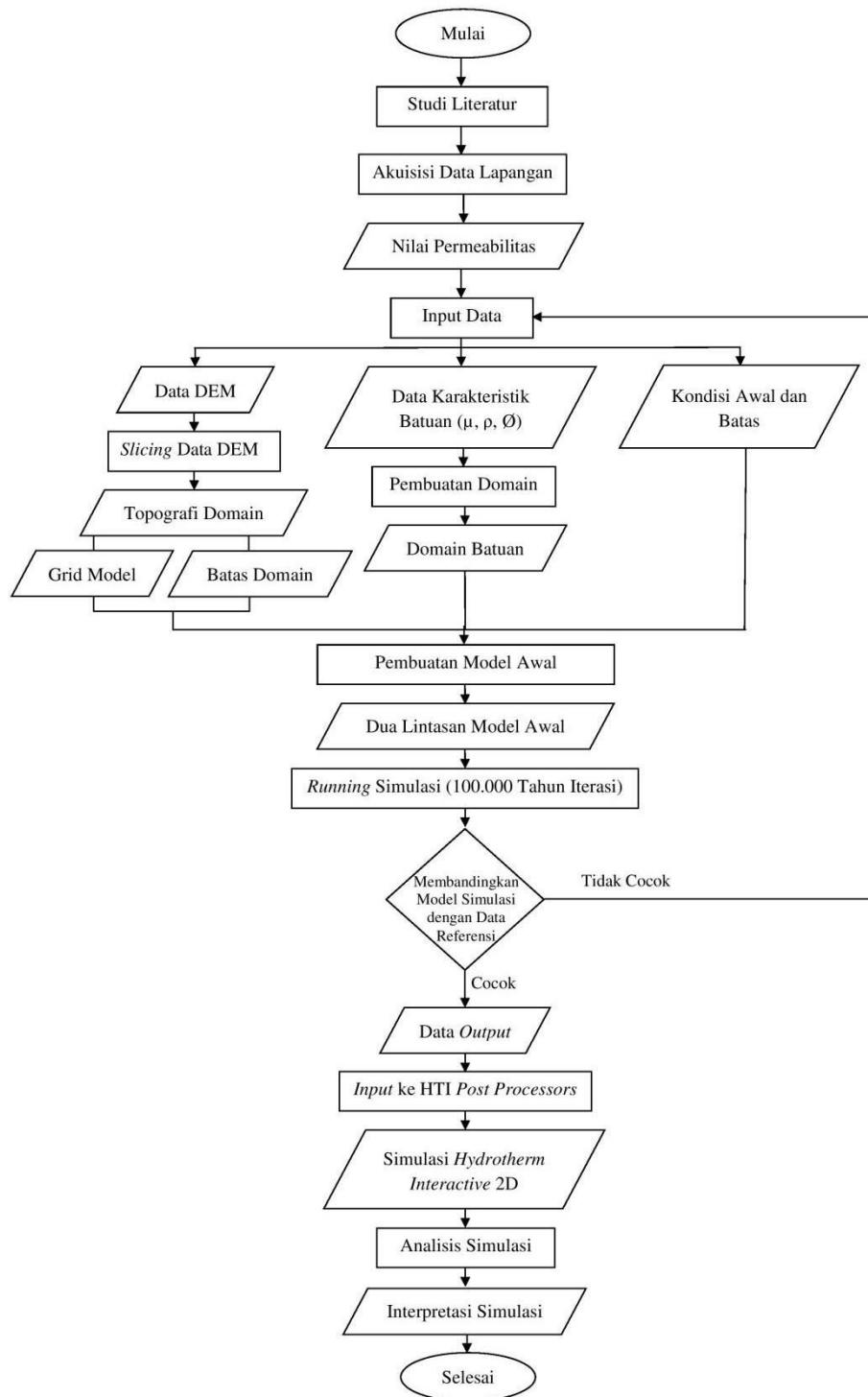
Pada simulasi secara numerik, variabel waktu dan spasi kontinu harus di diskretisasi. Dalam memodelkan sistem panas bumi dengan menggunakan simulator Hydroterm Interactive 2D, sistem yang akan dimodelkan dibagi menjadi sejumlah blok atau elemen yang saling berhubungan sehingga keanekaragaman dalam sifat fluida dan batuan dapat diperhitungkan. Hasil diskretisasi dari persamaan aljabar non-linier dituangkan dalam kelompok persamaan yang diselesaikan dengan menggunakan iterasi Newton-Raphson.

Simulator Hydroterm Interactive 2D dapat menyelesaikan persamaan kesetimbangan massa dan energi yang menggambarkan aliran fluida dan panas dalam sistem multifasa dan multikomponen. Aliran fluida mengikuti hukum Darcy untuk aliran dalam media berpori, dimana flux volume proporsional dengan gradien tekanan. Aliran panas terjadi karena proses secara konduksi dan konveksi. Penggambaran dari kondisi termodinamik berdasarkan pada asumsi kesetimbangan lokal dari semua fasa (cair, gas, padat).

Permeabilitas relatif dideskripsikan sebagai aliran dua fasa. Kondisi batas dapat dituliskan dalam tekanan konstan dan temperatur atau konstan flux massa dan panas. Kode dapat dipecahkan secara baik dengan masalah transien dan persamaan menggunakan integrasi metode finite difference untuk tekanan dan temperatur (saturasi fluida) dalam masing-masing blok, aliran massa dan panas pada sambungan antar blok.

#### 4.5 Diagram Alir

Diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 8.



**Gambar 8.** Diagram Alir Penelitian

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dari data hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dari hasil simulasi numerik yang telah dilakukan, menunjukkan dominasi pergerakan aliran massa fluida air dari puncak dan lereng Gunung Ratai menuju manifestasi dengan suhu  $\pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , sedangkan massa fluida uap dominan tertahan di bawah puncak Gunung Ratai dengan flux tertinggi  $5 \times 10^{-7}\text{ g}/(\text{det.cm}^2)$ .
2. Model permeabilitas pada area penelitian ini menunjukkan adanya area impermeabel yang sangat tebal di bawah Gunung Ratai, berkisar antara 800 – 2000m bahkan bisa lebih dari itu. Hasil ini diinterpretasikan sebagai batuan penutup atau *cap rock* yang sangat tebal, sehingga menyebabkan belum ditemukannya manifestasi berupa fumarola maupun solfatara di area panas bumi Way Ratai pada saat ini.
3. Lokasi potensi sumur eksplorasi berada pada area Padang Cermin pada lintasan pertama, dan area lereng gunung Way Ratai pada lintasan kedua.

### 6.2 Saran

Adapun saran penelitian ini adalah perlunya data tambahan yang akan digunakan sebagai data pendukung dalam merekonstruksi dan memperbaiki model konseptual, yaitu salah satunya adalah membuat simulasi model numerik lainnya di berbagai lintasan area panas bumi Way Ratai yang sudah mempunyai acuan data Magnetotellurik.



## DAFTAR PUSTAKA

- Alzwar, M., Samodra, H., dan Tarigan, J.J. 1987. *Pengantar Dasar Ilmu Gunung Api*. Penerbit Nova, Bandung.
- Basid, A., Andriani, N., dan Arfiyaningsih, S. 2014. Pendugaan Reservoir Sistem Panas bumi dengan Menggunakan Survei Geolistrik Resistivitas dan Self Potensial (Studi Kasus: Daerah Manifestasi Panas bumi di Desa Lombang, Kecamatan Batang-Batang, Sumenep). *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 7(1), 57-70.
- Bauer, J. F., Krumbholz, M., Luijendijk, E., dan Tanner, D. C. 2019. A numerical sensitivity study of how permeability, porosity, geological structure, and hydraulic gradient control the lifetime of a geothermal reservoir. *Solid Earth*, 10. <https://doi.org/10.5194/se-10-2115-2019>
- Brehme, M., Blöcher, G., Cacace, M., Deon, F., Moeck, I., Wiegand, B., dan Huenges, E. 2016. Characterizing permeability structures in geothermal reservoirs – A case study in Lahendong. *PROCEEDINGS, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California*, 22–24.
- Darmawan, I. G. B., Fahlevi, D. I., Yassar, M. F., & Pramudya, F. A. 2021. Identifikasi Zona Reservoir Panas bumi Berdasarkan Analisis Fault

- Fracture Density Citra Digital Elevation Model Alos Palsar Di Gunung Rajabasa. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(2), 119-131.
- Dickson, M. H., dan Fanelli, M. 2013. *Geothermal energy: utilization and technology*. Routledge.
- Donovan, R., Karyanto, K., dan Dewanto, O. 2018. Studi Sifat Termal Batuan Daerah Lapangan Panas bumi Way Ratai Berdasarkan Pengukuran Metode Konduktivitas Termal. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 4, 103–119.
- Djarwanti, N. 2008. Komparasi Koefisien Permeabilitas (k) pada Tanah Kohesif. *Media Teknik Sipil*, 8(1), 21-24.
- Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke, H.H., dan Fertl, W. H. 1982. *Handbook of Geothermal Energy. Gulf. Houston 1-21*.
- Fadhly, A., Syafri, I. dan Abdurrokhim. 2017. Zonasi Anomali Unsur Geokimia di Weda, Kabupaten Halmahera Tengah, Maluku Utara Berdasarkan Data Univariat dan Multivariat. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 15(3), 243-254.
- Faust, C. R., dan Mercer, J. W. 1979. Geothermal Reservoir Simulation: 1. Mathematical Models For Liquid and Vapor-Dominated Hydrothermal Systems. *Water resources research*, 15(1), 23-30.
- Gudjonsdottir, M., Palsson, H., Eliasson, J., dan Saevarsdottir, G. 2015. Calculation of relative permeabilities from field data and comparison to laboratory measurements. *Geothermics*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.10.004>
- Haerudin, N., Karyanto, dan Kuntoro, Y. 2016. Radon and Thoron Mapping To Delineate The Local-Fault In The Way Ratai Geothermal Field Lampung

Indonesia. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, 4804–4809.

Haerudin N, Raflesia F, dan Rustadi. 2017. Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro dan *Poisson's Ratio* Di Lapangan Panas bumi *Desert Peak* Sebelum dan Sesudah *Stimulasi Enhanced Geothermal System* (EGS). *Jurnal Geofisika Eksplorasi Vol. 3/No. 2*

Ibradi, A. D., Sutriyono, E., dan Jati, S. N. 2019. Kajian Geokimia Mata Air Panas Sebagai Manifestasi Geothermal Daerah Kamojang, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat. *Prosiding Applicable Innovation of Engineering and Science Research*, 2019, 1126-1130.

Karyanto. 2003. *Pencitraan Bawah Permukaan Daerah Panas bumi Way Ratai Lampung Dengan Metode Tahanan Jenis 2 Dimensi*. 9, 55–59.

Karyanto, dan Darmawan, I. G. B. 2021. Pengujian Prototipe Instrumen Pengukuran Gradien Termal di Lapangan Panas bumi Padang Cermin Pesawaran. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 9, 175–184.

Karyanto, K., Haerudin, N., Suharno, S., Darmawan, I., Adli, M., & Manurung, P. 2021. Numerical modeling for the steady-state condition of the geothermal system in Way Ratai. *Journal of Applied Science and Engineering*, 25(3), 447-456.

Karyanto, Haerudin, N., Mulyasari, R., Suharno, dan Manurung, P. 2020. Geothermal Potential Assessment of Way Ratai Area Based on Thermal Conductivity Measurement to Measure Thermal Properties of Rocks. *Journal of the Earth and Space Physics*, 45, 89–98.

- Karyanto, Sarkowi, M., Hidayatika, A., Ukhti, F., Haerudin, N., dan Darmawan, I. G. B. 2020. Analisis Heat Loss Dan Pemetaan Sebaran Suhu Permukaan Manifestasi Untuk Menghitung Sumber Daya Spekulatif Energi Listrik Pada Sistem Panas bumi Way Ratai. *SINTA* 3. Diambil dari <http://sinta.eng.unila.ac.id/prosiding/index.php/ojs/article/view/6/19>
- Katili, J., A. 1973. *On Fitting Certain Geological and Geophysical Feature Island Arcs to the New Global Tectonics*. Univ. of W. Australia Press.
- Kristensen, L., Hjuler, M. L., Frykman, P., Olivarius, M., Weibel, R., Nielsen, L. H., dan Mathiesen, A. 2016. Pre-drilling assessments of average porosity and permeability in the geothermal reservoirs of the Danish area. *Geothermal Energy*, 4. <https://doi.org/10.1186/s40517-016-0048-6>
- Lamur, A., Kendrick, J. E., Eggertsson, G. H., Wall, R. J., Ashworth, J. D., dan Lavallée, Y. 2017. The permeability of fractured rocks in pressurised volcanic and geothermal systems. *Scientific Reports*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05460-4>
- Lipsey, L., Pluymaekers, M., Goldberg, T., van Oversteeg, K., Ghazaryan, L., Cloetingh, S., dan van Wees, J. D. 2016. Numerical modelling of thermal convection in the Luttelgeest carbonate platform, the Netherlands. *Geothermics*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.05.002>
- Mangga, S. A., Amirudin, Suwarti, T., Gafoer, S., dan Sidarto. 1993. *Geological Map of Tanjungkarang, Sumatera*. Bandung: Geological Research and Development Centre.
- Naryanto, H., S. 1997. Kegempaan di Daerah Sumatera. *Alami*. 23.

- Pratama, W., dan Rustadi. 2019. Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner-Schlumberger untuk Mengidentifikasi Litologi Batuan Bawah Permukaan dan Fluida Panas bumi Way Ratai di Area Manifestasi Padok di Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5, 30–44.
- Putri, M. K., Suharno, dan Hidayatika, A. 2014. Introduction to Geothermal System of Way Ratai. *Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition*, 1–5.
- Rony, P. P. S., Didit, A. H., Hutabarat, J. dan Kusnadi, D. 2019. Sistem Panas bumi Non-Vulkanik Daerah Buntuna, Tolitoli, Sulawesi Tengah, Berdasarkan Pendekatan Geologi dan Geokimia Air Panas. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 3(4), 254-260.
- Saibi, H. 2011. 3D Numerical model of the Obama hydrothermal-geothermal system, Southwestern Japan. *Computational Geosciences*, 15, 709–719.
- Setyawan, A., Ehara, S., Fujimitsu, Y., dan Nishijima, J. 2010. An Estimate of the Resources Potential of Ungaran Geothermal Prospect for Indonesia Power Generation. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- Suharno, S., Amukti, R., Hidayatika, A., dan Putri, M. K. 2015. Geothermal Prospect of Padang Cermin Pesawaran Lampung Province, Indonesia. *Proceedings World Geothermal Congress*, 1–7.
- Suryadi, Haerudin, N., Karyanto, dan Sudrajat, Y. 2017. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Lapangan Panas bumi Way Ratai Berdasarkan Data Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3, 85–97.