

**ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE VOLUMETRIK BERDASARKAN
HASIL SIMULASI NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA
(STUDI KASUS: PROSPEK UTARA)**

(Skripsi)

Oleh

**Ramot Efraim Frederick Togatorop
2015051039**



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE VOLUMETRIK BERDASARKAN
HASIL SIMULASI NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA
(STUDI KASUS: PROSPEK UTARA)**

Oleh

Ramot Efraim Frederick Togatorop

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK BERDASARKAN HASIL SIMULASI NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK UTARA)

Oleh

RAMOT EFRAIM FREDERICK TOGATOROP

Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa merupakan salah satu daerah eksplorasi panas bumi yang memiliki potensi energi yang cukup tinggi yang terletak di Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Namun, lapangan panas bumi Gunung Rajabasa saat ini masih dalam proses pengembangan dan belum meningkatnya status tahapan eksplorasi karena belum adanya sumur uji atau sumur eksplorasi. Penelitian bertujuan untuk melakukan simulasi numerik guna mendapatkan model aliran fluida hidrotermal, menentukan lokasi potensi sumur eksplorasi (*well targeting*), dan menghitung potensi energi listrik pada prospek Utara lapangan panas bumi Gunung Rajabasa menggunakan metode volumetrik. Berdasarkan hasil simulasi numerik didapatkan bahwa pada lintasan 1 dan 2, aliran panas dan fluidanya mengarah ke puncak Gunung Rajabasa dari Barat Laut ke Tenggara yang ditandai dengan keberadaan manifestasi berupa fumarola. Sedangkan pada lintasan 3, pergerakan fluida dan panasnya mengarah dari Barat ke Timur dan penyebarannya tidak sampai permukaan, kondisi tersebut sesuai dengan kondisi sebenarnya, yaitu tidak adanya manifestasi berupa fumarola. Berdasarkan *dummy well* dari ketiga lintasan, diperkirakan indikasi *steam cap* pada lintasan 1 berada pada kedalaman 300 – 900 m, lintasan 2 berada pada kedalaman 400 – 600 m, dan lintasan 3 berada pada kedalaman 1.600 – 2.700 m. Hasil perhitungan energi panas bumi Gunung Rajabasa menggunakan metode volumetrik dengan periode waktu 30 tahun adalah sebesar 207,60 MWe.

Kata Kunci: Panas bumi, Rajabasa, Simulasi numerik, Volumetrik

ABSTRACT

ESTIMATION OF GEOTHERMAL ENERGY POTENTIAL USING A VOLUMETRIC METHOD BASED ON NUMERICAL SIMULATION RESULTS ON MOUNT RAJASA (CASE STUDY: NORTH PROSPECT)

By

RAMOT EFRAIM FREDERICK TOGATOROP

The Mount Rajabasa geothermal field is one of the geothermal exploration areas that has quite high energy potential and is located in Kalianda District, South Lampung Regency, Lampung Province. However, the Mount Rajabasa geothermal field is currently still in the development process and has not yet advanced to exploration stage status because there are no test wells or exploration wells. The research aims to carry out numerical simulations to obtain a hydrothermal fluid flow model, determine the location of potential exploration wells (well targeting), and calculate the potential electrical energy in the north prospect of the Mount Rajabasa geothermal field using the volumetric method. Based on the numerical simulation results, it was found that on routes 1 and 2, the heat and fluid flow lead to the peak of Mount Rajabasa from northwest to southeast, which is characterized by the presence of manifestations in the form of fumaroles. Meanwhile, in path 3, the movement of fluid and heat leads from west to east, and the distribution does not reach the surface. This condition is caused by the actual conditions, namely the absence of manifestations in the form of fumaroles. Based on the dummy wells of the three tracks, it is estimated that the steam cap indication on track 1 is at a depth of 300–900 m, track 2 is at a depth of 400–600 m, and track 3 is at a depth of 1,600–2,700 m. The results of calculating Mount Rajabasa's geothermal energy using the volumetric method for 30 years are 207.60 MWe.

Keywords: Geothermal, Rajabasa, Numerical simulation, Volumetrics

Judul Skripsi : **ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI
MENGUNAKAN METODE VOLUMETRIK
BERDASARKAN HASIL SIMULASI
NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA (STUDI
KASUS: PROSPEK UTARA)**

Nama Mahasiswa : **Ramot Efraim Frederick Togatorop**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015051039**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



MENYETUJUI,

1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

Dr. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912301998021001

Pembimbing 2

I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.
NIP. 198805052019031019

2. **Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

Dr. Karyanto, S.Si., M.T.
NIP. 196912301998021001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

Anggota : **Prof. Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU.**

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509782001121002

Tanggal Ujian Skripsi : **2 Februari 2024**

PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini 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.

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

Bandar Lampung, 6 Maret 2024



Ramot Efrain Frederick Togatorop
NPM. 2015051039

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bangunan, Lampung Selatan pada tanggal 24 Oktober 2002. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Marihot Togatorop dan Ibu Masrela Lumban Gaol. Penulis menyelesaikan pendidikan Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Dharma Wanita Persatuan Kecamatan

Palas pada tahun 2007 sampai 2008. Kemudian dilanjutkan ke Sekolah Dasar (SD) di SD Negeri 1 Palas pada tahun 2008 yang kemudian pindah ke SD Negeri 3 Way Urang pada tahun 2009 sampai 2014. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Kalianda pada tahun 2014 sampai 2017 dan kemudian melanjutkan pendidikan di jenjang Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Kalianda pada tahun 2017 sampai tahun 2020. Pada tahun 2020 penulis diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif dalam beberapa organisasi kemahasiswaan, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG BHUWANA) sebagai anggota Bidang Sains dan Teknologi pada periode 2021/2022 dan 2022/2023, *Society Of Exploration Geophysicst* (SEG) SC Universitas Lampung sebagai anggota Divisi *Education* periode 2022/2023 dan 2023/2024, dan *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG) SC Universitas Lampung sebagai anggota departemen *Finance and Government*

periode 2022/2023, dan Wakil Presiden *American Association of Petroleum Geologists* (AAPG) pada periode 2023/2024.

Dalam bidang keilmuan dan akademik penulis aktif dalam hal menulis, seperti menulis PKM dan jurnal. Selain itu, penulis juga pernah menjadi asisten praktikum pada beberapa mata kuliah yang diantaranya, Geologi Struktur, Metode Gayaberat, Perpetaan, Analisis Sinyal Geofisika, dan Elektronika Geofisika. Pada bulan Agustus sampai Desember 2022 penulis pernah mengikuti kegiatan Magang dan Studi Independen Bersertifikat (MSIB) kampus merdeka yang diadakan oleh Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan (Kemendikbud) pada perusahaan PT. Ruang Raya Indonesia dengan program *Backend Engineering*.

Pada bulan Januari 2023 penulis melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) oleh Universitas Lampung sehingga dapat menerapkan salah satu Dharma Perguruan Tinggi yaitu Pengabdian Kepada Masyarakat dengan mengadakan program yang bermanfaat bagi masyarakat di Kelurahan Fajar Bulan, Way Tenong, Lampung Barat. Pada saat melaksanakan KKN penulis mengusung 2 program kerja yang sesuai dengan keilmuan penulis, yaitu “Pembuatan Peta Kerawanan Bencana” dan “Sosialisasi Mitigasi Bencana untuk Meningkatkan Budaya Sadar Bencana”. Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dengan judul **“Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Menggunakan Metode Volumetrik Berdasarkan Hasil Simulasi Numerik di Gunung Rajabasa (Studi Kasus: Prospek Utara)”**.

PERSEMBAHAN

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terselesainya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk:

BAPAK DAN IBU TERCINTA

MARIHOT TOGATOROP

&

MASRELA LUMBAN GAOL

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat, dan segala dukungan yang tidak terhingga.

ADIK TERCINTA

FERDINAND TOGATOROP

&

RUBEN MARTUA TOGATOROP

Yang telah memberikan doa, semangat dan dukungannya.

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

*Percayalah kepada TUHAN dan lakukanlah yang baik,
diamlah di negeri dan berlakulah setia, dan bergembiralah
karena TUHAN; maka Ia akan memberikan kepadamu apa
yang diinginkan hatimu. Do your*

~Mazmur 37 : 3 – 4~

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan anugrah-Nya penulis dapat menyusun dan menyelesaikan skripsi dengan judul **“ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK BERDASARKAN HASIL SIMULASI NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK UTARA)”**. Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah terlibat dalam penyusunan skripsi ini baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis pun menyadari mungkin masih terdapat kekurangan di dalam skripsi ini sehingga sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga semua yang tertulis di dalam skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada siapapun, baik di kalangan umum maupun akademisi untuk kemajuan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 6 Maret 2024

Penulis



Ramot Efraim Frederick Togatorop
NPM. 2015051039

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan anugrah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK BERDASARKAN HASIL SIMULASI NUMERIK DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK UTARA)”**. Dalam pelaksanaan dan penulisan skripsi ini penulis menyadari bahwa selesainya proses ini tidak lepas dari bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa karena selalu memberikan rahmat dan anugrah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan ini dengan baik.
2. Kepada kedua orang tua penulis, yaitu Bapak Marihot Togatorop dan Ibu Masrela Lumban Gaol, S.Pd. yang senantiasa memberikan doa, dukungan, semangat, dan motivasi serta kasih sayang tiada hentinya selama ini kepada penulis.
3. Kepada kedua adik penulis, yaitu Ferdinand Togatorop dan Ruben Martua Togatorop yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan semangat selama ini kepada penulis.
4. Bapak Dr. Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung dan pembimbing satu penulis yang telah meluangkan waktu, membimbing, memberikan arahan, saran, dan masukan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
5. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng. selaku dosen pembimbing akademik dan pembimbing dua yang telah membimbing, meluangkan waktu,

memberikan arahan, saran, dan masukan serta banyak memberikan motivasi dari awal penulis memasuki dunia perkuliahan hingga penulis dapat menyelesaikan pendidikannya.

6. Bapak Prof. Dr. Ir. Muh Sarkowi, S.Si., M.Si., IPU. selaku penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan saran dan masukan atas skripsi ini, sehingga menjadikan skripsi ini menjadi lebih baik.
7. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan wawasan yang sangat berharga bagi penulis.
8. Keluarga Besar Teknik Geofisika 2020 (PATAKIS) yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan motivasi selama perkuliahan.
9. Serta semua pihak yang terlibat dalam penyusunan skripsi ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih.

Bandar Lampung, 6 Maret 2024

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ramot Efraim Frederick Togatorop', with a stylized flourish at the end.

Ramot Efraim Frederick Togatorop

NPM. 2015051039

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
PENGESAHAN.....	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xii
SANWACANA	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Lokasi Daerah Penelitian.....	4
2.2 Fisiografi dan Morfologi	4
2.3 Geologi dan Stratigrafi Regional.....	6
2.4 Struktur Geologi	8

2.5	Manifestasi Rajabasa	10
2.6	Penelitian Terdahulu	11
III.	TEORI DASAR.....	14
3.1	Sistem Panas Bumi	14
3.2	Sifat Batuan Panas Bumi	15
3.2.1	Porositas	15
3.2.2	Permeabilitas	16
3.2.3	Densitas	18
3.2.4	Kalor Jenis.....	19
3.2.5	Konduktivitas Panas Batuan	20
3.3	Metode Volumetrik	20
3.3.1	Panas yang Tersimpan dalam Batuan	21
3.3.2	Panas yang Tersimpan dalam Fluida.....	21
3.3.3	Perhitungan Metode Volumetrik.....	23
3.4	Persamaan Aliran Air Tanah	24
3.5	Persamaan Perpindahan Panas.....	26
3.6	Solusi Persamaan Numerik.....	27
3.6.1	Algoritma Newton-Raphson	27
3.7	Solusi Persamaan Linier	28
IV.	METODE PENELITIAN.....	33
4.1	Tempat dan Waktu Penelitian	33
4.2	Alat dan Bahan	33
4.3	Jadwal Kegiatan Penelitian.....	34
4.4	Prosedur Penelitian	35
4.5	Diagram Alir.....	38
V.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	40
5.1	Karakteristik Batuan	40
5.2	Akuisisi dan Pengukuran Data Lapangan.....	43
5.2.1	Data Densitas, Porositas, dan Permeabilitas Batuan	43
5.2.2	Data Suhu	46
5.3	Pembahasan	48
5.3.1	Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 1	48

5.3.2 Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 2	56
5.3.3 Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 3	64
5.3.4 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 1	73
5.3.5 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 2	75
5.3.6 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 3	77
5.3.7 Perhitungan Potensi Sumber Energi Panas Bumi	79
VI. KESIMPULAN DAN SARAN.....	85
6.1 Kesimpulan.....	85
6.2 Saran	85
DAFTAR PUSTAKA	87

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Penelitian terdahulu	11
2. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)	19
3. Jadwal kegiatan penelitian	34
4. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 1	40
5. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 2	41
6. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 3	42
7. Hasil pengukuran densitas dan porositas	45
8. Hasil pengukuran permeabilitas	46
9. Hasil pengukuran suhu	47
10. Parameter potensi sumber energi panas bumi pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa	82

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian	4
2. Tatanan fisiografi daerah Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993)	5
3. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Mangga dkk., 1993)	6
4. Tatanan geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993)	7
5. Peta struktur geologi regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021; Mangga dkk., 1993)	9
6. Peta sebaran manifestasi daerah penelitian (modifikasi dari Mussofan dkk., 2016; Mangga dkk., 1993)	10
7. Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2004)	15
8. Ilustrasi porositas batuan (Van Bemmelen, 1949)	16
9. Prinsip uji permeabilitas falling head (Imamuddin dan Al Hanif, 2017)	17
10. Diagram Alir	39
11. Peta persebaran titik pengukuran pada daerah peneltian	43
12. Proses pengukuran permeabilitas di laboratorium	44
13. Proses pengukuran suhu pada lokasi penelitian	47
14. Profil sayatan geologi dan parameter input model simulasi numerik lintasan 1	48
15. Model sebaran panas lintasan 1 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	50
16. Model sebaran fase fluida lintasan 1 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	51

17.	Hasil simulasi model aliran massa fluida air lintasan 1 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	53
18.	Hasil simulasi model aliran massa fluida uap lintasan 1 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	55
19.	Perbandingan antara <i>dummy well</i> 3 pada lintasan 1 dengan <i>shallow drill hole</i> RJB-1	56
20.	Profil sayatan geologi dan parameter input model simulasi numerik lintasan 2	57
21.	Model sebaran panas lintasan 2 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun.....	59
22.	Model sebaran fase fluida pada lintasan 2 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	60
23.	Hasil simulasi model aliran massa fluida air lintasan 2 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	62
24.	Model sebaran fluida uap lintasan 2 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	63
25.	Profil sayatan geologi dan parameter input model simulasi numerik lintasan 3	64
26.	Model sebaran panas lintasan 3 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun.....	66
27.	Model sebaran fase fluida lintasan 3 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	68
28.	Hasil simulasi model aliran massa fluida air lintasan 3 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	70
29.	Hasil simulasi model aliran massa fluida uap lintasan 3 pada iterasi (a)1.000, (b)10.000, (c)20.000, (d)30.000, dan (e)40.000 tahun	72
30.	Titik <i>dummy well</i> lintasan 1	73
31.	Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 1	74
32.	Titik <i>dummy well</i> lintasan 2	75
33.	Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 2	76
34.	Titik <i>dummy well</i> lintasan 3	77
35.	Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 3	78

36.	Zona potensi reservoir lintasan 1	79
37.	Zona potensi reservoir lintasan 2	79
38.	Zona potensi reservoir lintasan 3	80
39.	Estimasi potensi reservoir panas bumi Gunung Rajabasa	80

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Energi panas bumi merupakan energi panas alami dari dalam bumi yang ditransfer ke permukaan melalui konduksi dan konveksi. Terdapat beberapa pengontrol pada sistem panas bumi, yaitu sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, lapisan penutup, keberadaan struktur geologi dan daerah resapan air (Suharno, 2010). Dalam sistem panas bumi sesar menjadi kontrol dalam siklus hidrologi (Raflesia dkk., 2017).

Indonesia memiliki potensi sumber daya alam yang sangat besar terutama potensi panas bumi. Hal ini berkaitan dengan wilayah Indonesia yang terletak di area subduksi. Diperkirakan Indonesia memiliki potensi panas bumi sekitar 23,7 GW, yang tersebar di 30 provinsi dan 331 titik lokasi. Potensi panas bumi Indonesia diperkirakan mencapai 40% dari sumber daya panas bumi dunia.

Salah satu daerah di Indonesia yang memiliki potensi panas bumi adalah Provinsi Lampung. Diperkirakan Provinsi Lampung memiliki potensi panas bumi mencapai 734 MW dan cadangan sebesar 1,312 MW. Panas bumi tersebar di 13 lokasi di enam kabupaten atau kota di Lampung. Salah satunya berada di daerah Kalianda, Lampung Selatan tepatnya pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa. Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa merupakan bagian dari kompleks Gunung Rajabasa, gunung api Kuarter yang terletak ±130 km ke arah timur dari Patahan Sumatra dan busur vulkanik Bukit Barisan (Ditjen EBTKE, 2017). Saat ini, lapangan panas bumi Gunung Rajabasa masih dalam proses pengembangan. Belum meningkatnya status tahapan eksplorasi pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa salah satunya

diakibatkan karena belum adanya sumur uji atau sumur eksplorasi sehingga hal ini yang melatarbelakangi penelitian ini. Penelitian sebelumnya oleh Darmawan dkk. (2023) melakukan pemodelan aliran fluida hidrotermal menggunakan simulasi numerik yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi zona potensi reservoir pada Lapangan Panas bumi Gunung Rajabasa. Pada tahapan ini, pemodelan numerik terkait zona reservoir panas bumi menjadi cukup penting karena dapat digunakan dalam proses penentuan lokasi sumur eksplorasi/uji. Pemodelan mengenai pola aliran fluida dan sebarannya dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan *software* Hydrotherm Interactive yang dikorelasikan dengan data penelitian sebelumnya untuk mendapatkan gambaran model panas bumi secara konseptual.

Untuk memberikan informasi tentang kelayakan suatu lapangan panas bumi untuk pengembangan lebih lanjut sebagai PLTP, estimasi awal mengenai potensi cadangan panas bumi sangat penting. Estimasi potensi listrik panas bumi dapat dilakukan dengan beberapa metode, yaitu metode perbandingan dan metode volumetrik (Suhartono, 2012). Pada penelitian ini dilakukan perhitungan menggunakan metode volumetrik untuk mengetahui potensi energi panas bumi dengan pemodelan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi numerik untuk mendapatkan model aliran fluida hidrotermal pada prospek Utara lapangan panas bumi Gunung Rajabasa.
2. Menentukan lokasi potensi sumur eksplorasi (*well targeting*) pada prospek Utara lapangan panas bumi Gunung Rajabasa.
3. Menghitung potensi energi listrik pada prospek Utara lapangan panas bumi Gunung Rajabasa menggunakan metode volumetrik.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah melakukan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal menggunakan *software* Hydrotherm Interactive 2D sebanyak 3

lintasan, yaitu 2 lintasan berarah barat laut-tenggara dan 1 lintasan berarah pada barat-timur prospek Utara lapangan panas bumi Gunung Rajabasa. Data yang digunakan sebagai parameter input adalah data hasil pengukuran suhu di lapangan dan data parameter fisik batuan hasil pengujian di laboratorium.

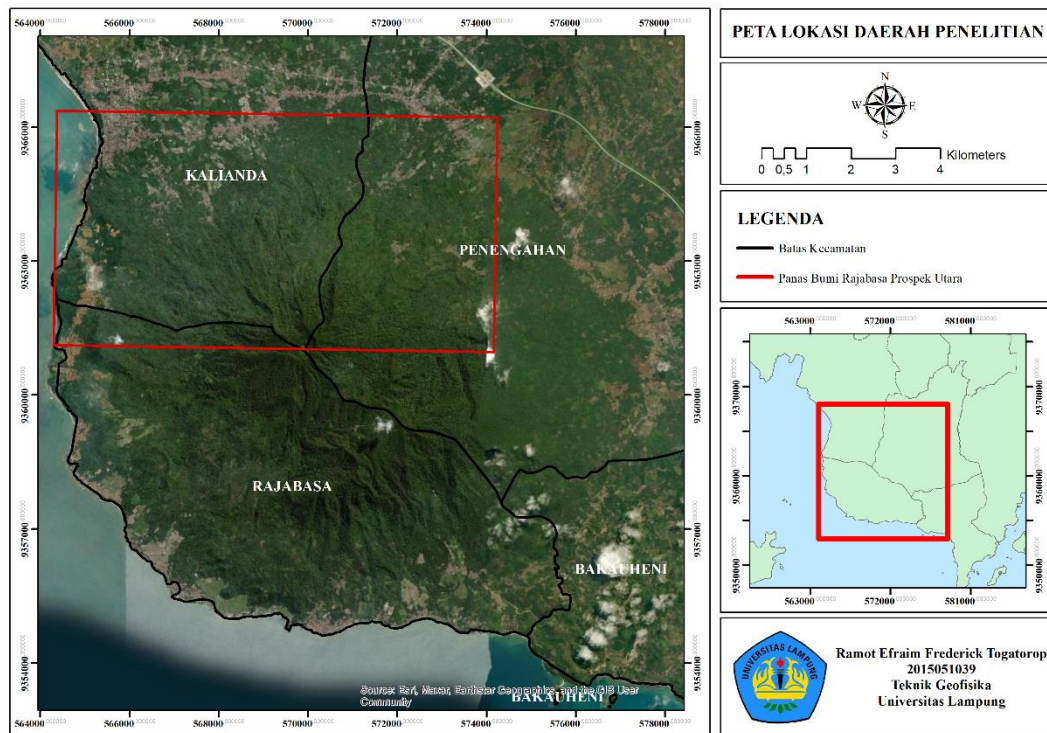
1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian lapangan panas bumi Gunung Rajabasa memberikan manfaat yang signifikan dalam pengembangan lapangan tersebut. Penelitian ini menghasilkan model aliran fluida hidrotermal dan informasi geologi yang dapat digunakan untuk memahami kondisi bawah permukaan dan potensi panas bumi di lapangan tersebut. Model ini juga dapat digunakan untuk meningkatkan fokus area potensi pengeboran sumur dan area prospek panas bumi, sehingga dapat mengurangi risiko eksplorasi. Selain itu, penelitian ini juga menghasilkan data pendukung yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemanfaatan energi panas bumi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

Lokasi daerah penelitian berada pada daerah Gunung Rajabasa secara geografis berada di Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Secara geografis, daerah ini terletak pada 569286.02 m E dan 9360833.30 m S. Adapun peta daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

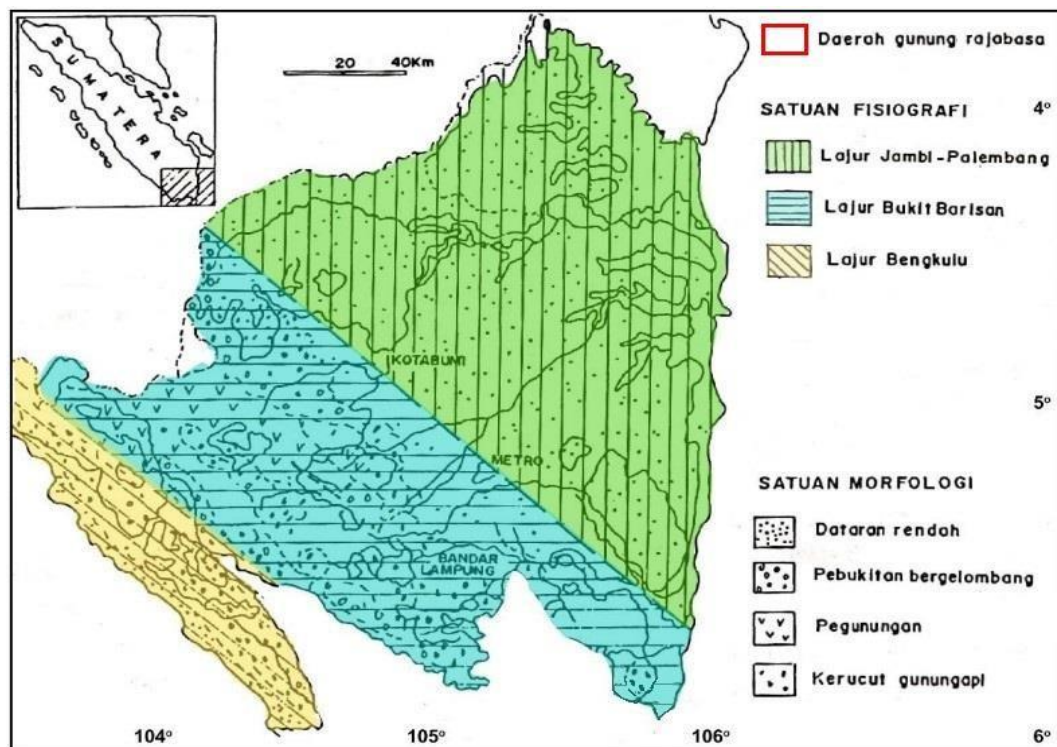


Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian

2.2 Fisiografi dan Morfologi

Provinsi Lampung terbagi menjadi tiga satuan fisiografi yang dapat dilihat pada Gambar 2, yaitu Lajur Jambi - Palembang, Lajur Bukit Barisan, dan Lajur Bengkulu. Kegiatan tektonik pada daerah Lampung menyebabkan terbentuknya

cekungan sedimen yang berumur tersier yang berada di belakang busur Gunung api atau sebelah timur Pegunungan Bukit Barisan yang termasuk ke dalam cekungan busur belakang. Pada Pegunungan Bukit Barisan terdapat luas lembar, yaitu batuan alas beku, batuan malihan, dan Gunung api muda. Keadaan lereng pada daerah Lampung memiliki lereng yang bervariasi, mulai dari datar, landai, miring, dan terjal. Pada Pegunungan Bukit Barisan memiliki kurang lebih 25 sampai 30% luas lembar yaitu batuan alas beku, malihan dan batuan Gunung api muda. Pada umumnya memiliki lereng – lereng yang curam dengan ketinggian mencapai 500 m sampai 1.680 m di atas permukaan laut. Untuk topografi pada daerah pantai beraneka ragam dan umumnya terdiri atas perbukitan kasar, batuan Gunung api tersier dan kuarter serta batuan terobosan yang memiliki ketinggian mencapai 500 meter di atas permukaan laut. Daerah Gunung Rajabasa termasuk ke dalam daerah fisiografi Lajur Bukit Barisan (Mangga dkk., 1993).



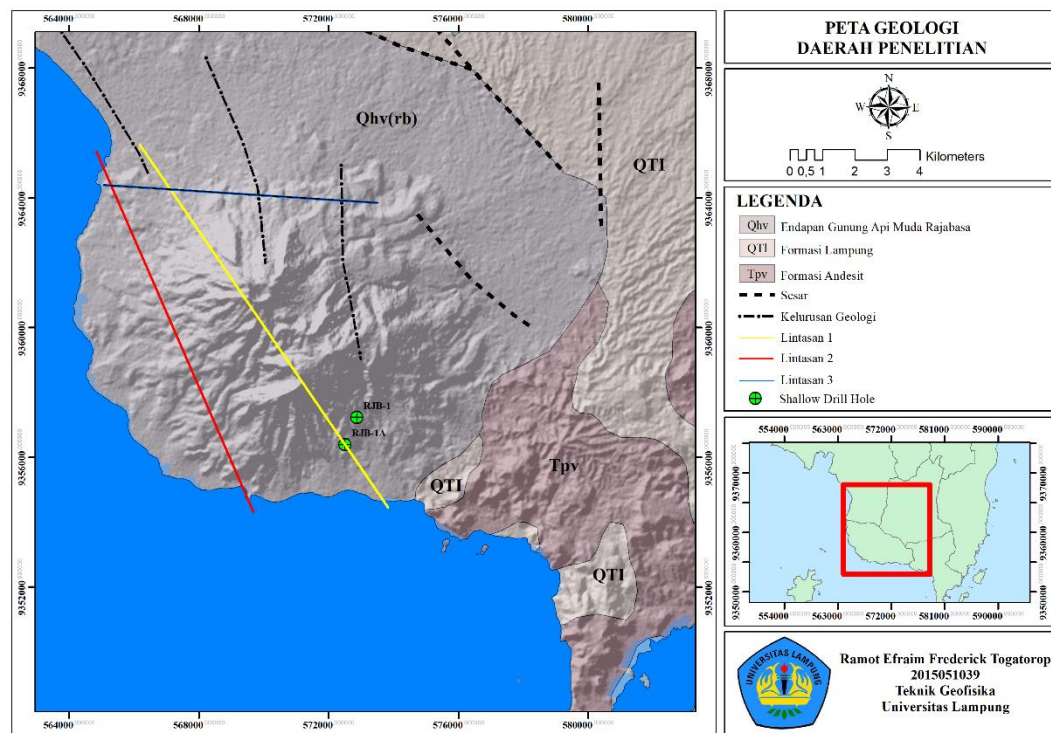
Gambar 2. Tatanan fisiografi daerah Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993)

Provinsi Lampung terbagi menjadi empat satuan morfologi, yaitu dataran rendah, perbukitan bergelombang, pegunungan, dan kerucut gunung api. Morfologi dari daerah penelitian adalah pegunungan berkerucut atau kerucut gunung api, yang terbentuk dari pengaruh dari batuan penyusun adalah batuan vulkanik muda dari

aktivitas magmatisme dan pengangkatan. Pada dasarnya, morfologi dari Gunung Rajabasa adalah gunung api strato yang berbentuk kerucut terpancung, yang mana bentukan ini dibangun oleh pergantian perlapisan antara aliran lava dan bahan lepas (Mangga dkk., 1993).

2.3 Geologi dan Stratigrafi Regional

Lokasi penelitian berada pada daerah Gunung Rajabasa, Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung berada pada geologi regional Lembar Tanjung Karang. Berikut ini merupakan peta geologi regional daerah panas bumi Gunung Rajabasa ditunjukkan pada Gambar 3:

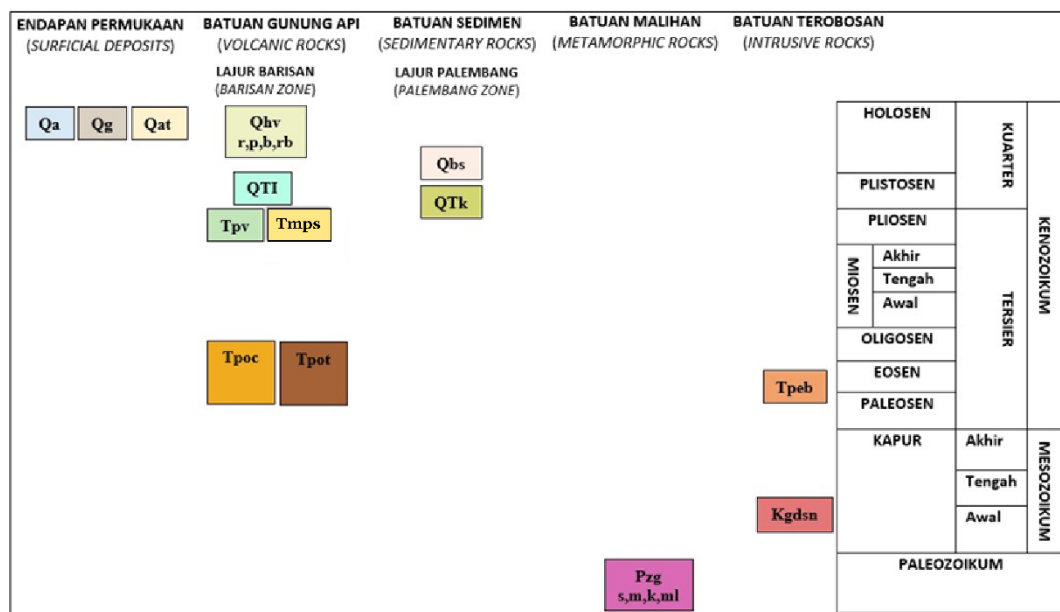


Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Mangga dkk., 1993)

Berdasarkan peta geologi yang ditunjukkan oleh Gambar 3 terlihat lokasi penelitian berada pada Formasi Satuan Gunung api Muda (Qhv) yang tersusun dari lava berkomposisi andesit-basal, breksi dan tuf dan terdapat juga Formasi Lampung (QTI) dan Andesit Tersier (Tpv) yang berada disekelilingnya. Ketiga formasi ini merupakan korelasi satuan peta batuan gunung api dan masuk dalam lajur barisan jika dilihat pada peta geologi lembar Tanjungkarang, Sumatera. Formasi batuan

Gunung Rajabasa masuk ke dalam umur Kuartar yaitu Holosen (Mangga dkk., 1993).

Menurut Kusumasari (2011), kompleks Gunung Rajabasa terdiri dari Gunung Tangkil, Gunung Pematang Taman, Gunung Balerang, dan Gunung Rajabasa. Pembagian ini didasarkan pada hasil beberapa penelitian terdahulu terkait penyebaran produk vulkanik di kompleks Gunung Rajabasa. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Mangga dkk. (1993) yang dituangkan dalam Peta Geologi Lembar Tanjung Karang, Sumatera sebagai berikut:



Gambar 4. Tatanan geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993)

Berdasarkan pada peta geologi tersebut, stratigrafi daerah penelitian dan sekitarnya merupakan batuan yang terbentuk pada Pliosen hingga Holosen. Berikut merupakan satuan batuan dari tua ke muda pada daerah penelitian:

1. Satuan Batuan Andesit, yang terbentuk pada umur Pliosen. Satuan batuan ini berupa lava andesit dengan kekar lembar ataupun kekar kolom. Diperkirakan satuan ini merupakan produk dari Gunung Tangkil.
2. Satuan Formasi Lampung, yang terbentuk pada akhir Pliosen hingga Plistosen. Satuan batuan ini berupa tuf berbatuapung, tuf riolitik, tuf padu tufit, batulempung tufan, dan batupasir tufan.

3. Satuan Endapan Gunung api Muda, yang terbentuk pada umur Holosen. Satuan batuan ini berupa lava (andesit-basalt), breksi, dan tuf. Diperkirakan satuan batuan ini merupakan produk hasil erupsi Gunung Pematang Taman, Gunung Balerang, dan Gunung Rajabasa.

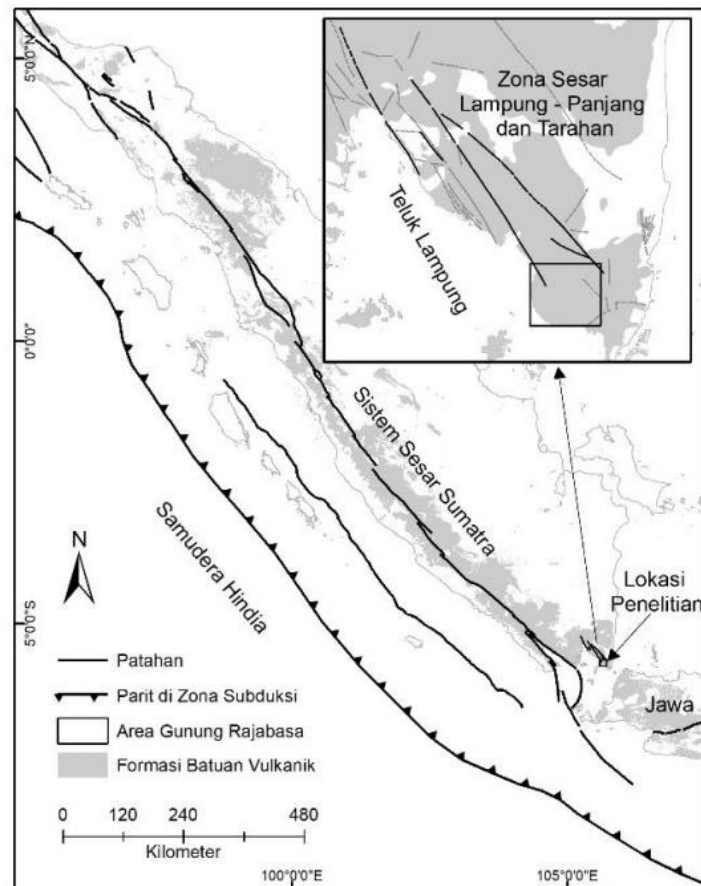
Menurut Suswati dkk. (2001) produk vulkanik kompleks Gunung Rajabasa dan sekitarnya dibagi kedalam empat periode, yaitu Satuan Vulkanik Tua Gunung Tangkil, Satuan Vulkanik Tua Gunung Pematang Taman, lalu produk Gunung Balerang, serta produk Gunung Rajabasa sendiri. Secara umum produk Gunung Rajabasa didominasi oleh batuan lava, sedangkan piroklastik hadir hanya pada saat awal aktivitasnya.

2.4 Struktur Geologi

Tektonik dan topografi daerah penelitian ini sangat kompleks. Vulkanisme terkait subduksi yang terkenal di Indonesia salah satunya adalah keterjadian gunung api Kuartar yang berada di sepanjang busur Sunda dan Banda Gambar 5. Adanya transisi dari depan ke subduksi miring di Selat Sunda diperkirakan sebagai daerah perluasan yang merupakan hasil gerak berarah barat laut dari irisan busur di antara parit dan Sistem Sesar Sumatra (Barber dkk., 2005). Secara regional sesar kompleks yang banyak dijumpai adalah sesar-sesar berarah Barat Laut – Tenggara. Sesar tersebut tersebar sangat luas dengan panjang masing-masing sesar mencapai 25 – 35 km yang banyak ditemukan di Lajur Barisan, di bagian Barat Daya, tetapi kemungkinan besar terdapat di bawah runtunan penutup endapan Kuartar. Sesar-sesar yang terpetakan di Lajur Barisan memiliki sejarah yang kompleks, dibuktikan dengan gerakan-gerakan turun dan berbalik (Mangga dkk., 1993).

Struktur sesar yang mengontrol panas bumi di kompleks Gunung Rajabasa adalah sesar Lampung yang berarah Barat-Laut-Tenggara dan sesar lokal Timur-Laut-Barat Daya. Keberadaan struktur sesar pada daerah panas bumi dianggap penting sebab dapat menyokong tingginya permeabilitas batuan di zona reservoir panas bumi. Terdapat dua sesar, yaitu Sesar Lampung dan sesar-sesar lokal (Suswati dkk., 2001). Kedua sesar regional tersebut yang di tafsirkan sebagai jalur

aliran hidrotermal ke permukaan (Rasimeng, 2008). Sesar Lampung merupakan sesar yang berarah Barat Laut-Tenggara. Sesar Lampung merupakan sesar geser yang diperkirakan mengontrol sistem panas bumi di bagian Utara serta Tenggara Gunung Rajabasa (Haerudin dkk., 2013). Sedangkan sesar lokal merupakan sesar yang berarah Timur Laut-Barat Daya. Sesar lokal merupakan sesar normal dan mengontrol sistem panas bumi di bagian Selatan (Amin dkk., 1994).



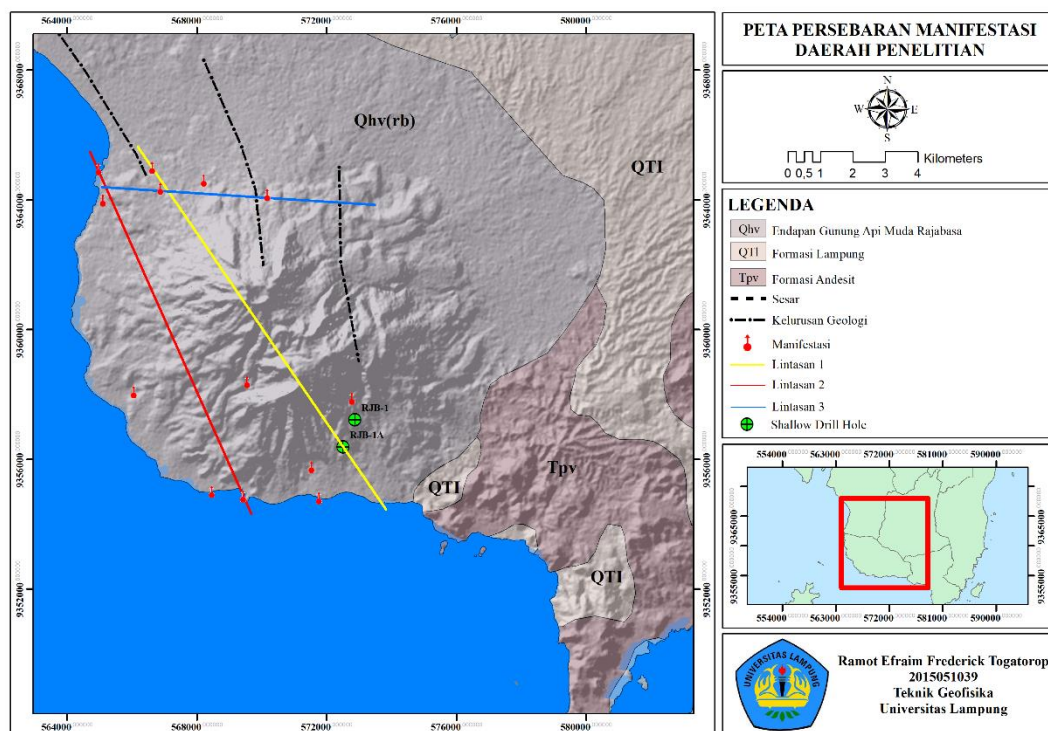
Gambar 5. Peta struktur geologi regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021; Mangga dkk., 1993)

Selain sesar, terdapat struktur geologi lain yang berkembang pada daerah penelitian, yaitu struktur kawah. Kawah tersebut merupakan Kawah Puncak Balerang yang terdapat di puncak Gunung Balerang dan Kawah Puncak Rajabasa yang terletak di Puncak Gunung Rajabasa. Gawir-gawir terjal terbentuk di sekeliling Kawah Puncak Rajabasa dan Kawah Puncak Balerang,. Gawir-gawir ini terbentuk dari peristiwa letusan tang diikuti oleh fase penghancuran yang membentuk morfologi kawah (Suswati dkk., 2001).

2.5 Manifestasi Rajabasa

Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa memiliki manifestasi yang disebabkan oleh struktur geologi berupa patahan/sesar sehingga fluida hidrotermal dapat keluar sampai ke permukaan melalui bidang sesar yang terbentuk (Rasimeng, 2008). Zona dengan tingkat kerapatan kelurusan yang tinggi pada daerah Gunung Rajabasa mengindikasikan adanya zona lemah yang berkaitan dengan jalur naiknya fluida panas bumi ke permukaan sebagai manifestasi (Darmawan dkk., 2021).

Sebuah manifestasi yang muncul di permukaan menunjukkan adanya sumber panas bumi di kedalaman yang dikenal dengan reservoir. Fluida panas bumi tidak sampai ke permukaan tanpa ada media salurannya. Fluida panas bumi mengalir melalui patahan atau rekahan yang terbentuk oleh proses geologi. Kemunculan manifestasi tidak persis di atas reservoir, untuk mendapatkan letak reservoir yang tepat, maka jenis patahan dan arah saluran fluidanya harus diketahui dengan tepat. Ada patahan yang dapat menyalurkan (*leaking*) dan ada patahan (*sealing*). Hanya patahan leaking yang dapat menjadi saluran fluida panas bumi (Haerudin dkk., 2020).



Gambar 6. Peta sebaran manifestasi daerah penelitian (modifikasi dari Mussfan dkk., 2016; Mangga dkk., 1993)

2.6 Penelitian Terdahulu

Tabel 1. Penelitian terdahulu

No	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
1	Darmawan dkk. (2013)	Penginderaan Jauh (<i>Remote Sensing</i>) Integrasi Citra ASTER dan DEM	Berdasarkan hasil interpretasi citra ASTER dan ASTER DEM sebagian besar daerah Gunung Rajabasa merupakan perbukitan curam dari hasil interpretasi citra. Kelurusan ASTER DEM menghasilkan sebanyak 174 kelurusan yang berarah utama barat laut – tenggara dan selaras dengan sesar Lampung – Panjang.
2	Darmawan dkk. (2021)	Simulasi numerik	Terdapat area <i>impermeabel</i> yang cukup tebal di bawah Gunung Ratai berdasarkan model permeabilitas. Hasil ini diinterpretasikan batuan penutup yang sangat tebal, sehingga menyebabkan belum ditemukannya manifestasi berupa fumarola maupun solfatara di Gunung Ratai saat ini
3	Karyanto dkk. (2021)	Simulasi Numerik	Hasil simulasi yang signifikan diperoleh pada 25.000 tahun iterasi, mengidentifikasi sebagai kondisi <i>steady state</i> untuk sistem panas bumi Way Ratai. Hasil numerik menunjukkan bahwa reservoir panas bumi berpotensi memiliki rentang panjang kurang lebih 9 km, dengan ketebalan 0.5-1.5 km dengan suhu berkisar antara 250 – 350°C.

No	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
4	Darmawan dkk. (2021)	<i>Fault fracture density</i> (FFD) DEM ALOS PALSAR	Ekstraksi kelurusan dan FFD sudut azimuth 45°, 135°, 225°, dan 315° diidentifikasi arah struktur sebagian selaras dengan sistem Sesar Sumatera dan sebagian memotong sistem sesar utama. Berdasarkan zona <i>upflow</i> pada densitas struktur tinggi di manifestasi Way Belerang dan zona <i>outflow</i> di manifestasi mata air panas Gunung Botak diketahui adanya keterkaitan antara zona lemah (<i>fracturing</i>) dengan zona reservoir panas bumi.
5	Sarkowi dan Wibowo (2021)	Gayaberat, Data MT, dan MEQ	Nilai anomali Bouguer berkisar antara 28- 80 mGal. Hasil anomali residual, SVD, dan pemodelan 3D, diidentifikasi terdapat tiga reservoir panas bumi berada di Gunung Belerang, sebelah barat Gunung Rajabasa, dan selatan mata air panas Pangkul dengan kedalaman 1.000-1.500 m dari permukaan tanah. Model 1D MT menghasilkan nilai resistivitas rendah di bawah puncak gunung. Berdasarkan survei MEQ, pusat gempa mikro terkonsentrasi di bawah Gunung Rajabasa menyebar ke barat laut – tenggara yang diperkirakan berkaitan dengan aktivitas vulkanik.

No	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
6	Darmawan dkk. (2023)	Simulasi numerik	Reservoar panas bumi Gunung Rajabasa berada di bawah Gunung Rajabasa dan Balirang, dengan dimensi panjang kurang lebih 4 km dan ketebalan 2–2.5 km. Model aliran massa air juga menunjukkan kemiripan dengan kondisi lapangan, termasuk fluida pada suhu 100 °C yang muncul di daerah manifestasi W. Simpur, G. Botak, W. Merak, dan Pangkul di tahun iterasi ke-40.000 sebagai kondisi <i>steady-state</i> . Model pergerakan massa uap mencapai 1×10^{-7} g/s.cm ² membentuk pola terpusat di bawah puncak Gunung Rajabasa dan Balirang dengan pola konsisten dengan model distribusi resistivitas studi magnetotelurik sebelumnya. Model tersebut memprediksi kisaran suhu fluida reservoar 250-380 °C. Selain itu, model menunjukkan bahwa reservoar terletak antara 800 dan 1200 m di bawah permukaan. Model memperkirakan bahwa reservoar mengandung sebagian besar air di zona dua fasa, dengan lapisan batuan penutup yang tebal di bawah puncak Rajabasa.

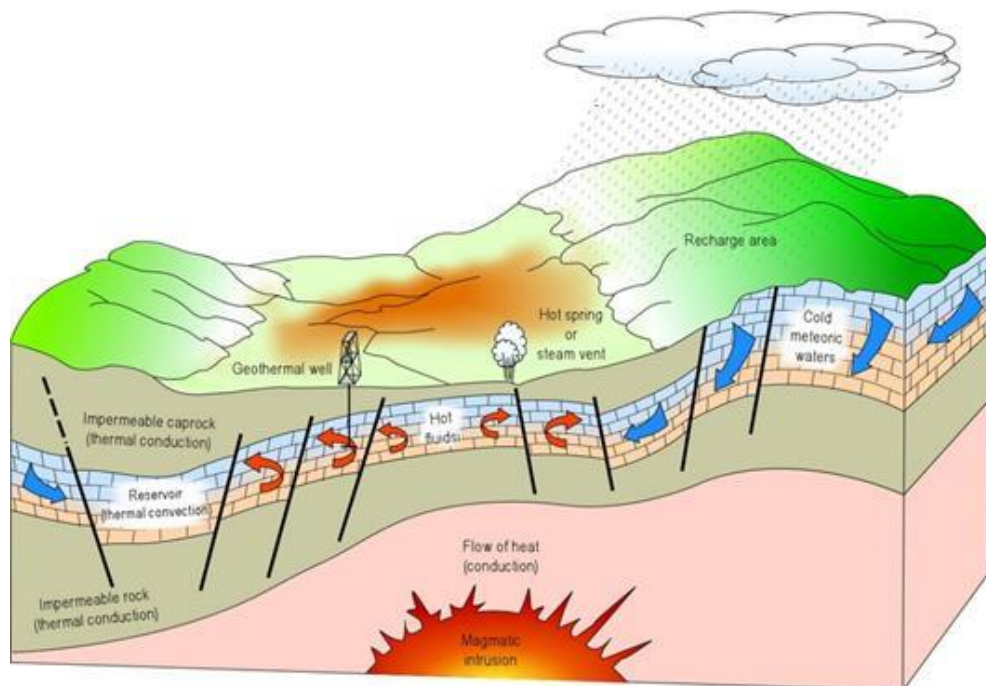
III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panas Bumi

Energi panas bumi adalah sumber energi panas yang diperoleh dari bagian dalam bumi, yaitu dari kerak, mantel, dan intinya yang memiliki suhu yang sangat tinggi. Kondisi di bawah permukaan bumi lebih panas daripada di permukaan, sehingga energi panas terus bergerak dari kondisi yang lebih panas di bawah permukaan menuju ke permukaan melalui batuan *impermeable rock* (Toth dan Bobok, 2017). Energi panas bumi dapat diklasifikasikan berdasarkan sumber panasnya menjadi lima bagian, yaitu energi magma (*magma energy*), energi panas batuan kering (*hot dry rock*), energi bumi (*earth energy*), energi tekanan bumi, dan energi hidrotermal (*hydrothermal energy*) (Arintalofa, 2020). Saptadji (2009) menjelaskan bahwa terjadinya sumber energi panas bumi di Indonesia dan karakteristiknya. Terdapat tiga lempeng di Indonesia, yaitu Lempeng Pasifik, Lempeng Eurasia dan Lempeng India-Australia. Tumbukan yang terjadi antara ketiga lempeng tersebut mengakibatkan terbentuknya sumber energi panas bumi di Indonesia. Sistem panas bumi merupakan suatu sistem penghantaran panas (*heat transfer*) di dalam mantel atas dan kerak bumi yang mana panas dipindahkan dari sumber panas (*heat source*) menuju tempat pelepasan panas yang biasanya terjadi di permukaan bumi (Handayani, 2012).

Sistem panas bumi tersusun oleh beberapa parameter kebumihan, seperti sumber panas, reservoir, batuan penudung, sumber fluida, dan siklus hidrologi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Air hujan (*rain water*) akan merembes ke dalam 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 akan terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas (*hot rock*) sehingga temperatur air meningkat dan volume bertambah serta tekanan menjadi naik. Akibat tekanan yang terus naik menyebabkan air panas naik ke atas melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan di dalam permukaan. Distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi merupakan asal dari sumber panas bumi. Suhu di permukaan ditentukan oleh konveksi di dalam sirkulasi fluida dan konduksi panas melalui batuan padat. Suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman posisi di bawah permukaan bumi (Suharno, 2012).



Gambar 7. Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2004)

3.2 Sifat Batuan Panas Bumi

3.2.1 Porositas

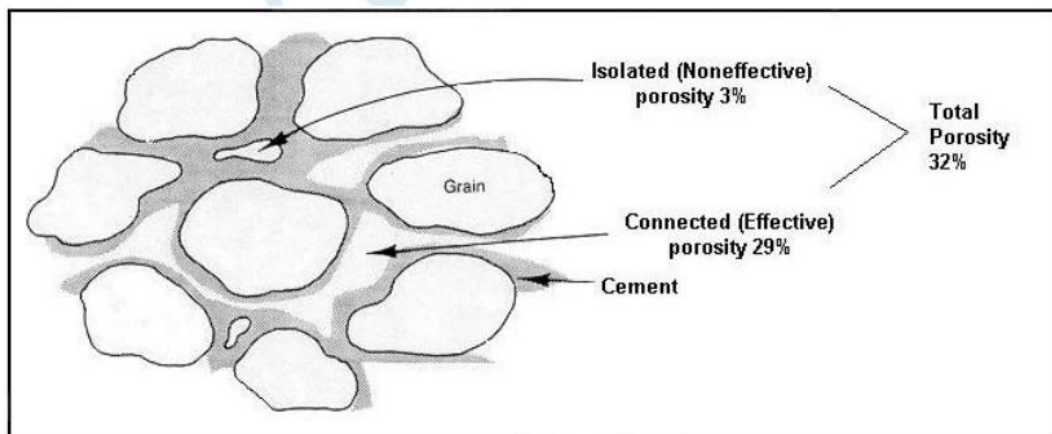
Porositas merupakan nilai kemampatan dari suatu benda. Semakin mampat suatu benda maka nilai porositasnya semakin kecil. Porositas juga dapat didefinisikan sebagai ukuran dari ruang kosong di antara material dan merupakan fraksi dari volume ruang kosong terhadap total volume. Rentang nilai porositas ada pada nilai antara 0 dan 1 atau sebagai persentase antara 0-100% (Alim dkk., 2017). Menurut Athy (1930) nilai porositas suatu benda bergantung pada jenis bahan, ukuran bahan, distribusi pori, sementasi, riwayat diagenetik dan komposisinya.

Terdapat 2 jenis porositas yang dikenal dalam teknik reservoir, yaitu porositas absolut dan porositas efektif. Porositas absolut merupakan rasio volume pori-pori total batuan terhadap volume total batuan (Ridha dan Darminto, 2016). Adapun persamaan dari porositas absolut adalah sebagai berikut:

$$\text{Porositas absolut } (\varphi) = \frac{(\text{volume pori-pori total})}{(\text{volume total batuan})} \times 100 \quad (1)$$

Sedangkan porositas efektif merupakan rasio volume pori-pori yang saling berhubungan terhadap volume total batuan (Ridha dan Darminto, 2016). Adapun persamaan dari porositas efektif adalah sebagai berikut:

$$\text{Porositas efektif } (\varphi_e) = \frac{(\text{volume pori-pori berhubungan})}{(\text{volume total batuan})} \times 100 \quad (2)$$



Gambar 8. Ilustrasi porositas batuan (Van Bemmelen, 1949)

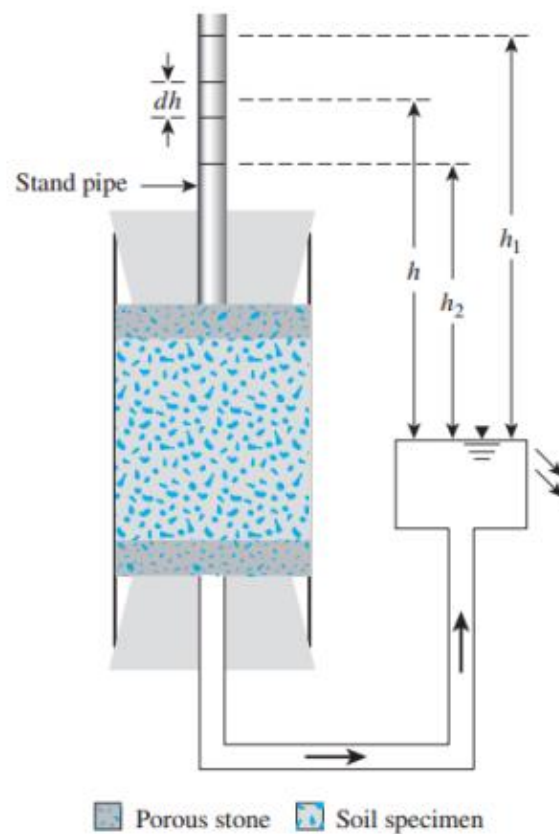
3.2.2 Permeabilitas

Permeabilitas merupakan sifat bahan berpori yang memungkinkan aliran fluida mengalir lewat rongga pori. Pori-pori tanah saling terhubung antara satu dengan lainnya, sehingga air dapat mengalir dari titik yang lebih tinggi energi ke titik dengan tinggi energi yang lebih rendah. Untuk tanah, permeabilitas digambarkan sebagai sifat tanah yang mengalirkan air melalui rongga pori tanah (Hardiyatmo, 2012).

Di dalam sifat tanah, terdapat 2 sifat aliran, yaitu laminar atau turbulen. Jenis tanah, ukuran butiran, bentuk butiran, rapat massa, serta bentuk geometri rongga pori

merupakan faktor-faktor yang memengaruhi tahanan tanah terhadap aliran. Temperatur juga sangat memengaruhi tahanan aliran. Tanah yang mudah meloloskan air disebut *permeable*. Sedangkan, tanah yang mempunyai kemampuan meloloskan air yang sangat kecil dan cenderung kedap air disebut *impermeable* (Hardiyatmo, 2012).

Tanah merupakan granular struktur yang membentuk pori-pori yang saling terhubung. Kemampuan air untuk menembus media, seperti tanah dilambangkan sebagai koefisien permeabilitas (K). Dalam menentukan koefisien permeabilitas, diperlukan suatu metode, yaitu metode *constant head* dan *falling head* (Imamuddin dan Al Hanif, 2017).



Gambar 9. Prinsip uji permeabilitas *falling head* (Imamuddin dan Al Hanif, 2017)

Debit rembesan dapat dihitung dengan persamaan:

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

$$dt = \frac{aL}{Ak} \left(-\frac{dh}{h} \right) \quad (4)$$

Hasil integral dari persamaan tersebut:

$$t = \frac{aL}{Ak} \log_e \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (6)$$

Koefisien permeabilitas mempunyai harga berbeda sesuai dengan jenis dan kepadatan tanah.

3.2.3 Densitas

Densitas batuan merupakan perbandingan antara massa batuan dengan volume batuan tersebut. Semakin tinggi kerapatan suatu batuan maka semakin besar densitas suatu batuan (Saptadji, 2002). Densitas batuan dipengaruhi oleh beberapa faktor yang diantaranya adalah rapat massa butir pembentuknya, porositas, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, serta pemadatan akibat tekanan dan pelapukan yang dialami batuan tersebut (Brotopuspito, 2001). Densitas batuan meliputi densitas asli (*natural density*) merupakan batuan densitas batuan dalam keadaan sebenarnya, densitas kering (*dry density*) merupakan densitas batuan dimana dalam keadaan susut setelah batuan dipanaskan, dan densitas jenuh (*saturated density*) merupakan densitas batuan dalam keadaan jenuh setelah batuan dijenuhkan dalam suatu fluida (Ridha dan Darminto, 2016). Adapun variasi densitas Telford dkk. (1990) dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai densitas batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (Mg/m³)	Rata-rata (Mg/m³)
Batuan Sedimen		
<i>Alluvium</i>	1,96 – 2,00	1,98
<i>Clay</i>	1,63 – 2,60	2,21
<i>Gravel</i>	1,70 – 2,40	2,00
<i>Loess</i>	1,40 – 1,93	1,64
<i>Silt</i>	1,80 – 2,20	1,93
<i>Soil</i>	1,20 – 2,40	1,92
<i>Sand</i>	1,70 – 2,30	2,00
<i>Sandstone</i>	1,61 – 2,76	2,35
<i>Shale</i>	1,77 – 3,20	2,40
<i>Limestone</i>	1,93 – 2,90	2,55
<i>Dolomite</i>	2,28 – 2,90	2,70
<i>Chalk</i>	1,53 – 2,60	2,01
<i>Halite</i>	2,10 – 2,60	2,22
<i>Glacier ice</i>	0,88 – 0,92	0,90
Batuan Beku		
<i>Rhyolite</i>	2,35 – 2,70	2,52
<i>Granite</i>	2,50 – 2,81	2,64
<i>Andesite</i>	2,40 – 2,80	2,61
<i>Syenite</i>	2,60 – 2,95	2,77
<i>Basalt</i>	2,70 – 3,30	2,99
<i>Gabbro</i>	2,70 – 3,50	3,03
Batuan Metamorf		
<i>Schist</i>	2,39 – 2,90	2,64
<i>Gneiss</i>	2,59 – 3,00	2,80
<i>Phyllite</i>	2,68 – 2,80	2,74
<i>Slate</i>	2,70 – 2,90	2,79
<i>Granulite</i>	2,52 – 2,73	2,65
<i>Amphibolite</i>	2,90 – 3,04	2,96
<i>Eclogite</i>	3,20 – 3,54	3,37

3.2.4 Kalor Jenis

Menurut Saptadji (2002) kalor jenis batuan merupakan suatu parameter yang menyatakan banyaknya panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa batuan tersebut 1°C. Satuan dari kalor jenis adalah kJ/kg°C. Kalor jenis batuan umumnya mempunyai nilai sebagai berikut:

- Temperatur rendah : $T = 0,75-0,85 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- Temperatur sedang : $T = 0,85-0,95 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$
- Temperatur tinggi : $T = 0,95-1,10 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$

3.2.5 Konduktivitas Panas Batuan

Konduktivitas panas batuan (K) adalah besarnya kemampuan batuan untuk menghantarkan energi panas dengan cara konduksi apabila batuan tersebut memiliki perbedaan temperatur (Saptadji, 2002). Seberapa cepat panas dari reservoir mengalir ke permukaan bumi ditunjukkan oleh konduktivitas termal batuan. Tinggi rendahnya nilai konduktivitas termal batuan menentukan potensi reservoir dari panas bumi sebagai energi panas bumi (Endovani dan Putra, 2016).

Konduktivitas panas tidak sama untuk setiap batuan. Selain ditentukan oleh jenis batuan dan mineral-mineral penyusunnya, konduktivitas panas suatu batuan juga dapat ditentukan oleh struktur kristal yang membentuk batuan tersebut. Mungkin ini juga yang menyebabkan nilai konduktivitas berlainan ke semua arah. Hal ini menyebabkan panas merambat dengan laju yang berbeda ke arah yang berlainan (Saptadji, 2002).

3.3 Metode Volumetrik

Untuk menghitung cadangan panas bumi dapat dilakukan dengan menggunakan metode volumetrik. Metode ini digunakan untuk mengetahui jumlah panas yang tersimpan dalam batuan dan fluida, kemudian memperkirakan seberapa besar panas yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Metode volumetrik digunakan untuk memperkirakan potensi panas bumi pada saat belum tersedianya data pemboran sumur (Putriyana, 2018).

Prinsip dari metode volumetrik adalah menganggap bahwa reservoir panas bumi merupakan reservoir yang berbentuk segi empat (kotak), dengan volume yang dapat dihitung dengan mengalikan luas area yang diperkirakan mengandung fluida panas bumi dengan ketebalannya. Pada metode volumetrik, energi panas di dalam reservoir digunakan untuk memperkirakan besarnya potensi energi sumber daya

atau cadangan panas bumi. Kandungan energi panas di dalam reservoir merupakan jumlah keseluruhan panas yang terkandung di dalam batuan dan fluida panas bumi (Habibirahman dkk., 2019).

Adapun data yang diperlukan untuk perhitungan dalam metode volumetrik diantaranya adalah data luas daerah, ketebalan, temperatur reservoir, porositas saturasi air dan uap, densitas batuan, daya hantar panas batuan, densitas uap dan air, serta energi dalam uap dan air (Saptadji, 2002).

3.3.1 Panas yang Tersimpan dalam Batuan

Panas yang terkandung di dalam batuan yang mempunyai massa m , kapasitas panas c dan temperatur T (Saptadji, 2002). Berikut merupakan persamaannya:

$$Q = m \cdot c \cdot T \quad (7)$$

Jadi, apabila V adalah volume reservoir (*bulk volume*), ϕ adalah porositas batuan dan ρ adalah densitasnya, maka massa batuan adalah:

$$m_r = V \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \quad (8)$$

Jadi, apabila A adalah luas reservoir dan h adalah ketebalannya maka persamaan di atas menjadi sebagai berikut:

$$m_r = A \cdot h \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \quad (9)$$

Apabila batuan mempunyai kapasitas panas c_r , maka dengan mensubstitusikan persamaan (9) ke persamaan (7) akan diperoleh persamaan yang menyatakan panas yang terkandung di dalam batuan (Q_r). Persamaan tersebut adalah:

$$Q_r = A \cdot h \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T \quad (10)$$

3.3.2 Panas yang Tersimpan dalam Fluida

Menurut Saptadji (2002), energi yang terkandung di dalam air dan uap yang masing-masing mempunyai massa m_L dan m_V dan energi dalam u_L dan u_V , yang ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$Q_e = m_L \cdot u_L + m_V \cdot u_V \quad (11)$$

Apabila volume reservoir (*bulk volume*) adalah V , porositas batuan adalah ϕ , saturasi air dan saturasi uap masing-masing adalah S_L dan S_V , dan densitas air dan uap masing-masing adalah ρ_L dan ρ_V maka massa air dan massa uap yang mengisi pori-pori batuan dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$m_L = v. \phi. S_w. \rho_w \quad (12)$$

$$m_V = v. \phi. S_s. \rho_s \quad (13)$$

Apabila A adalah luas reservoir dan h adalah ketebalannya maka persamaan di atas dapat dituliskan menjadi:

$$m_L = A. h. \phi. S_w. \rho_w \quad (14)$$

$$m_V = A. h. \phi. S_s. \rho_s \quad (15)$$

Ketika kedua persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan (11) maka akan diperoleh persamaan yang menyatakan panas yang terkandung di dalam uap dan air (Q_e) sebagai berikut:

$$Q_e = A. h. \phi. S_w. \rho_w. U_w + A. h. \phi. S_s. \rho_s. U_s \quad (16)$$

Sehingga persamaan di atas dapat dituliskan kembali menjadi sebagai berikut:

$$Q_e = A. h. \phi. (S_w. \rho_w. U_w + S_s. \rho_s. U_s) \quad (17)$$

Sehingga kandungan energi panas di dalam reservoir (di dalam batuan dan fluida) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H_e = A. h. [(1 - \phi). \rho_r. C_r. T + \phi (S_w. \rho_w. U_w + S_s. \rho_s. U_s)] \quad (18)$$

Dimana:

H_e = Kandungan energi panas (kJ)

A = Luas daerah panas bumi (m²)

h = Tebal reservoir (m)

T = Temperatur reservoir (°C)

S_w = Saturasi air (fraksi)

S_s	= Saturasi uap (fraksi)
U_w	= Energi dalam air (kJ/kg)
U_s	= Energi dalam uap (kJ/kg)
\emptyset	= Porositas batuan reservoir (fraksi)
C_r	= Kapasitas panas batuan (kJ/kg °C)
ρ_r	= <i>Density</i> batuan (kg/m ³)
ρ_w	= <i>Density</i> air (kg/m ³)
ρ_s	= <i>Density</i> uap (kg/m ³)

3.3.3 Perhitungan Metode Volumetrik

Menurut Saptadji (2002) besarnya energi panas cadangan yang dapat dimanfaatkan dan diubah menjadi energi listrik (potensi listrik) dapat dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut:

Kandungan energi pada keadaan awal (*initial*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{ei} = A \cdot h \cdot [(1 - \emptyset) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T_i + (S_w \cdot \rho_w \cdot U_w + S_s \cdot \rho_s \cdot U_s) i] \quad (19)$$

Kandungan energi pada keadaan akhir (*final*) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \emptyset) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T_f + (S_w \cdot \rho_w \cdot U_w + S_s \cdot \rho_s \cdot U_s) f] \quad (20)$$

Energi maksimal yang dapat dimanfaatkan dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (21)$$

Energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan (besarnya cadangan bila dinyatakan dalam kJ) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{de} = R_f \cdot H_{th} \quad (22)$$

Besarnya cadangan yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu t tahun dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t.365.24.3600} \quad (23)$$

Besarnya potensi listrik panas bumi, yaitu energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode t tahun (MWe) dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$H_{el} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t.365.24.3600} \quad (24)$$

Dimana:

T_i = Temperatur reservoir pada keadaan awal ($^{\circ}\text{C}$)

T_f = Temperatur reservoir pada keadaan akhir ($^{\circ}\text{C}$)

H_{ei} = Kandungan energi di dalam batuan dan fluida pada keadaan awal (kJ)

H_{ef} = Kandungan energi di dalam batuan dan fluida pada keadaan akhir (kJ)

H_{th} = Maksimum energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan (kJ)

H_{de} = Energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan pada kenyataannya (kJ)

H_{re} = Energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan selama kurun waktu tertentu (MWe)

H_{el} = Energi listrik yang dapat dibangkitkan selama kurun waktu tertentu (MWe)

R_f = Faktor perolehan (%)

t = Lama waktu (umur) pembangkitan listrik (tahun)

η = Faktor konversi listrik

3.4 Persamaan Aliran Air Tanah

Menurut Faust dan Mercer (1977), persamaan aliran komponen air yang didasarkan pada kekekalan massa air dalam elemen volume, dengan hukum Darcy yang digunakan untuk aliran multifase melalui berpori sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{K K_{rw} \rho_w}{\mu_w} [\nabla p + \rho_w g \hat{e}_z] - \nabla \cdot \frac{K K_{rs} \rho_s}{\mu_s} [\nabla p_g + \rho_s g \hat{e}_z] - q_{sf} = 0 \quad (25)$$

Dimana ϕ adalah Porositas, ρ = Densitas larutan (kg/m^3), S_p adalah Saturasi dari air dalam fase p, K adalah tensor permeabilitas medium berporos (m^2), K_r adalah Permeabilitas relatif, μ adalah Viskositas ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), P adalah Tekanan cairan pada fase cair (Pa), P_g adalah Tekanan cairan pada fase gas (Pa), g adalah Konstanta gravitasi (m/s^2), \hat{e}_z adalah satuan vektor dalam arah koordinat z , q_{sf} adalah Intensitas laju aliran dari sumber massa fluida ($\text{kg}/\text{s}\cdot\text{m}^3$), t adalah waktu (s), dan ∇ adalah gradien spasial (m^{-1}).

Subskrip fase w mengacu kepada air dan subskrip fase s mengacu pada 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 (25) dengan tidak melibatkan uap. Persamaan (25) 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:

$$S_w + S_g = 1 \quad (26)$$

Dimana h_r adalah entalpi spesifik dari fase padat matriks berpori (J/kg) dan ρ_r adalah Densitas dari poros-matriks fase solid (kg/m^3). Berdasarkan asumsi diatas, S_g mewakili saturasi uap air atau udara pada titik tertentu. Tidak ada ketentuan yang pasti untuk uap dan udara agar bisa berdampingan dalam simulator Hydrotherm.

Kecepatan interstisial atau pori (V_p) untuk komponen air dalam fase p diperoleh dari hukum Darcy sebagai berikut:

$$V_p = -\frac{kk_{rp}}{\theta S_p \mu_p} [\nabla_p + \rho_p g \hat{e}_z] \quad (27)$$

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 konfigurasiya dapat di determinasikan dari solusi tekanan. Menggunakan formula zona tersaturasi parsial mengartikan bahwa wilayah simulasi aliran dapat meluas ke permukaan tanak dan tidak perlu disesuaikan untuk menyelaraskan dengan konfigurasi permukaan air selama simulasi berlangsung.

3.5 Persamaan Perpindahan Panas

Persamaan perpindahan panas dibuat berdasarkan konservasi entalpi dalam fase padat dan fluida dari medium berpori dalam wilayah elemen. Entalpi merupakan sifat turunan yang mengandung energi internal dan energi aliran. Sehingga persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1 - \phi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot K_a I \nabla T + \nabla \cdot \phi(S_w \rho_w h_w V_w + S_s \rho_s h_s V_s) - q_{sh} = 0 \quad (28)$$

Dimana h adalah Entalpi spesifik dari fase fluida (J/kg), h_r adalah entalpi dari fase padat matriks berpori (J/kg), ρ_r adalah densitas dari fase padat matriks berpori (kg/m³), K_a adalah konduktifitas termal efektif dari medium berpori (W/m·°C), I adalah matriks identitas orde 3 (tidak berdimensi), T adalah Temperatur (°C), dan q_{sh} adalah intensitas laju aliran dari sumber entalpi (W/m³).

Subskrip fase w mengacu kepada air subskrip fase s mengacu pada uap. Persamaan (28) 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 (Huyakorn dan Pinder, 1983).

3.6 Solusi Persamaan Numerik

3.6.1 Algoritma Newton-Raphson

Algoritma Newton-Raphson merupakan algoritma yang 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 nonlinier ini ditulis untuk aliran dan perpindahan panas dalam sekuen untuk setiap titik aktif. Persamaan tersebut ditulis dalam bentuk nilai residual untuk N titik aktif sebagai berikut:

$$f(u) = 0 \quad (29)$$

Dimana f adalah vektor nilai residual dari persamaan beda hingga nonlinier (W), u adalah Blok vektor 2×1 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,

$$J(u^{(v)})(u^{(v+1)} - u^{(v)}) + f(u^{(v)}) = 0 \quad (30)$$

Dengan

$$J(u^{(v)}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial u_N} \end{bmatrix}_{u=u^{(v)}} \quad (31)$$

Dan

$$u^{(v+1)} - u^{(v)} = \begin{bmatrix} u_1^{(v+1)} - u_1^{(v)} \\ \vdots \\ u_N^{(v+1)} - u_N^{(v)} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Dimana J adalah Matriks Jacobian 2×2 dengan ukuran $N_a \times N_a$ dan $U^{(v)}$ adalah vektor dari nilai tekanan dan enthalpi 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 (Stoer dan Bulirsch, 1993).

3.7 Solusi Persamaan Linier

Satu set dari persamaan Newton beda hingga linierisasi Persamaan (30) dapat diselesaikan dengan salah satu dari dua algoritma untuk persamaan linear, matriks jarang, metode yang digunakan adalah *Slice-successive-over-relaxation* (SSOR) atau metode *Generalize-minimum-residual* (GMRES). Keduanya metode tersebut merupakan metode iterasi yang digunakan untuk tiga dimensi *mesh*. Sedangkan metode SSOR menjadi metode langsung untuk dua dimensi *mesh* yang terdiri dari satu *slice vertical*.

a. *Slice-Successive-Overrelaxation*

Solver untuk metode ini, setiap titik bidang $X - Z$ atau irisan diselesaikan dengan eliminasi langsung. Satu siklus iterasi terdiri dari penyelesaian untuk setiap titik bidang menggunakan penyelesaian *band-matrix storage*. *Overrelaxation*

digunakan untuk mempercepat konvergensi, dengan faktor *overrelaxation* optimal yang disediakan oleh pengguna. Satu set dari persamaan Newton linier untuk mesh dengan N titik aktif membentuk blok persamaan matriks 2×2 .

$$A u = b \quad (33)$$

Dimana A adalah Matriks balok 2×2 berukuran $N_a \times N_a$, u adalah Matriks balok 2×1 yang tidak diketahui (Tekanan, Enthalpi), dan b adalah Vektor balok 2×1 sisi kanan dari persamaan perbedaan dengan panjang N . Setiap elemen A adalah 2×2 sub-matriks, dan setiap elemen u dan b terdapat dua komponen, karena terdapat dua persamaan dan dua yang tidak diketahui untuk setiap titik *node*. Metode *iterative stasioner generic* dapat ditulis sebagai:

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - B^{-1}[Au^{(v)} - b] \quad (34)$$

Dimana B adalah Matriks blok 2×2 berukuran $N_a \times N_a$ dan v adalah penghitung iterasi. B dipilih agar mudah untuk menginversi. Untuk menyederhanakannya, mengasumsikan semua *node* aktif, jadi $N = N$. Kemudian, dalam persamaan (34) matriks A adalah a yang dibagi menjadi blok $N_y \times N_y$ yang masing-masing berisi persamaan untuk satu bidang x - z , dimana $N_x \times N_x \times N = N$.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1N_y} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{N_y,1} & \dots & A_{N_y,N_y} \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$= \begin{bmatrix} D_1 & U_{12} & & 0 \\ L_{21} & \cdot & \cdot & \\ 0 & \cdot & \cdot & U_{N_y-1,N_y} \\ & & L_{N_y,N_y-1} & D_{N_y} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$= D - L - U \quad (37)$$

Dimana A_{ij} adalah Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$, D_i adalah Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$, L_{ij} adalah Matriks blok diagonal 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$, U_{ij} adalah Matriks blok diagonal 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$, D adalah Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N \times N$, L adalah Matriks blok segitiga bawah 2x2 dengan ukuran $N \times N$, dan U adalah Matriks blok segitiga atas 2x2 dengan ukuran $N \times N$.

Pemisah matriks diberikan oleh Persamaan (37) dimana *submatrices* renggang D_i adalah penta-diagonal dan submatrices L_{ij} dan U_{ij} berbentuk diagonal. Matriks ini berukuran $N_x \times N_z$, dimana *node* telah di nomori dengan indeks arah x meningkat paling cepat, indeks arah z meningkat paling tinggi lalu cepat, dan indeks arah y meningkat tetapi tidak begitu cepat. Memilih

$$B = \frac{1}{\omega} [D - \omega L] \quad (38)$$

Dan

$$u^{(v+1)} = \omega u_{GS}^{(v+1)} + (1 - \omega)u^{(v)} \quad (39)$$

Dimana U_{GS} adalah solusi vektor menggunakan algoritma Gauss-Seidel, persamaan matriks untuk SSOR adalah

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - \omega [D - \omega L]^{-1} [Au^{(v)} - b] \quad (40)$$

Dan

$$[D - \omega L]u^{(v+1)} = [(1 - \omega)D + \omega U]u^{(v)} + \omega b \quad (41)$$

Dimana ω adalah faktor *over-relaxation*.

Persamaan (41) adalah persamaan matriks renggang yang disimpan dalam format pita dan diselesaikan, untuk setiap iterasi, secara langsung. Eliminasi Gaussian tanpa *pivoting*.

Iterasi dihentikan jika norma relatif dari perubahan vektor solusi kurang dari toleransi yang ditentukan, Mengartikan, ketika norma relatif dari perubahan u ,

$$\frac{\|u^{(v+1)} - u^{(v)}\|}{\|u^{(v+1)}\|} \leq \tau_{SOR} \quad (42)$$

Dimana τ_{SOR} adalah toleransi yang ditentukan.

Dalam Hydroterm, u dipilih hanya sebagai vektor perubahan tekanan pada setiap *node* selama satu langkah waktu. Vektor perubahan entalpi pada setiap *node* tidak digunakan untuk tes penghentian. Dibawah kriteria konvergensi ini, iterasi pemecah SSOR dapat berhenti sebelum waktunya ketika ditemukan tingkat konvergensi yang sangat lambat. Untuk menggunakan pemecah persamaan SSOR, pengguna harus menyediakan nilai untuk faktor relaksasi berlebih, toleransi kovergensi, dan jumlah iterasi maksimum diizinkan. Nilai *default* disediakan. Algoritma *Slice-successive-overrelaxation* mereduksi menjadi *direct elimination band solver* dari Persamaan (33) untuk *mesh* dua dimensi. Dalam kasus tersebut tidak diperlukan iterasi.

b. Generalized-Minimum-Residual Solver

Metode *Generalized Minimum Residual* adalah metode *Kylov Subspace* dimana metode ini kontras terhadap SSOR yang tidak memiliki matriks iterasi stasioner, B^{-1} dalam Persamaan (34).

Untuk penyederhanaannya, anggap semua titik adalah aktif menjadi $Na = N$. Lalu, persamaan matriks linier (Persamaan 33) memiliki vektor residual

$$r = b - Au \quad (43)$$

Perkiraan solusi vektor, u , ditemukan yang meminimalisir *Euclidian norm* dari setiap residual iterasi atas solusi awal vektor ditambah *Krylov Subspace* saat ini.

Satu set *Krylov Subspace* didefinisikan sebagai:

$$K_v = \text{span}\{r_0, Ar_0, \dots, A^{v-1}r_0\} \quad (44)$$

Dimana K_v adalah adalah *Krylov Subspace* saat iterasi v .

Krylov subspace didasari oleh matriks A dan sekuen residual vektor r_v dari semua iterasi sebelumnya. Dimulai dari tebakan awal solusi vektor u_0 , Metode GMRES mendapatkan estimasi solusi u dari

$$u_v = u_0 + Q_v Y_v \quad (45)$$

Dimana Q_v adalah matriks $N \times V$ dari basis ortonormal untuk *Krylov Subspace* dan y_v adalah vektor yang dipilih untuk meminimalisir vektor residual *Euclidean Norm* saat ini. Vektor y_v adalah penyelesaian dari permasalahan minimalisasi *Least-square* dengan v yang biasanya berupa bilangan kecil. Metode GMRES penuh, menimbulkan beban kerja dan penyimpanan per-iterasi yang meningkat secara linier dengan jumlah iterasi. Oleh karena itu, algoritma yang dimodifikasi, $\text{GMRES}_{(m)}$, digunakan untuk menyederhanakan pengulangan GMRES setiap iterasi ke m , menggunakan solusi vektor terbaru sebagai tebakan awal untuk siklus GMRES selanjutnya (Varga, 1962).

IV. METODE PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilaksanakan di:

Tempat : Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa, Laboratorium Geofisika *Geothermal*, dan Laboratorium Mekanika Tanah.

Alamat : Gunung Rajabasa, Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan dan Gedung Jurusan Teknik Geofisika serta Gedung Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung.

Tanggal : Agustus 2023 – Januari 2024

4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya sebagai berikut:

1. Laptop
2. *Thermogun*
3. PH meter
4. Palu Geologi
5. GPS
6. *Stopwacth*
7. Alat Pengukur Permeabilitas
(Tipe *Falling Down*)
8. Gelas Ukur
9. Tabung Sampel Tanah
10. Plastik Sampel
11. *Software* Hydrotherm
Interactive 2D v3.2.0
12. *Software* ArcGIS v10.3
13. *Software* Microsoft Office
14. Notepad +++
15. Data Karakteristik Batuan
16. Data Permeabilitas
17. Data DEM

4.4 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan pada tahap awal penelitian yang bertujuan untuk mempelajari konsep dari metode geofisika yang digunakan dalam eksplorasi panas bumi. Selain itu, digunakan juga untuk memahami kondisi geologi pada daerah penelitian, berdasarkan penelitian sebelumnya. Kondisi geologi merupakan salah satu parameter penting untuk menentukan zona prospek panas bumi terhadap respon pengukuran data geofisika di lapangan. Selanjutnya, mempelajari sistem terbentuknya panas bumi di daerah penelitian.

2. Akuisisi Data Lapangan

Pengukuran suhu dilakukan untuk mengetahui karakteristik fluida geotermal yang terdapat di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan pH meter dan *thermogun*. Alat pH meter digunakan untuk mengukur suhu air secara langsung pada manifestasi. Sedangkan *thermogun* digunakan untuk mengukur suhu permukaan pada titik manifestasi yang berada di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa. Setelah itu, dilakukan pengambilan sampel batuan yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik batuan dan tanah di daerah penelitian. Terdapat 2 tipe kondisi sampel batuan dan tanah yang digunakan dengan, yaitu tipe *fresh* dan alterasi alterasi. Kemudian sampel batuan yang diperoleh akan dilakukan uji laboratorium untuk memperoleh porositas, densitas, dan permeabilitas. Pengukuran permeabilitas dilakukan menggunakan metode *falling head*. Terdapat 9 titik pengambilan sampel yang mana masing-masing titik mewakili 1 litologi batuan pada daerah penelitian.

3. Data Pendukung (Sekunder)

Data pendukung yang digunakan pada simulasi numerik di lapangan panas bumi Rajabasa adalah data geologi yang didapat dari peta geologi lembar Tanjung Karang yang digunakan untuk menganalisis serta

menginterpretasi struktur geologi pada daerah penelitian. Adapun karakteristik batuan yang digunakan pada penelitian ini yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya, yaitu konduktivitas termal ($W/m K$) dan kalor jenis batuan ($J/kg K$). Nilai-nilai karakteristik batuan tersebut akan diinput didalam *software* Hydrotherm Interactive 2D untuk membuat batas lapisan dan karakteristik batuan dalam simulasi numerik. Sedangkan, data topografi yang diperoleh dari data DEMNAS yang digunakan untuk yang menghasilkan penampang permukaan sebagai batas atas model simulasi.

4. Tahap Pengolahan Data

Langkah pertama dalam pembuatan model simulasi numerik adalah membuat domain simulasi menggunakan data topografi yang diperoleh dari data DEMNAS. Penampang permukaan didapatkan dari analisis *line interpolation* menggunakan *software* ArcGIS, kemudian penampang tersebut dimasukkan kedalam *software* Hydrotherm Interactive menggunakan fungsi *Load Site Map* dalam *Window Site Map* pada kolom *Active Data* untuk membuat Batasan kedalaman dan panjang domain simulasi. Pada penelitian ini menggunakan 3 lintasan, yaitu lintasan 1 dengan panjang penampang 13 km dan kedalaman 3 km, lintasan 2 dengan panjang penampang 12 km dan kedalaman 3 km, serta lintasan 3 dengan panjang penampang 8,5 km dan kedalaman 3 km. Selanjutnya, membuat batas lapisan dengan menginput nilai karakteristik batuan, yaitu permeabilitas (m^2), konduktivitas termal (W/mK), porositas (%), kalor jenis batuan ($J/g K$), dan densitas batuan (g/cm^3). Kemudian, parameter nilai tersebut dimasukkan dalam jendela *Rock Properties* pada *Rock Units* pada kolom *Active Data*. Setelah memasukan semua data karakteristik batuan, dilakukan pembuatan wilayah batuan menggunakan fungsi *Add Polygone Zone*. Langkah selanjutnya adalah membuat model awal yang dilanjutkan dengan membuat *Grid*, *Boundary Condition*, *Initial Temperature*, dan *Simulation Period*. Model awal yang telah dibuat kemudian akan

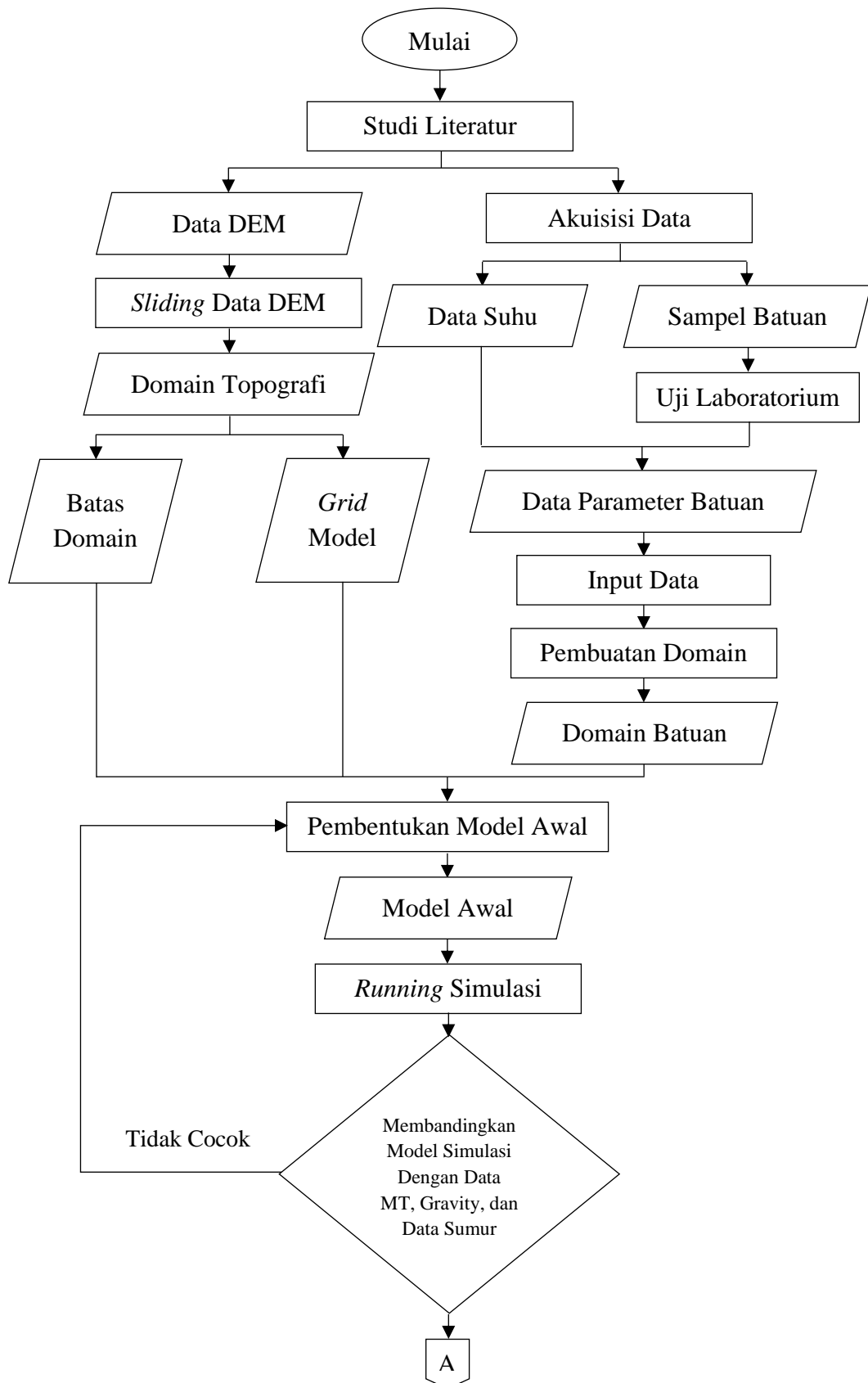
menghasilkan model simulasi melalui proses *running* pada *software* Hydrotherm Interactive 2D.

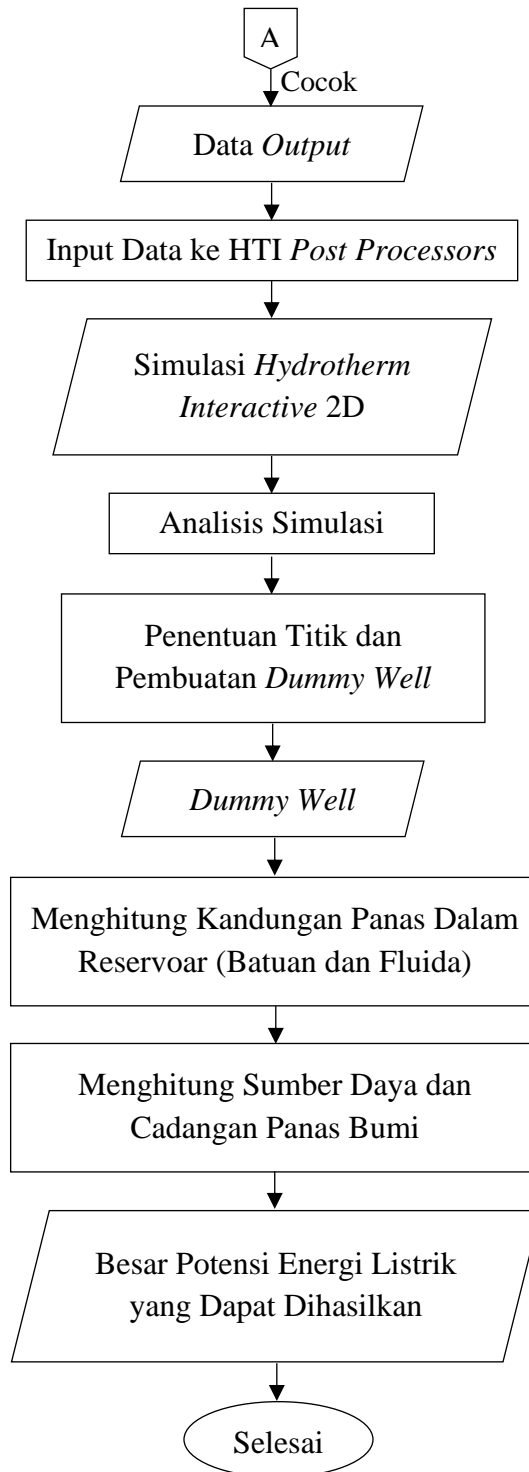
5. Interpretasi

Hasil dari *running* model lintasan pada simulasi numerik akan menghasilkan pola aliran fluida hidrotermal dan sebaran panas pada daerah penelitian yang kemudian akan dikorelasikan dengan data sumur dan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya guna mendapatkan model perpindahan panas, perpindahan massa fluida air dan perpindahan massa fluida uap.

4.5 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 10.





Gambar 10. Diagram Alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi numerik pada lintasan 1 dan 2 menunjukkan aliran panas dan fluida yang mengarah ke puncak Gunung Rajabasa dari Barat Laut ke Tenggara yang ditandai dengan keberadaan manifestasi berupa fumarola. Sedangkan pada lintasan 3, pergerakan fluida dan panas mengarah dari Barat ke Timur yang menunjukkan penyebaran yang tidak sampai permukaan, yang mana kondisi tersebut sesuai dengan kondisi yang sebenarnya, yaitu tidak ditemukannya manifestasi berupa fumarola.
2. Berdasarkan *dummy well* dari ketiga lintasan yang dihasilkan dari pemodelan numerik, menunjukkan dominasi zona 2 fase, yaitu uap dan air. Terdapat indikasi *steam cap* pada lintasan 1 pada kedalaman 300 – 900 m, lintasan 2 pada kedalaman 400 – 600 m, dan lintasan 3 pada kedalaman 1.600 – 2.700 m.
3. Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode volumetrik didapatkan besar cadangan panas bumi yang dapat dimanfaatkan sebesar $1,964 \times 10^{15}$ kJ sehingga besar potensi Listrik pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa dengan periode waktu 30 tahun sebesar 207,60 MWe.

6.2 Saran

Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mendapatkan parameter pendukung yang lebih akurat, seperti survei geofisika menggunakan metode magnetotellurik. Selain itu, diperlukan pembuatan sumur eksplorasi pada daerah prospek, untuk mencapai

tingkat akurasi yang lebih optimal dalam mengidentifikasi struktur geologi di bawah permukaan yang mengendalikan sistem panas bumi Gunung Rajabasa.

DAFTAR PUSTAKA

- Alim, M. I., Firdausi, A., dan Nurmalasari, M. D. 2017. Densitas dan Porositas Batuan. *Laporan Praktikum Laboratorium Fisika Material*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November.
- Amin, T. C., Sidarto, S., dan Santosa, W. 1994. *Geology of the Kotaagung Quadrangle Sumatera*. Bandung: Geological Research and Development Centre.
- Arintalofa, V. 2020. Interpretasi Bawah Permukaan Lapangan Panas Bumi Diwak dan Derekan Kabupaten Semarang Menggunakan Metode HVSR. *Skripsi*. Universitas Diponegoro.
- Athy, L. F. 1930. Density, porosity, and compaction of sedimentary rocks. *AAPG Bulletin*, 14(1), 1-24.
- Barber, A. J., Crow, M. J., dan Milsom, J. S. 2005. *SUMATRA: Geology, Resources and Tectonic Evolution*. London: The Geological Society.
- Brotopuspito, K. S. 2001. *Panduan Workshop Eksplorasi Geofisika: Metode Gravitasi*. Yogyakarta: Laboratorium Geofisika Universitas Gadjah Mada.
- Darmawan, I. G. B., Setijadji, L. D., dan Wintolo, D. 2013. Interpretasi Geologi Gunung Rajabasa Berdasarkan Integrasi Citra ASTER, DEM, dan Geologi Permukaan. *Prosiding Seminar Nasional Kebumihan Ke-6*.

- Darmawan, I. G. B., Fahlevi, D. I., Yassar, M. F., dan 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.
- Darmawan, I. G. B., Hidayatika, A., Sarkowi, M., dan Karyanto. 2021. Pemanfaatan Simulasi Numerik Sebagai Studi Pendahuluan Untuk Membangun Model Permeabilitas Zona Potensi Reservoir Panas Bumi. *Prosiding SINTA 4*.
- Darmawan, I. G. B., Rustadi, dan Karyanto. 2023. Hydrothermal fluid flow modeling using numerical simulation to identify potential reservoir zones in the Mount Rajabasa geothermal field. *Kuwait Journal of Science*, 50(3), 376–386.
- Dickson, M. H., dan Fanelli, M. 2004. *What is Geothermal Energy*. Italy: Instituto di Geoscienze e Georisorse-CNR.
- Ditjen EBTKE. 2017. *Buku Potensi Panas bumi Jilid 1*. Jakarta: Direktorat Panas Bumi.
- Endovani, R., dan Putra, A. 2016. Analisis Konduktivitas Termal dan Porositas Sinter Silika Sumber Mata Air Panas di Sapan Maluluang , Kecamatan Alam Pauh Duo , Kabupaten Solok Selatan. *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 65–72.
- Faust, C. R., dan Mercer, J. W. 1977. *Finite-difference model of two-dimensional, single- and two-phase heat transport in a porous medium-version I*. Virginia: U.S Geological Survey.
- Habibirahman, S. A., Lestari, L., dan Kustono, B. 2019. Perhitungan Potensi Cadangan Panas Bumi Lapangan “X” Menggunakan Data Eksplorasi. *Petro. Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 8(1), 20–27.

- Haerudin, N., Wahyudi, Suryanto, W., dan Sarkowi, M. 2013. Analysis of The 3D Geothermal Reservoir Model from Anomaly Magnetic Data Using Mag3D. *The Third Basic Science International Conference*. 1-5.
- Haerudin, N., Despa, D., dan Suharno. 2020. Penentuan Patahan dan Saluran Fluida Panas Bumi Rajabasa Bagian Selatan dengan Kombinasi Metode Second Horizontal Derivatif (SHD) dan Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung*, 1(1), 11–19.
- Handayani, D. T. 2012. *Energi Panas bumi Sebagai Alternatif Energi Terbarukan*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Hardiyatmo, H. C. 2012. *Mekanika Tanah 1 Edisi Keenam*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Huyakorn, P. S., dan Pinder, G. F. 1983. *Computational methods in subsurface flow*. New York: Academic Press.
- Imamuddin, M., dan Al Hanif, B. 2017. Penggunaan Metode Falling Head Dalam Menentukan Daya Serap Air Untuk Mereduksi Genangan Di Kampus FT-UMJ. *Prosiding Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta*.
- Karyanto, Haerudin, N., Zaenudin, A., Suharno, Darmawan, I. G. B., Adli, M., dan Manurung, P. 2021. Numerical modeling for the steady-state condition of the geothermal system in way ratai. *Journal of Applied Science and Engineering (Taiwan)*, 25(3), 447–456.
- Kusumasari, B. A. 2011. Geologi Daerah Waymuli dan Sekitarnya Serta Geokimia Fluida Panas Bumi di Gunung Rajabasa, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. *Skripsi*. Institut Teknologi Bandung.

- Mangga, S. A., Amirudin., Suwarti, T., Gafoer, S., dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumtra*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Mussofan, W., Sutrisno, L., Ramadhan, I., dan Aulia, N. 2016. Geological Aspects to Constrain Geothermal Conceptual Model: Gunung Rajabasa Case Study. *Proceedings The 4th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition*.
- Putriyana, L. 2018. Evaluasi Cadangan Mungkin Untuk Sistem Panas Bumi Vulkanik Dengan Metode Volumetrik: Studi Area Kamojang Dan Lahendong Evaluation. *Buletin Sumber Daya Geologi.*, 13(3), 215-225.
- Rafflesia, F., Haerudin, N., dan Rustadi, R. 2017. Analisis Sebaran Hiposenter Gempa Mikro Dan Poisson's Ratio di Lapangan Panas Bumi Desert Peak Sebelum dan Sesudah Stimulasi *Enhanced Geothermal System (EGS)*. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 3(2), 36–51.
- Rasimeng, S. 2008. Analisis Sesar Gunung Rajabasa Lampung Selatan Sebagai Daerah Prospek Geothermal Berdasarkan Data Anomali Medan Magnet Total. *Jurnal Sains MIPA*, 14(1), 67–72.
- Ridha, M., dan Darminto. 2016. Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi menggunakan Metode Archimedes dan Software Image-J. *Jurnal Fisika Dan Aplikasi*, 12(3), 124–130.
- Saptadji, N. 2002. *Catatan Kuliah "Teknik Panas Bumi"*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Saptadji, N. 2009. *Karakterisasi Reservoar Panas Bumi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.

- Sarkowi, M., dan Wibowo, R. C. 2021. Geothermal Reservoir Identification based on Gravity Data Analysis in Rajabasa Area Lampung. *Riset Geologi dan Pertambangan Indonesian Journal of Geology and Mining*, 31(2), 77-97.
- Stoer, J., dan Bulirsch, R. 1993. *Introduction to numerical analysis*. (2d ed.). New York: Springer-Verlag.
- Suharno. 2010. *Pengembangan Prospek Panas Bumi*. Universitas Lampung: Bandar Lampung.
- Suharno, 2012. *Buku Ajar Sistem Panas Bumi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Suhartono, N. 2012. Pola Sistem Panas Dan Jenis Geothermal Dalam Estimasi Cadangan Daerah Kamojang. *Jurnal Ilmiah MTG*, 5(2), 1-14.
- Suswati., Haerani, N., dan Sutawidjaja, I. S. 2001. *Pemetaan Geologi Gunung Api Rajabasa Kabupaten Lampung Selatan, Lampung*. Bandung: Direktorat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Telford, W. M., Geldart, L. P. dan Sherrif, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Toth, A., dan Bobok, E. 2017. *Flow and Heat Transfer in Geothermal Systems*. Miskolc: elsevier.
- Van Bemmelen, R. W. 1949. *The Geology of Indonesia Volume II: Economic Geology*. The Hague: Government Printing Office.
- Varga, R. S. 1962. *Matrix Iterative Analysis*: Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.