

**PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK DAN METODE VOLUMETRIK
UNTUK MENGHITUNG POTENSI ENERGI PANAS BUMI DI GUNUNG
RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK SELATAN)**

(Skripsi)

Oleh
Ahmad Nasik
2015051029



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

**PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK DAN METODE
VOLUMETRIK UNTUK MENGHITUNG POTENSI ENERGI
PANAS BUMI DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS:
PROSPEK SELATAN)**

Oleh

Ahmad Nasik

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK DAN METODE VOLUMETRIK UNTUK MENGHITUNG POTENSI ENERGI PANAS BUMI DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK SELATAN)

Oleh

AHMAD NASIK

Lokasi Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa terletak pada Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Potensi panas bumi Gunung Rajabasa masih dalam tahap eksplorasi. Salah satu faktor utama yang menyebabkan tahap eksplorasi ini adalah karena belum adanya sumur eksplorasi di wilayah Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menjalankan simulasi numerik pada profil *cross section* pada tiga lintasan yang berada di Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa untuk mendapatkan model aliran fluida *hydrothermal*, menentukan lokasi sumur target (*well targeting*) serta menghitung potensi energi listrik pada prospek selatan Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa dengan metode volumetrik. Simulasi numerik aliran fluida dan aliran panas pada ketiga lintasan menunjukkan pola aliran yang berbeda. Lintasan 1 menunjukkan pola aliran dari tenggara ke barat laut dengan *steam cap dummy well* berada pada rentang 380-1150 meter. Lintasan 2 menunjukkan arah timur tenggara ke barat-barat laut dengan *steam cap* berada pada rentang kedalaman 1050-1620 meter. Lintasan 3 menunjukkan arah timur laut ke barat daya dengan rentang kedalaman *steam cap* pada *dummy well* 830-2740 meter. Hasil yang diperoleh dari perhitungan energi panas bumi yang ada pada lapangan panas bumi gunung rajabasa dengan periode waktu 30 tahun adalah sebesar 220,87 Mwe.

Kata Kunci : Gunung Rajabasa, Simulasi Numerik, Aliran Fluida *Hydrothermal*

ABSTRACT

UTILIZATION OF NUMERICAL SIMULATION AND VOLUMETRIC METHOD TO CALCULATE GEOTHERMAL ENERGY POTENTIAL IN MOUNT RAJABASA (CASE STUDY: SOUTH PROSPECT)

By

AHMAD NASIK

The Geothermal Field of Gunung Rajabasa is located in Kalianda District, South Lampung Regency, Lampung Province. The geothermal potential of Gunung Rajabasa is still in the exploration phase. One of the main factors contributing to this exploration phase is the absence of exploration wells in the area of Gunung Rajabasa Geothermal Field. This study aims to conduct numerical simulations on cross-sectional profiles along three paths within the Gunung Rajabasa geothermal field to obtain a hydrothermal fluid flow model, determine the location of target wells (well targeting), and calculate the electric energy potential in the southern prospect of the Gunung Rajabasa Geothermal Field using the volumetric method. The numerical simulations of fluid and heat flow in the three paths show different flow patterns. Path 1 shows a flow pattern from southeast to northwest with the steam cap dummy well ranging from 380 to 1150 meters. Path 2 indicates an east-southeast to west-northwest direction with a steam cap depth range of 1050 to 1620 meters. Path 3 shows an east-northeast to southwest direction with a steam cap depth range of the dummy well at 830 to 2740 meters. The calculated energy potential of the geothermal energy in the Gunung Rajabasa geothermal field over a period of 30 years is 220.87 MWe.

Keywords: *Mount Rajabasa, Numerical Simulation, Hydrothermal Fluid Flow*

Judul Skripsi

**: PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK
DAN METODE VOLUMETRIK UNTUK
MENGHITUNG POTENSI ENERGI PANAS
BUMI DI GUNUNG RAJABASA (STUDI
KASUS: PROSPEK SELATAN)**

Nama Mahasiswa

: Ahmad Nasik

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2015051029

Program Studi

: Teknik Geofisika

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi pembimbing

Pembimbing 1

Pembimbing 2

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

**I Gede Boy Dermawan, 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 : Dr. Ordas Dewanto, S.Si., M.Si.

2. Dekan Fakultas Teknik

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

NIP.197509282001121002

Tanggal Ujian Skripsi : 22 Maret 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, 16 Mei 2024



Ahmad Nasik
NPM.2015051029

RIWAYAT HIDUP



Ahmad Nasik, lahir di Bandar Lampung pada tanggal 22 Agustus 2002. Anak ke dua dari tiga bersaudara pasangan dari Bapak Jamhari dan Ibu Siti Munifah. Penulis menempuh pendidikan akademik yang dimulai dari Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Tunas Melati 1 diselesaikan pada tahun 2008, kemudian melanjutkan pendidikan di SDN 1 Rejosari diselesaikan pada tahun 2014 , penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 1 Natar diselesaikan pada tahun 2017 dan melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 1 Natar di selesaikan pada tahun 2020.

Pada tahun 2020 penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur tes (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa penulis turut aktif dalam beberapa organisasi kemahasiswaan dan penelitian kebumian. Pada tahun 2021 Penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana) Universitas Lampung, dalam kurun waktu 3.5 tahun penulis melakukan pengembangan kemampuan khususnya dalam bidang panas bumi di Indonesia.

Pada tahun 2022 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT Ruang Raya Indonesia dengan judul "Netlify Sebagai Solusi Deployment Untuk Aplikasi Website Dengan Fitur Crud Dan Restful Api ". Pada tahun 2023, Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul "Pemanfaatan Simulasi Numerik Dan Metode Volumetrik Untuk Menghitung Potensi Energi Panas Bumi Di Gunung Rajabasa (Studi Kasus: Prospek Selatan)"

PERSEMBAHAN

Puji syukur Penulis panjatkan kepada tuhan yang maha esa atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk :

IBU DAN BAPAK TERCINTA

JAMHARI

&

SITI MUNIFAH

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, support, semangat, dan segala dukungan yang tidak terhingga. Dimana Saya tidak bisa membalas semua kasih sayang yang telah diberikan hanya dengan persembahan kata-kata cinta di skripsi ini. Semoga bapak dan ibu sehat selalu dan bisa selalu bahagia di setiap pencapaian Kami anak-anak tercinta. Saya akan selalu berusaha menjadi anak yang terbaik untuk bapak dan ibu.

KAKAK DAN ADIK TERCINTA

MAULIDA ALFIATUN HASANAH

&

AKHSAN MUJTABA

Saudara sekaligus motivasi ku. Terimakasih atas segala doa, semangat dan dukungannya

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung Semua yang terlibat dalam proses pembuatan skripsi ini, saya ucapkan terima kasih.

“Ilmu tidak akan didapatkan kecuali dengan enam perkara, Kecerdasan, Ambisi (Terhadap Ilmu), Kesungguhan, Harta Benda (Bekal), Bimbingan Seorang Guru, dan Waktu yang Lama”

Imam asy-syafi’i

“Diantara balasan kebaikan, adalah kebaikan selanjutnya dan diantara balasan kejelekan, adalah kejelekan selanjutnya ”

Tafsir Al-Quran Al-‘Azhim, 7:583

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa , karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul **“PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK DAN METODE VOLUMETRIK UNTUK MENGHITUNG POTENSI ENERGI PANAS BUMI DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK SELATAN)”**. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan Skripsi ini adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung. Selama penulisan Skripsi ini banyak sekali terdapat hambatan yang dialami. Namun berkat adanya bantuan, serta bimbingan dari berbagai pihak, hingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa tidak tertutup kemungkinan didalam Skripsi ini terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan Skripsi ini. Semoga Skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan

Bandar Lampung, 16 Mei 2024

Penulis,



Ahmad Nasik
NPM.2015051029

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, yang telah melimpahkan nikmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik.

Skripsi ini berjudul **“PEMANFAATAN SIMULASI NUMERIK DAN METODE VOLUMETRIK UNTUK MENGHITUNG POTENSI ENERGI PANAS BUMI DI GUNUNG RAJABASA (STUDI KASUS: PROSPEK SELATAN)”** merupakan skripsi dari penelitian yang dilakukan penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Adapun dalam penyelesaian Skripsi ini, terdapat banyak pihak yang terlibat, yang mana pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada :

1. Allah SWT, yang selalu memberikan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya, kemudahannya, dan lain-lain yang Penulis tidak mampu untuk menuliskannya satu persatu, sehingga Penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik.
2. Diri saya Sendiri, terimakasih sudah ingin terus bersabar dan berjuang, proses yang tidak mudah bukan tidak mungkin.
3. Ayah dan Ibu yang selalu memberikan dukungan, doa, dan kasih sayang yang tak terhingga. Penulis sangat menghargai semua pengorbanan dan perhatian yang diberikan oleh Ayah dan Bunda.
4. Kakak saya Maulida Alfiatun Hasanah, yang saya sayangi, yang selalu memberi motivasi serta senantiasa mendoakan.
5. Adik saya Akhsan Mujtaba, yang juga saya sayangi, walaupun terkadang menyebalkan dan selalu memberi semangat dan senantiasa mendoakan.
6. Bapak Dr. Karyanto, S.Si., M.T. sebagai Ketua Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung dan pembimbing satu yang telah memberikan pengarahan, dalam membimbing pengerjaan skripsi ini.

7. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan pengarahan dengan penuh kesabaran, kebaikan hati dan kesedian bapak dalam membimbing, serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini
8. Dr. Ordas Dewanto, M.Si. selaku penguji yang telah meluangkan waktunya, serta senantiasa memberikan saran dan masukan.
9. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan.
10. Sahabat dan teman-teman terdekat, yaitu Asep, Ramot, Mutiara, Lopia, Vito, Aldi, Priyandi, Nisa. Begitu banyak yang kalian berikan. Terimakasih sudah hadir dan bertahan. Banyak cinta untuk kalian.
11. Warga laboratorium Pengolahan Pemetaan Data Geofisika (PPDG) yang telah menjadi tempat belajar, menghabiskan waktu, dan banyak membantu dalam berdiskusi. Terimakasih atas warna yang tercipta selama ini.
12. Warga laboratorium Eksplorasi Geothermal yang telah menjadi tempat diskusi, kalian luar biasa, terimakasih untuk semuanya.
13. Warga laboratorium instrumentasi yang telah menjadi tempat berproses dan menghabiskan banyak waktu istimewa, tempat dimana penulis merasakan kehangatan, dan ilmu yang bermanfaat.
14. Keluarga Teknik Geofisika 2020 (PATAKIS) yang telah banyak memberikan pengalaman luar biasa, dan berbagi waktu bersama selama ini. Terimakasih atas kenangan tak terlupakan , dan semoga kita semua sukses selalu
15. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan terimakasih banyak.

Bandar Lampung, 16 Mei 2024

Penulis



Ahmad Nasik

NPM. 2015051029

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
PERSETUJUAN.....	v
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN.....	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang dan Masalah	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2 Fisiografi dan Morfologi Daerah Gunung Rajabasa	5
2.3 Stratigrafi Gunung Rajabasa	6
2.4 Struktur Geologi Gunung Rajabasa.....	8
2.5 Manifestasi Gunung Rajabasa	10
2.6 Penelitian Terdahulu	11

III. TEORI DASAR.....	15
3.1. Panas Bumi.....	15
3.1.1. Sistem Panas Bumi.....	16
3.1.2. Manifestasi Panas Bumi.....	18
3.2. Sifat Batuan Panas Bumi.....	19
3.2.1. Porositas	20
3.2.2. Permeabilitas	21
3.2.3. Densitas	24
3.2.4. Kalor Jenis.....	25
3.2.5. Konduktifitas Panas Batuan	26
3.3. Metode Volumetrik.....	26
3.3.1. Panas yang Tersimpan dalam Batuan.....	26
3.3.2. Panas yang Tersimpan dalam Fluida.....	27
3.3.3. Perhitungan Metode Volumetrik	28
3.4. Solusi Persamaan Numerik:	30
3.4.1. Algoritma Newton-Raphson	30
3.4.2. Solusi Persamaan Linier.....	31
3.5. Persamaan Aliran dan Perpindahan Panas	35
3.5.1. Persamaan Aliran Tanah.....	35
3.5.2. Persamaan Perpindahan Energi Panas.....	36
3.5.3. Persamaan Fungsi Permeabilitas.....	37
IV. METODE PENELITIAN	38
4.1. Tempat dan Waktu Penelitian	38
4.2. Alat dan Bahan Penelitian	40
4.3. Prosedur Penelitian.....	40
4.4. Diagram Alir	43
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	47
5.1. Akuisisi dan Pengukuran Data Lapangan	47
5.1.1. Data Densitas Porositas, dan Permeabilitas Batuan.....	48
5.1.2. Data Suhu	52
5.2. Karakteristik Batuan.....	53
5.3. Pembahasan	56
5.3.1. Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 1.	56
5.3.2. Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 2	64

5.3.3. Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 3	73
5.3.4. Profil Suhu dan Tekanan <i>dummy well</i> Lintasan 1	83
5.3.5. Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy well</i> Lintasan 2	84
5.3.6. Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy well</i> Lintasan 3	86
5.3.7. Perhitungan Potensi Sumber Energi Panas Bumi	88
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	93
6.1. Kesimpulan.....	93
6.2. Saran.....	94
DAFTAR PUSTAKA	95

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Penelitian Terdahulu	11
Tabel 2. Klasifikasi porositas (Koesoemadinata, 1980)	20
Tabel 3. Klasifikasi permeabilitas (Koesoemadinata, 1980)	23
Tabel 4. Nilai densitas batuan sedimen (Telford dkk., 1976)	24
Tabel 5. Nilai densitas batuan beku (Telford dkk., 1976).....	25
Tabel 6. Nilai densitas batuan Metamorf (Telford dkk., 1976)	25
Tabel 7. Jadwal Kegiatan Penelitian.....	39
Tabel 8. Alat dan Bahan.....	40
Tabel 9. Jenis manifestasi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa.....	48
Tabel 10. Hasil pengukuran densitas dan porositas	50
Tabel 11. Hasil pengukuran permeabilitas.....	51
Tabel 12. Hasil pengukuran suhu pada daerah penelitian	52
Tabel 13. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 1	54
Tabel 14. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 2	54
Tabel 15. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 3	55
Tabel 16. Parameter potensi sumber energi panas bumi pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa.	90

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Peta daerah Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa	4
Gambar 2. Tatanan fisiografi daerah Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993). ...	5
Gambar 3. Tatanan geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993).....	6
Gambar 4. Peta geologi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993)	7
Gambar 5. Peta struktur geologi regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021; Mangga dkk., 1993).	9
Gambar 6. Peta manifestasi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa.....	11
Gambar 7. Model konseptual sistem panas bumi (Cumming dan Mackie, 2010)	17
Gambar 8. Prinsip uji permeabilitas <i>falling head</i> (Imamuddin dan Al Hanif, 2017)	22
Gambar 9. Diagram alir akuisisi data lapangan.....	44
Gambar 10. Diagram alir pengolahan data	46
Gambar 11. Peta persebaran titik akuisisi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa	47
Gambar 12. Dokumentasi sampel batuan	48
Gambar 13. Dokumentasi sampel tanah	49
Gambar 14. Proses pengukuran permeabilitas di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil	50
Gambar 15. Dokumentasi akuisisi suhu pada manifestasi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa	52

Gambar 16. Profil <i>cross section</i> dan parameter masukan model simulasi lintasan 1	56
Gambar 17. Model sebaran panas lintasan 1 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	58
Gambar 18. Model sebaran fasa fluida 1 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun.....	60
Gambar 19. hasil simulasi model aliran massa fluida lintasan 1 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	62
Gambar 20. hasil simulasi model aliran massa fluida uap lintasan 1 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	64
Gambar 21. Profil <i>cross section</i> geologi dan parameter masukan model simulasi numerik lintasan 2	65
Gambar 22. Model sebaran panas lintasan 2 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	67
Gambar 23. Model sebaran fasa fluida pada lintasan 2 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun.....	69
Gambar 24. Hasil simulasi model aliran massa fluida air lintasan 2 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c).10000, (d)20000, (e)30000 tahun	71
Gambar 25. Model sebaran fluida uap lintasan 2 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c).10000, (d)20000, (e)30000 tahun	73
Gambar 26. Profil <i>cross section</i> dan parameter masukan model simulasi numerik lintasan 3	73
Gambar 27. Model sebaran panas lintasan 3 pada iterasi (a)1000,(b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	75
Gambar 28. Model sebaran fasa fluida lintasan 3 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	77
Gambar 29. Hasil simulasi model aliraan massa fluida air lintasan 3 pada iterasi (a)1000, (b)5000 (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	79
Gambar 30. Hasil simulasi model alran massa fluida uap lintasan 3 pada iterasi (a)1000, (b)5000, (c)10000, (d)20000, (e)30000 tahun	81
Gambar 31. Perbandingan antara <i>dummy well</i> pada lintasan 1 dengan sumur bor dangkal (a) <i>dummy well</i> 2 lintasan 3, (b) <i>dummy well</i> 3 lintasan 3.....	82

Gambar 32. <i>Dummy well</i> lintasan 1	83
Gambar 33. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 1 (a) <i>dummy well</i> 1, (b) <i>dummy well</i> 2, (c) <i>dummy well</i> 3.	84
Gambar 34. <i>Dummy well</i> lintasan 2.....	84
Gambar 35. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 2 (a) <i>dummy well</i> 1, (b) <i>dummy well</i> 2, (c) <i>dummy well</i> 3.	85
Gambar 36. Titik <i>dummy well</i> lintasan 3	86
Gambar 37. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 2 (a) <i>dummy well</i> 1, (b) <i>dummy well</i> 2, (c) <i>dummy well</i> 3.	87
Gambar 38. Zona potensi reservoir (a)lintasan 1, (b)lintasan 2, (c)lintasan 3	88
Gambar 39. Estimasi potensi reservoir panas bumi Gunung Rajabasa	89

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Energi panas bumi adalah salah satu jenis energi terbarukan yang datang dari aktivitas tektonik bumi. Indonesia memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia, yang diidentifikasi sebagai "Wilayah *Ring Of Fire*". Geologi Indonesia, yang termasuk dalam kategori daerah subduksi dan gunungapi, sangat memengaruhi keberadaan potensi panas bumi (Haerudin dkk., 2017). Tekanan yang dihasilkan oleh subduksi tersebut dilepaskan secara berkala melalui retakan-retakan yang beriringan dengan pinggiran lempeng. Suhu pada manifestasi permukaan cukup tinggi, sehingga berkemungkinan inti panas bumi sangat tinggi, hal ini sesuai untuk eksplorasi energi panas bumi, karena beberapa manifestasi panas bumi, seperti *hotsprings* dan fumarola, ditemukan di lereng gunung bagian utara dan selatan. Oleh karena itu, sangat penting untuk melakukan pengamatan mengenai kondisi geologi dan panas bumi di wilayah Panas Bumi Gunung Rajabasa. Provinsi Lampung mempunyai potensi panas bumi yang sangat signifikan. Salah satunya adalah Manifestasi panas bumi Gunung Rajabasa, yang terletak di Kecamatan Rajabasa, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Untuk memanfaatkan potensi ini, metode geofisika diperlukan untuk menemukan sesar dan sistem pengendalian panas bumi.

Potensi panas bumi Gunung Rajabasa masih dalam tahap eksplorasi. Salah satu alasan mengapa aktivitas eksplorasi dan pengembangan di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa masih berada ditahap eksplorasi adalah studi kelayakan operasi

produksi masih belum selesai. Salah satu faktor utama yang menyebabkan tahap eksplorasi ini adalah karena belum adanya sumur eksplorasi di daerah panas bumi Gunung Rajabasa yang menjadi subjek penelitian ini. Untuk mengeksplorasi sumber daya panas bumi, sejumlah penelitian sebelumnya telah dilakukan di Gunung Rajabasa. Penelitian geofisika telah dilakukan sebelumnya oleh Darmawan dkk, pada tahun 2015 dengan menggunakan pendekatan observasi lapangan dan geologi. Pada tahun 2021, Darmawan dkk juga melakukan penelitian yang sama dengan pendekatan tambahan yang menggunakan simulasi numerik reservoir aliran fluida hidrotermal. Model numerik reservoir sangat penting dalam proses penilaian potensi panas bumi dan pengembangan strategi, ini adalah proses penting dan peran penting dalam eksplorasi panas bumi. Metode ini telah menjadi alat yang kuat dan dikenal dalam memprediksi, pengambilan keputusan, menganalisis ketidakpastian, mengoptimalkan, dan mengevaluasi produksi reservoir panas bumi. Selain itu, pemodelan numerik meningkatkan pemahaman mengenai sistem panas bumi, ini terutama berlaku untuk model hidrologi, yang berkaitan dengan laju aliran fluida hidrotermal.

Untuk menilai apakah lapangan panas bumi memenuhi syarat untuk pengembangan lebih lanjut sebagai sumber energi panas bumi (PLTP), langkah pertama adalah menilai cadangan yang mungkin berada di lapangan panas bumi. Untuk memperkirakan kemungkinan energi listrik panas bumi, metode volumetrik dapat digunakan (Suhartono, 2014). Dalam penelitian ini, metode volumetrik digunakan untuk mengestimasi cadangan panas bumi potensial dengan menggunakan perhitungan numerik simulasi aliran fluida panas bumi di wilayah panas bumi Gunung Rajabasa. Diharapkan bahwa penelitian ini akan memberikan kontribusi signifikan dalam mengidentifikasi dan penilaian potensi sumber daya panas bumi di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa khususnya yang berada pada prospek selatan.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Melakukan simulasi numerik untuk membuat model 2D aliran fluida *hydrothermal* dan perpindahan energi panas di daerah panas bumi Gunung Rajabasa pada prospek Selatan.
2. Menentukan lokasi sumur uji potensial (*Well Targetting*) berdasarkan model 2D daerah panas bumi Gunung Rajabasa pada prospek Selatan.
3. Menggunakan metode volumetrik untuk menghitung potensi energi listrik sumber daya energi panas bumi Gunung Rajabasa pada prospek Selatan menggunakan metode volumetrik.

1.3. Batasan Masalah

Pengamatan ini berfokus pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa, khususnya prospek Selatan. Informasi yang digunakan dalam studi ini diperoleh dari hasil akuisisi lapangan, mencakup karakteristik batuan. Pada prospek Selatan lapangan panas bumi Gunung Rajabasa, dibuat tiga lintasan, dua lintasan diantaranya mengarah dari tenggara, dan satu lintasan berasal dari barat laut.

Selanjutnya, data ini akan dimodelkan dengan perangkat lunak *Hydrotherm Interactive 2D*. Pemodelan ini adalah untuk memperoleh gambaran potensi energi listrik yang dapat dihasilkan dari wilayah tersebut. Metode volumetrik yang digunakan dalam metode ini memungkinkan analisis menyeluruh potensi energi panas bumi Gunung Rajabasa.

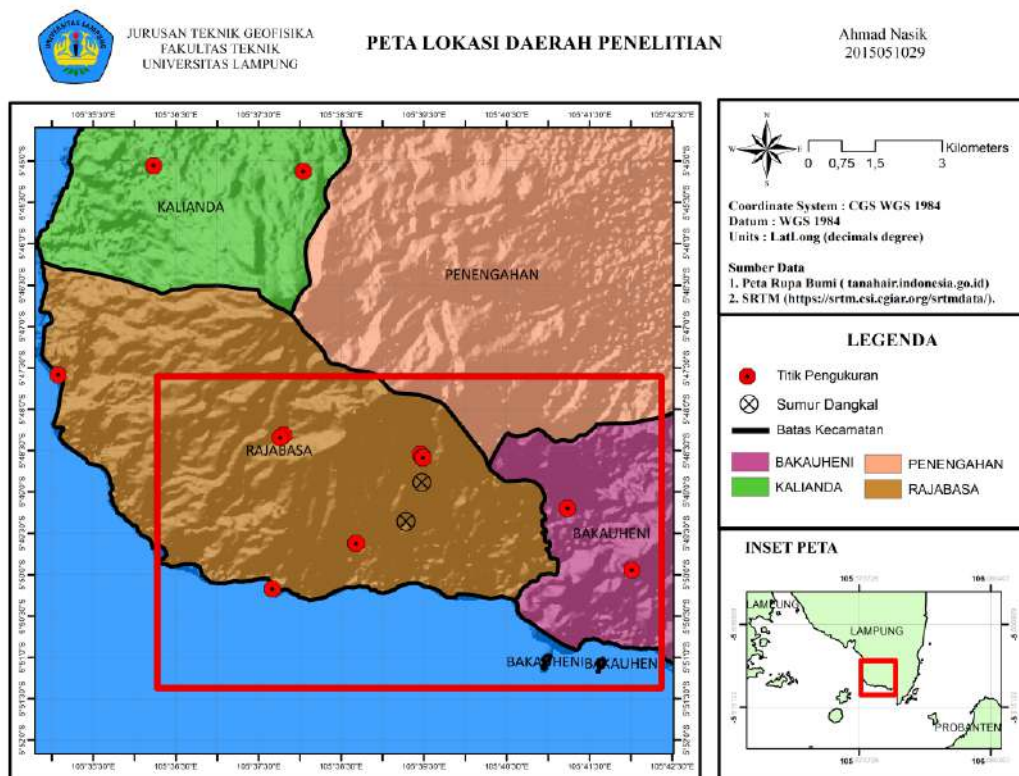
1.4. Manfaat Penelitian

Studi ini memberikan data dan ilustrasi tentang kondisi geologi, dan model *steady state* 2D aliran fluida *hydrothermal* pada tiga lintasan yang terletak di daerah panas bumi Gunung Rajabasa. Dengan tujuan mengurangi risiko eksplorasi di lokasi tersebut, fokus utama penelitian adalah meningkatkan perhatian terhadap area yang dapat digunakan untuk pengeboran sumur (*Well Targeting*).

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

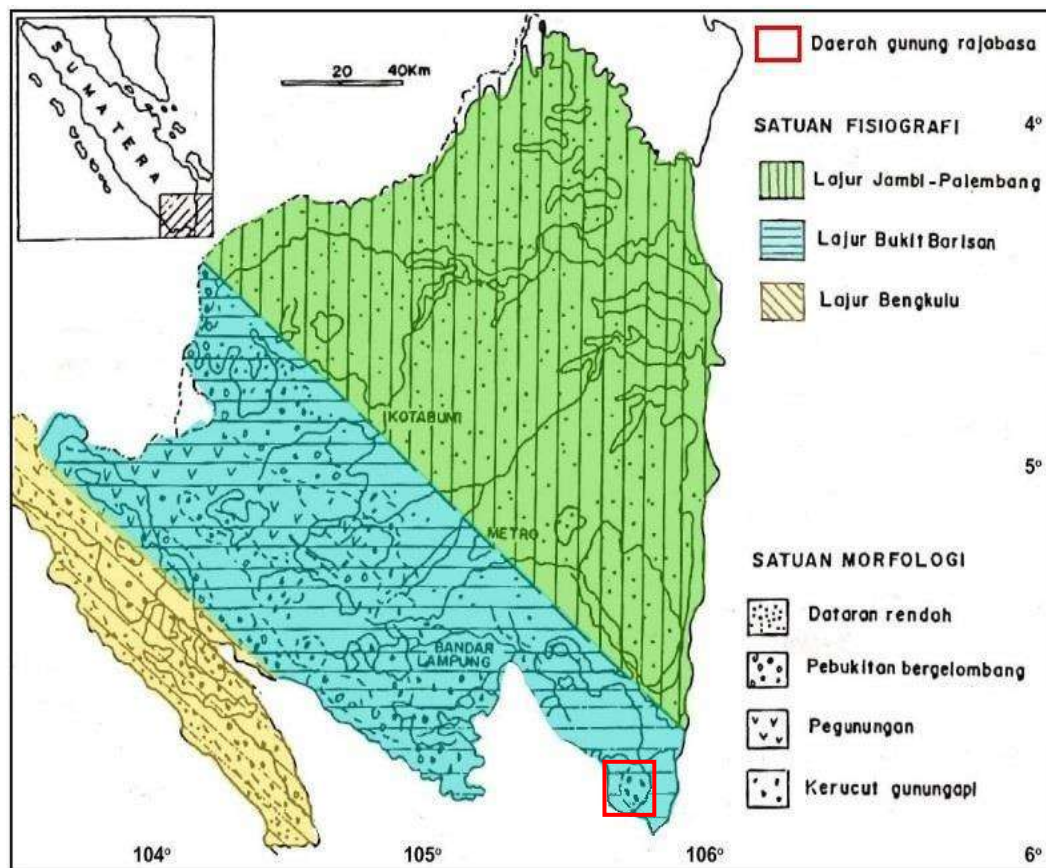
Lokasi wilayah penelitian berada di daerah panas bumi Gunung Rajabasa, Kecamatan Rajabasa, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung. Secara geografis wilayah ini berada pada titik koordinat $05^{\circ}46'55.92''$ LS dan $105^{\circ}32.90''$ BT. Berikut ini wilayah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta daerah Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa

2.2 Fisiografi dan Morfologi Daerah Gunung Rajabasa

Menurut Mangga dkk., (1993) satuan fisiografi yang dapat diamati melalui **Gambar 2**. Tercatat bahwa Provinsi Lampung dibagi menjadi tiga jenis fisiografi, yakni Lajur Jambi-Palembang, Lajur Bengkulu, dan Lajur Bukit Barisan, dengan satuan morfologi Provinsi Lampung yang terbagi menjadi empat, yakni dataran rendah, perbukitan bergelombang, pegunungan, serta kerucut gunung api. Daerah Gunung Rajabasa dengan berdasarkan pembagian fisiografi dan morfologi tersebut termasuk ke dalam daerah fisiografi Lajur Bukit Barisan dengan satuan morfologi kerucut gunung api yang berbatasan dengan garis pantai.



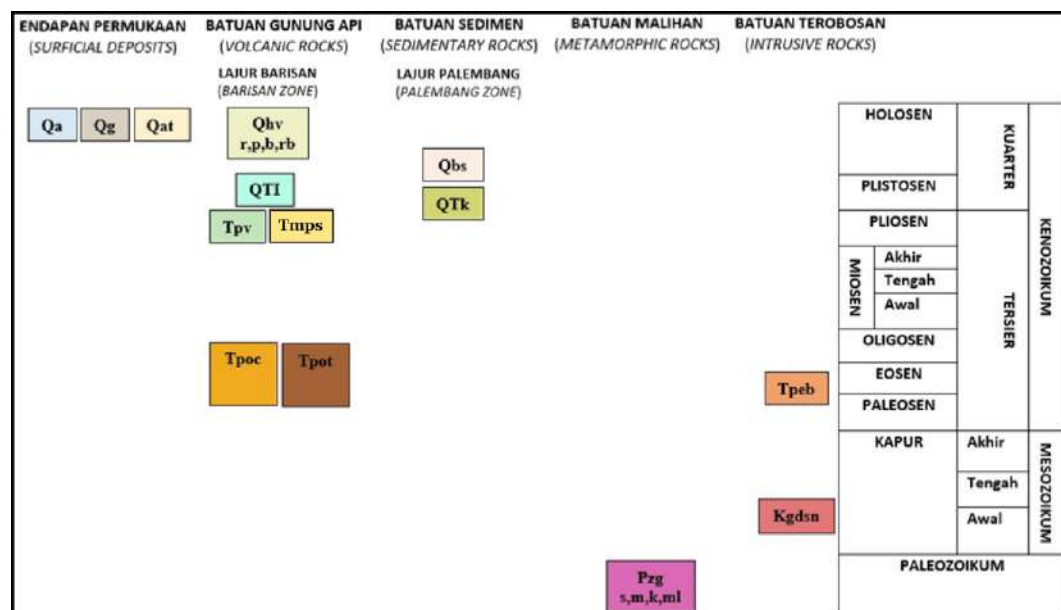
Gambar 2. Tatanan fisiografi daerah Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993).

Menurut Erfani dkk., (2022) bahwasannya ciri-ciri fisik pegunungan yang berada di Provinsi Lampung merupakan karakteristik topografi pegunungan Bukit Barisan yang terletak di sebelah barat Provinsi Lampung. Ketinggian dari rangkaian pegunungan ini mampu mencapai setidaknya 1964 mdpl yang membentang dari barat laut hingga tenggara. Menurut Mangga dkk., (1993) material batuan

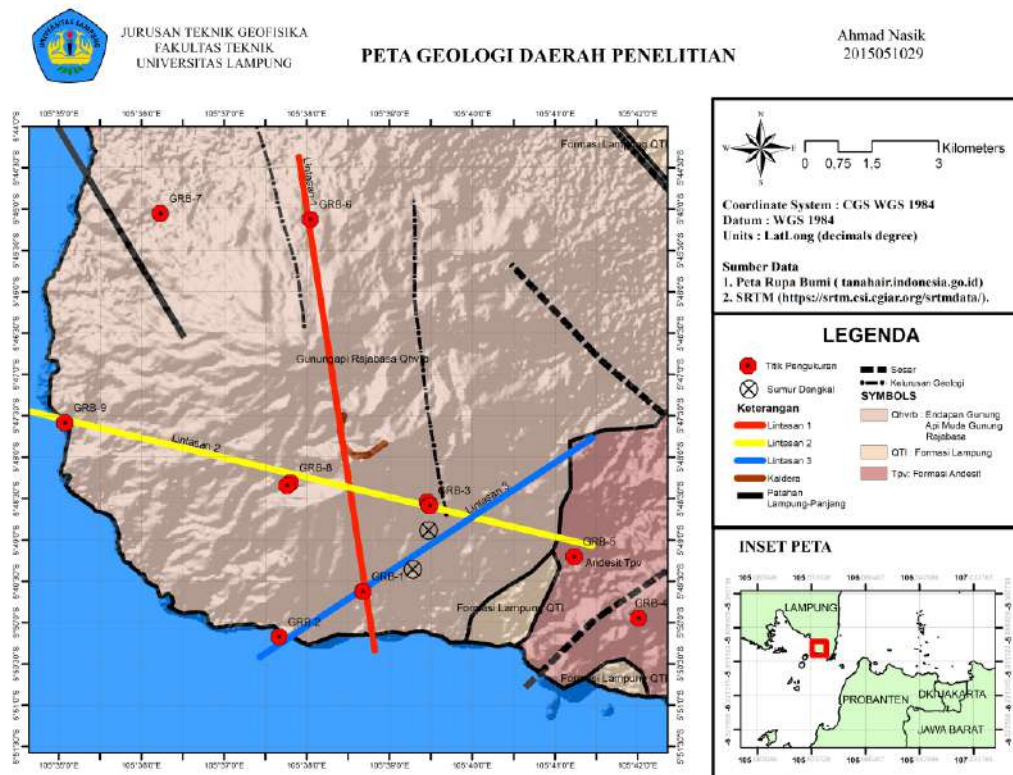
pembentuknya terdiri atas breksi gunung api, lava dan teralterasi hidrotermal, dengan area dataran yang bergelombang yang mencakup lebih dari 60% dari total luas lembar, dan terdiri atas endapan vulkaniklastik tersier hingga kuartar serta aluvium dengan ketinggian beberapa puluh meter di atas permukaan laut. Pegunungan Bukit Barisan yang berada di kisaran 25% hingga 30% dari total luas lembar tersebut terdiri dari batuan beku serta malihan dan batuan gunungapi muda. Lereng-lereng yang ditemukan bertopografi berlereng tinggi dengan ketinggian bervariasi mulai dari 500 mdpl hingga 1680 mdpl. Wilayah pantai memiliki topografi yang cukup beragam dan terdiri dari perbukitan kasar yang mampu mencapai 500 mdpl dan terdiri dari batuan gunungapi tersier serta kuartar dan batuan terobosan.

2.3 Stratigrafi Gunung Rajabasa

Berikut ini adalah stratigrafi regional wilayah Gunung Rajabasa yang dapat diamati berdasarkan pada peta geologi regional Lembar Tanjung Karang yang terdapat pada **Gambar 3**, dan dapat terlihat pada **Gambar 4** wilayah pengamatan berada pada Endapan Gunungapi Muda Gunung Rajabasa (Qhvr_b), Formasi Lampung (QTI), serta Andesit Tersier (Tpv) (Mangga dkk., 1993).



Gambar 3. Tatanan geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993).



Gambar 4. Peta geologi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa (Mangga dkk., 1993)

1. Endapan Gunung Api Muda Gunung Rajabasa (Qhvr)

Mayoritas wilayah Gunung Rajabasa terdiri dari bentuk batuan termuda yang dikenal sebagai satuan gunung api muda (Qhv). Endapan gunung api muda berumur holosen terdiri dari batuan lava (andesit-basal), breksi, dan tuf dengan tebal hingga ratusan meter. Batuan ini terdistribusi di sekitar gunung dan mampu menyerap di formasi lain (Mangga dkk., 1993).

2. Formasi Lampung (QTI)

Formasi Lampung (QTI) dianggap mendominasi sebagian besar wilayah Lembar Tanjung Karang, terutama wilayah timur dan timur laut. Formasi ini terbentuk di lingkungan terestrial-fluvial dan air asin, di mana endapan kuartar menindih satuan yang lebih tua secara tidak selaras. Penyebarannya mencapai lajur busur belakang. Formasi Lampung (QTI) adalah formasi berumur pleistosen yang tersusun dari tuf berbatu apung, tuf riolitik, batu lempung tufan, dan batu pasir tufan, serta tuf

vulkanik klastik tufan. Batuan bentuk ini biasanya berwarna putih-kelabu dan memiliki tekstur halus-menengah. Formasi ini memiliki arah kelurusan barat laut-tenggara, menurut interpretasi gambar satelit (Mangga dkk., 1993)

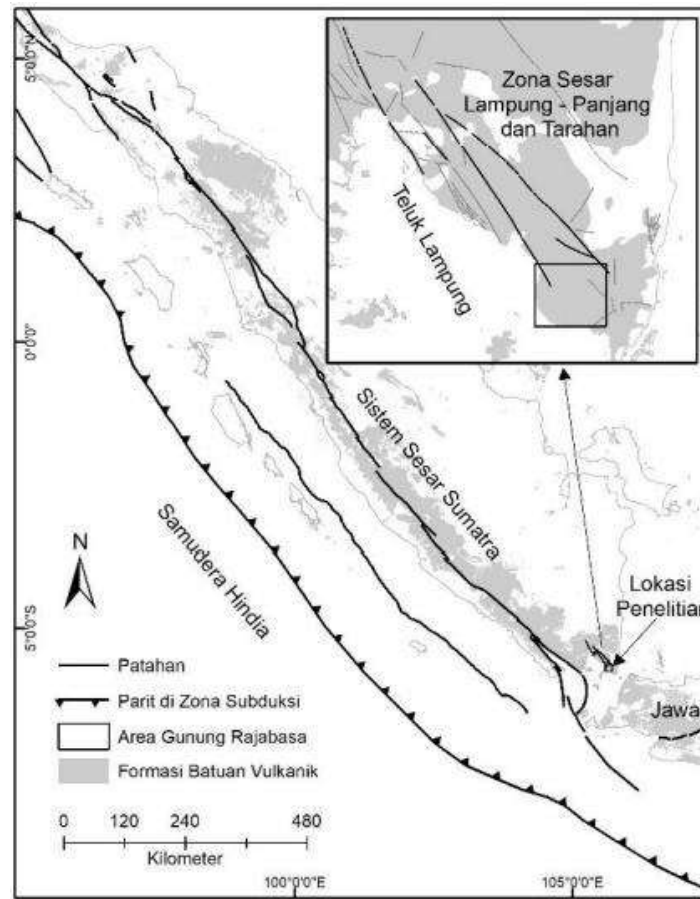
3. Satuan Andesit (Tpv)

Menurut Mangga dkk., (1993) satuan Andesit (Tpv) adalah lava dengan komposisi andesit berwarna kelabu tersingkap segar, ditindih tidak selaras oleh Formasi Lampung, dan memiliki kekar lembar yang sangat kuat yang terbentuk di lingkungan terestrial.

2.4 Struktur Geologi Gunung Rajabasa

Wilayah penelitian daerah Gunung Rajabasa, Kecamatan Rajabasa, Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung terletak dalam wilayah geologi regional Lembar Tanjung Karang, sesuai dengan peta geologi regional wilayah panas bumi Gunung Rajabasa yang ditunjukkan pada **Gambar 4**.

Mangga dkk., (1993) sesar-sesar yang berarah barat laut-tenggara adalah sesar yang kompleks dan umum di daerah tersebut. Sangat tersebar luas, dengan masing-masing sesar panjangnya antara 25 km dan 35 km. Sesar yang paling banyak ditemukan di bagian barat daya Lajur Barisan, tetapi mungkin terletak di bawah runtunan penutup endapan kuartar. Sejarah Lajur Barisan yang rumit ditunjukkan oleh gerakan turun dan berbalik. Sesar Lampung-Panjang dan Menanga adalah nama tak resmi dari dua sesar besar ini. **Gambar 5** menunjukkan bahwa sesar-sesar ini dianggap sebagai gabungan atau bagian dari sistem sesar Sumatera.



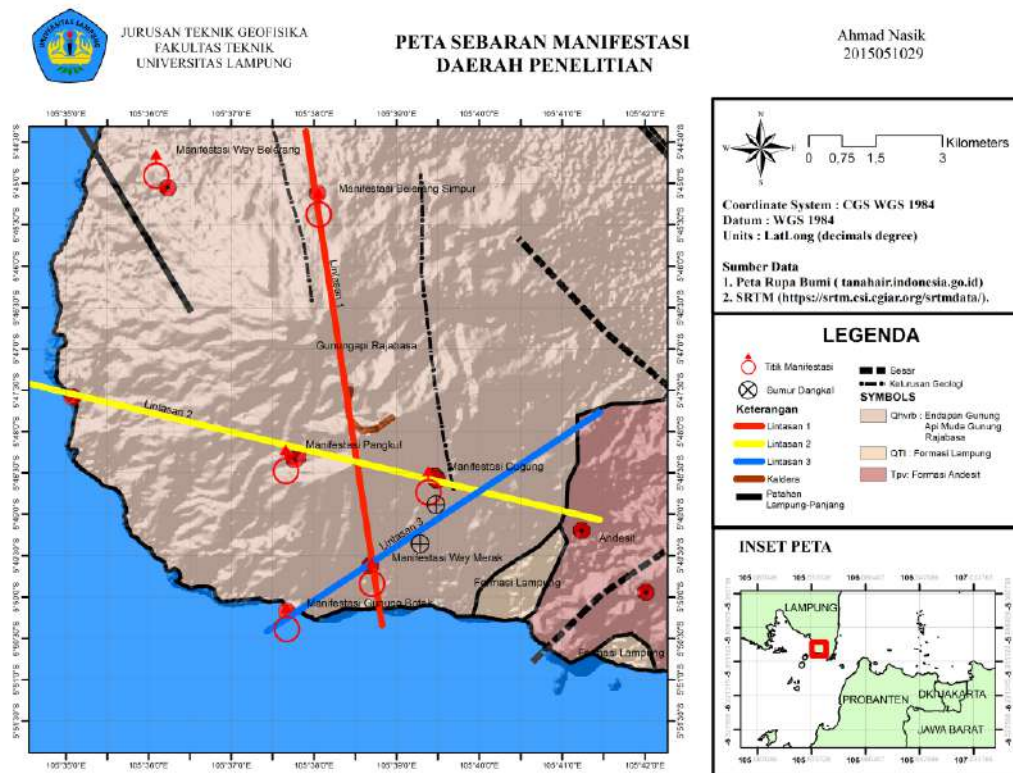
Gambar 5. Peta struktur geologi regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021; Mangga dkk., 1993).

Sistem panas bumi Gunung Rajabasa dikelola oleh sesar Lampung, sesar geser berarah barat laut tenggara (Haerudin dkk., 2013). Kawah adalah struktur geologi lain yang berkembang selain sesar. Sebagaimana dinyatakan oleh Rasimeng, (2008) adanya kawah sebagai ekspresi dari potensi panas bumi merupakan satu dari banyaknya faktor penting yang menentukan adanya potensi panas bumi di wilayah tersebut. Kawah-kawah tersebut adalah Kawah Puncak Gunung Rajabasa, Kawah Puncak Gunung Belerang, Kawah Way Belerang, dan Kawah Simpur. Kawah Puncak Gunung Rajabasa berada di puncak Gunung Rajabasa, dan Kawah Puncak Gunung Belerang berada di puncak Gunung Belerang. Di sekeliling kawah terdapat gawir terjal yang terbentuk dari letusan yang diikuti oleh fasa penghancuran, yang membentuk morfologi kawah.

2.5 Manifestasi Gunung Rajabasa

Pada Lapangan panas bumi Gunung Rajabasa pusat erupsinya lebih jelas dan memiliki kerucut vulkanik, yang menunjukkan sejarah vulkanisme awal. Seismisitas yang ada di bawah puncak Rajabasa mendukung terjadinya vulkanisme muda, yang terkait dengan suhu dan lebih tinggi dan kurangnya proses pendinginan di sistem panas bumi atau adanya kemungkinan aktivitas magma yang kuat ke dalam sistem panas bumi. Permukaan menampilkan area alterasi argilik bersuhu rendah, yang mungkin terkait dengan vulkanisme yang baru terjadi dan sedikit denudasi dan peningkatan. Oleh karena itu, diperkirakan akan terdapat batuan reservoir dengan porositas dan permeabilitas yang cukup, yang mungkin terkait dengan Tuff Lampung, sehingga permeabilitas yang terdistribusi secara merata lebih mungkin terjadi daripada sistem *fault-hosted* (Apriani., 2021).

Adanya sistem panas bumi biasanya ditunjukkan oleh adanya tanda-tanda di permukaan. Adanya gejala yang muncul di permukaan mengindikasikan keberadaan sumber panas bumi pada lapisan dalam yang dikenal sebagai reservoir. Fluida panas bumi tidak mencapai permukaan tanpa melalui saluran media tertentu. Cairan panas bumi mengalir melalui retakan atau patahan yang terbentuk melalui proses geologi. Manifestasi tidak selalu muncul secara tepat di atas reservoir. Untuk menentukan lokasi reservoir yang akurat, diperlukan analisis lebih lanjut. Oleh karena itu, pengetahuan mengenai jenis patahan dan arah aliran fluida harus diketahui secara detail. Terdapat patahan yang dapat mengalirkan (*leaking*) fluida, dan sebaliknya, ada patahan yang tidak dapat mengalirkan (*sealing*) fluida. Saluran fluida panas bumi umumnya terjadi melalui patahan (*leaking*) yang mampu mengalirkan fluida. (Haerudin dkk., 2020). Gunung Rajabasa memiliki manifestasi yang terdapat pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Peta manifestasi Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa.

2.6 Penelitian Terdahulu

Studi sebelumnya di daerah Gunung Rajabasa, Lampung Selatan, dapat dicermati pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
1	Haerudin dkk., (2009)	Tahanan Jenis dan Geotermometer	Reservoir panas bumi Gunung Rajabasa terletak pada kedalaman ≤ 450 meter dan memiliki nilai tahanan jenis ≤ 35 ohm, yang terdiri dari batuan tuf pasir. Suhu reservoir berada pada suhu sedang yaitu $212,08^{\circ}\text{C}$ dengan potensi daya sebesar $12,5 \text{ MW/Km}^2$.

No	Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
2	Darmawan dkk., (2013)	Penginderaan Jauh (Remote Sensing) Integrasi Citra ASTER dan DEM	Mayoritas wilayah Gunung Rajabasa terdiri dari perbukitan curam, berdasarkan interpretasi citra ASTER dan ASTER DEM. Data ASTER DEM menunjukkan bahwa terdapat 174 kelurusan dengan arah utama dari barat laut ke tenggara, sejalan dengan sesar Lampung - Panjang.
3	Karyanto dkk., (2021)	Simulasi Numerik	Hasil dari simulasi, yang dilakukan selama 25.000 kali iterasi, menunjukkan kondisi lunak untuk sistem panas bumi Way Ratai. Data numerik menunjukkan bahwa reservoir panas bumi berpotensi memiliki panjang sekitar 9 km, ketebalan antara 0,5 hingga 1,5 km, dan suhu berkisar antara 250 hingga 350 °C.
4	Darmawan dkk., (2021)	Fault fracture density (FFD) DEM ALOS PALSAR	Kelurusan dan FFD dengan sudut azimuth 45°, 135°, 225°, dan 315° diidentifikasi sebagai arah struktur yang sebagian selaras dengan sistem sesar Sumatera, sementara sebagian lainnya memotong sistem sesar utama. Hubungan antara zona lemah (<i>fracturing</i>) dan zona reservoir panas bumi diketahui dari zona <i>upflow</i> yang memiliki densitas struktur tinggi di manifestasi Way Belerang, dan zona <i>outflow</i> di manifestasi mata air panas Gunung Botak.

No	Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
5	Apriani (2021)	Gayabarat	Panas bumi dengan densitas batuan rendah berkisar antara 2,1 gr/cc - 2,2 gr/cc, sedang berkisar antara 2,2 gr/cc - 2,4 gr/cc, dan tinggi berkisar antara 2,5 gr/cc - 2,9 gr/cc diidentifikasi sebagai batuan beku ekstrusif. Prospek reservoir panas bumi Gunung Rajabasa diperkirakan terletak di sebelah barat laut, barat, dan timur manifestasi Pangkul, serta melintasi manifestasi Belerang.
6	Sarkowi dan Wibowo (2021)	Gayabarat, Data MT, dan MEQ	Nilai anomali Bouguer berkisar antara 28-80 mGal. Dari hasil anomali residual, SVD, dan pemodelan 3D, teridentifikasi adanya tiga reservoir panas bumi di Gunung Belerang, di sebelah barat Gunung Rajabasa, dan di selatan mata air panas Pangkul, dengan kedalaman antara 1.000 hingga 1.500 meter dari permukaan tanah. Reservoir tersebut terpisah oleh struktur patahan berdasarkan analisis SVD. Model 1D MT menunjukkan nilai resistivitas rendah di bawah puncak gunung. Berdasarkan survei MEQ, pusat gempa mikro terkonsentrasi di bawah Gunung Rajabasa dan menyebar ke arah barat laut–tenggara, diperkirakan terkait dengan aktivitas vulkanik.

No	Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
7	Darmawan dkk., (2023)	Simulasi numerik	Penelitian ini menggunakan simulasi numerik dengan kode USGS <i>HYDROTHERM</i> untuk mengembangkan model awal aliran fluida hidrotermal dan mengidentifikasi zona potensial reservoir di Gunung Rajabasa. Hasilnya menunjukkan bahwa reservoir geotermal terletak di bawah Gunung Rajabasa dan Balirang, dengan dimensi sekitar 4 km panjang dan 2-2,5 km tebal. Model aliran massa uap membentuk pola terpusat di bawah puncak Gunung Rajabasa dan Balirang, konsisten dengan distribusi resistivitas studi magnetotelurik sebelumnya. Rentang suhu fluida reservoir diprediksi antara 250-380 °C, dengan kedalaman 800-1200 m. Reservoir diperkirakan mengandung sebagian besar air dalam zona dua fasa, dengan lapisan batuan penutup tebal di bawah puncak Rajabasa.

III. TEORI DASAR

3.1. Panas Bumi

Energi geotermal merupakan istilah yang merujuk pada keseluruhan energi termal yang terdapat di dalam bumi dan merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui serta ramah lingkungan. Sistem geotermal telah hadir sejak terbentuknya bumi dan energi panas bumi tidak pernah habis karena keseimbangannya selalu terjaga, akibat proses pembentukan yang terus menerus serta adanya perubahan kondisi lingkungan hidrologi dan geologi (Hochstein dan Browne, 2000). Sumber daya geotermal terkait dengan proses pembentukan magma dan aktivitas gunung berapi. Panas bumi bersuhu tinggi umumnya ditemukan di daerah vulkanik dengan rentang benua yang luas, zona subduksi seperti di Indonesia, dan zona peleburan lempeng yang tidak wajar. Titik pertemuan lempeng tektonik adalah tempat di mana sistem hidrotermal magma sering muncul. Pergerakan magma dan sirkulasi hidrotermal memperbesar perpindahan panas di dalam lingkungan lempeng tektonik. (Basid dkk., 2014).

Habibirahman dkk., (2019) menjelaskan bahwa panas bumi disebabkan oleh aktivitas fisik dan kimia bumi. Lempeng tektonik saling bertabrakan, menyebabkan terbentuknya dataran tinggi atau patahan dalam proses yang disebut subduksi atau tumbukan. Dengan demikian, keberadaan sumber panas bumi dapat ditentukan oleh aktivitas tektonik dan/atau vulkanik serta mampu diamati dari tanda manifestasi di permukaan. Sumber daya panas bumi yang teramati di atas permukaan hanya mewakili sebagian kecil dari total cadangan reservoir. Medan panas bumi merupakan wilayah yang menunjukkan tanda-tanda aktivitas panas bumi permukaan, atau bisa juga merujuk pada wilayah yang mungkin tidak menunjukkan

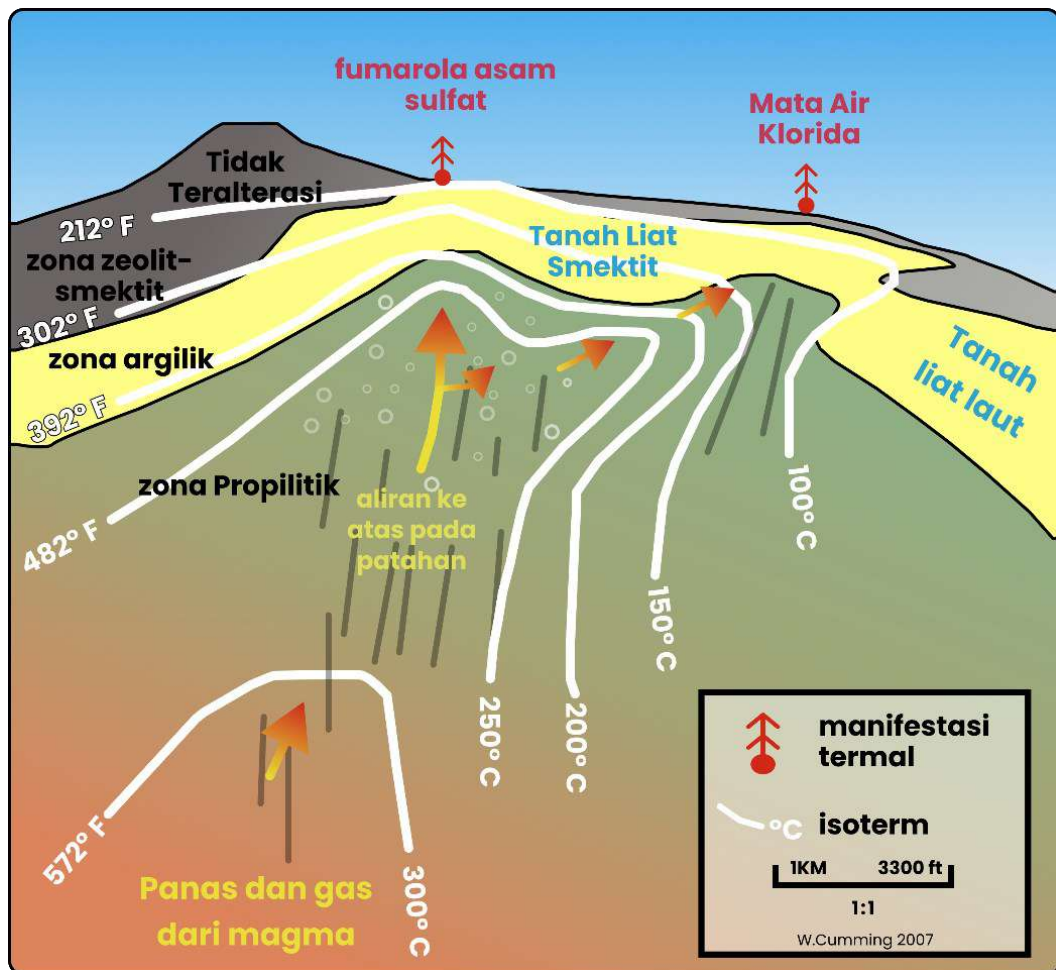
aktivitas permukaan namun memiliki reservoir di bawah permukaan. Sumber panas bumi banyak ditemukan di berbagai wilayah, namun tidak semuanya dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik. Terdapat berbagai jenis reservoir panas bumi, termasuk reservoir hidrotermal, reservoir tekanan tinggi, reservoir batuan kering panas, dan reservoir magmatik (Edwards dkk., 1982).

3.1.1. Sistem Panas Bumi

Sistem panas bumi merupakan bagian dari sistem hidrologi yang mencakup zona imbuhan serta komponen-komponen yang terletak di dalam dan di bawah permukaan. Di sisi lain, reservoir panas bumi merupakan komponen panas bumi yang menunjukkan keberadaan *thermal* dan wilayah yang mudah dimanfaatkan. Tanda-tanda keberadaan sumber panas bumi juga dapat terlihat secara langsung di atas permukaan, dalam bentuk tekanan atau titik didih yang disebut manifestasi (Habibirahman dkk., 2019).

Energi panas bumi berasal dari energi yang terakumulasi dalam bentuk uap pada kedalaman beberapa kilometer di bawah kerak bumi, dalam kondisi geologi tertentu. Zona *thermal* atau ladang panas bumi adalah wilayah di atas permukaan bumi yang memiliki batas-batas yang jelas dan mengandung energi panas bumi dalam konteks kondisi hidrologi batuan. Istilah "sistem panas bumi" mengacu pada berbagai aspek yang berkaitan dengan air panas pada suhu tinggi (Broto dan Putranto, 2011).

Sistem panas bumi terbentuk oleh ciri-ciri geologi yang meliputi sumber panas, reservoir, batuan pendukung, siklus hidrologi, dan sumber fluida. Normalnya, air hujan meresap ke dalam tanah melalui ruang-ruang dan rongga-rongga antar partikel batuan, sehingga air meresap ke dalam batuan panas tersebut. Hal ini menyebabkan peningkatan suhu air, peningkatan volume dan peningkatan tekanan. Peningkatan tekanan mendorong air hangat ke permukaan melalui retakan, celah, dan pori-pori yang saling terhubung di lapisan bumi. Sumber panas bumi timbul dari sebaran suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu di permukaan seringkali dipengaruhi oleh perpindahan panas melalui batuan padat dan konveksi dalam pergerakan fluida yang bersirkulasi. Suhu bumi akan terus meningkat seiring dengan kedalaman di bawah permukaan bumi (Suharno, 2012).



Gambar 7. Model konseptual sistem panas bumi (Cumming dan Mackie, 2010)

Menurut Hochstein dan Browne (2000) mengklasifikasikan sistem panas bumi menjadi 3 sistem, yaitu ;

1. Sistem hidrotermal adalah proses pergerakan panas dari sumber panas menuju permukaan melalui konveksi, yaitu fluida meteorologi dengan atau bahkan tanpa jejak fluida magmatik. Zona permeabel yang mempunyai fasa air kemudian ditambah dengan air hujan dari zona permeabel. Sistem ini kemudian mencakup sumber panas, reservoir cairan panas, zona serapan dan zona perpindahan panas.

2. Sistem vulkanik, adalah proses perpindahan panas dari dapur magma ke permukaan yang melibatkan aliran fluida magmatik melalui konveksi. Meteorit cair jarang ditemukan dalam sistem ini.
3. Sistem hidrotermal vulkanik merupakan gabungan kedua sistem di atas, yaitu fluida magmatik yang naik kemudian bercampur dengan air meteorik.

Masih menurut Hochstein dan Browne (2000), suhu dalam suatu sistem geotermal dapat diklasifikasikan menjadi 3 berdasarkan suhu di dalam reservoir:

1. Suhu yang tinggi (suhu reservoir di atas 225°C).
2. Suhu yang sedang (suhu reservoir berada pada 125°C hingga 225°C).
3. Suhu yang rendah (suhu reservoir lebih kecil dari 125°C).

3.1.2. Manifestasi Panas Bumi

Manifestasi panas bumi adalah pergerakan fluida yang dimulai dari zona sebaran dan mencapai permukaan melalui aliran masuk (*upflow*) dan aliran keluar (*outflow*), dimana fluida tersebut melewati batuan. Akibat interaksi tersebut, komposisi mineral batuan berubah dan terbentuklah mineral yang berbeda-beda, sehingga ketika cairan mencapai permukaan, ia berubah menjadi air panas atau uap melalui rekahan-rekahan batuan (Ibradi dkk., 2019).

Santoso, (1995) menyatakan bahwa berbagai bentuk panas bumi permukaan termasuk tanah panas, tanah beruap, kolam lumpur panas, kolam air panas, fumarol, sumber air panas, rembesan, geyser, dan daerah alterasi hidrotermal. Semua bentuk ini terkait dengan proses geologi dan model sistem panas bumi. Tanah panas, juga disebut "*warm ground*", merupakan tanah yang mengeluarkan panas melalui konduktivitas termal dari lapisan permukaan dan memiliki gradien suhu di atas 25°C dan dapat dideteksi dengan kamera inframerah. Tanah beruap, juga disebut "*steaming ground*", adalah tanah yang mengeluarkan uap karena penguapan air panas dari kedalaman dalam dan dangkal. Kolam lumpur panas, juga dikenal sebagai "*mud volcano*", adalah kolam lumpur panas yang sedikit mengandung uap dan gas CO₂ yang belum terkondensasi. Gas CO₂ keluar melalui rekahan pada suhu yang lebih rendah daripada temperatur didih. Di tengah kubahan hidrotermal kuno, kolam air panas mungkin berbentuk kolam panas. Mereka umumnya berasal dari

sumber air panas yang telah tidak lagi aktif, terdapat sebuah kolam air panas. yang mengandung uap umumnya memiliki sifat lumpur dan berwarna abu-abu, sementara kolam air panas yang mengandung air biasanya lebih bersih dengan sedikit warna keabu-abuan. Dalam kebanyakan kasus, sistem air panas sulfat ditemukan pada kedalaman yang sangat dalam. Dalam fumarol, jumlah uap air biasanya lebih besar dan suhunya kurang dari 100°C , gas panas Dan uap yang dilepaskan memiliki suhu yang tinggi. Pengaruh termal juga sangat bergantung pada gradien *termal existing*, ketebalan reservoir serta permeabilitasnya (Lipsey dkk., 2016).

Sumber air panas sering terhubung dengan aliran cepat di bawah tanah aliran ini biasanya jernih dan mengandung endapan silica sinter. Sebagian dari aliran panas yang berasal dari kedalaman akan menyebar ke wilayah dengan topografi yang lebih rendah, di mana mereka bergabung dengan sungai lokal. Geyser merupakan salah satu sistem air panas yang secara berkala meletus ke udara karena tekanan yang muncul saat rongga di dalam batuan terisi sepenuhnya. Wilayah alterasi hidrotermal merupakan tempat di mana batuan dan fluida dalam reservoir berinteraksi, menyebabkan berubahnya fasa dari padat ke cairan dan pembentukan mineral baru. Temperatur, komposisi cairan (*pH*), permeabilitas, dan kehadiran pendidihan memengaruhi jenis mineral hidrotermal yang terbentuk selama interaksi antara fluida dan batuan (Basid dkk., 2014).

3.2. Sifat Batuan Panas Bumi

Sifat termal adalah salah satu dari banyak sifat fisik batu. Konduksi dan konveksi adalah beberapa sifat termal batuan. Studi ini berfokus pada sifat termal yang disebut konduktivitas. Kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan panas dikenal sebagai konduktivitas termal, atau keterhantaran termal (*k*). Tingkat konduktivitas batuan berbeda-beda tergantung pada struktur batuan (Donovan dkk., 2018).

Reservoir panas bumi biasanya terletak di dalam batuan vulkanik dengan aliran utama melalui retakan atau rekahan batuan. Karakteristik penting dari batuan untuk reservoir panas bumi, adalah permeabilitas, porositas, densitas, serta konduktivitas termal (Ummah, 2018).

3.2.1. Porositas

Porositas dalam batuan reservoir panas bumi terdiri dari porositas antarbutir dan porositas rekahan atau matriks dari batuan. Porositas diukur sebagai fraksi dari keseluruhan volume batuan. Porositas matriks batuan adalah satu-satunya yang dapat diukur secara laboratorium (Habibirahman dkk., 2019).

Porositas merupakan perbandingan antara rasio volume rongga pori terhadap volume total keseluruhan batuan. Perbandingan ini umumnya dinyatakan dalam bentuk persen (%). Nilai porositas akan tinggi apabila seluruh butiran memiliki ukuran yang hampir sama dan sebaliknya nilai porositas akan rendah apabila ukuran butiran bervariasi sehingga butiran yang lebih kecil akan mengisi ruang pori antara butiran besar. Porositas adalah bentuk representasi dari kemampuan suatu batuan reservoir dalam menyimpan fluida (Harsono, 1997).

Porositas batuan reservoir panas bumi dapat diklasifikasikan menjadi 2 jenis, yakni porositas absolut dan porositas efektif. Porositas absolut adalah perbandingan antara volume pori total terhadap volume batuan total yang dinyatakan dalam persen. Secara matematis dituliskan pada **persamaan (1)** :

$$Porositas (\varphi) = \frac{(Massa Basah - Massa Kering)}{(Massa Kering)} \times 100\% \quad (1)$$

Sedangkan porositas efektif adalah perbandingan suatu rongga pori-pori yang saling terhubung terhadap volume total seluruh batuan.

Tabel 2. Klasifikasi porositas (Koesoemadinata, 1980)

Skala	Harga Porositas
0-5%	Dapat diabaikan
5-10%	Buruk
10-15%	Cukup
15-20%	Baik
20-25%	Sangat baik
>25%	Istimewa

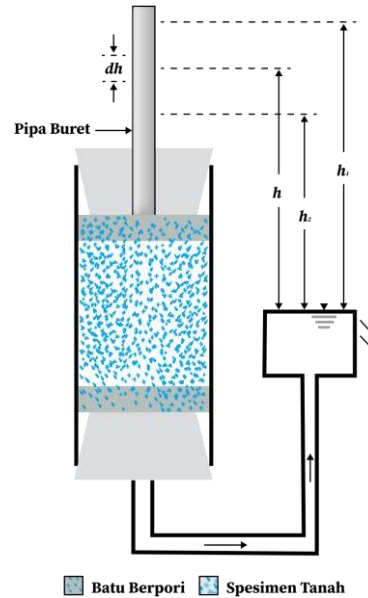
Porositas batuan berperan dalam menentukan kemampuan batuan dalam menyimpan cairan, yang selanjutnya mempengaruhi proses menghasilkan uap *thermal*. Dalam konteks reservoir panas bumi sebagai sumber energi panas bumi, diperlukan temperatur yang sangat tinggi agar uap yang dihasilkan mempunyai *pressure* yang cukup tinggi untuk memutar turbin yang menghasilkan listrik. Batuan dengan porositas tinggi seringkali mempunyai kandungan fluida yang signifikan, sehingga uap yang dihasilkan lebih lembab dan memiliki tekanan uap yang lebih rendah karena kandungan fluida yang tinggi. Oleh karena itu, batuan reservoir yang sangat berpori tidak cocok untuk digunakan sebagai sumber energi panas bumi (Endovani, 2016).

Reservoir panas bumi adalah jenis batuan yang mempunyai nilai porositas dan permeabilitas tinggi, sehingga mampu menyimpan fluida yang dipanaskan oleh sumber *thermal* dan memungkinkan terjadinya aliran fluida yang signifikan. Kualitas suatu reservoir dapat diukur dari volumenya yang besar, tingkat panas yang tinggi, porositas dan permeabilitas yang optimal. Karakteristik batuan reservoir mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap komposisi kimia fluida hidrotermal karena interaksi antara fluida hidrotermal dengan batuan reservoir dapat mengubah sifat kimia fluida tersebut. Untuk menahan panas di dalam tangki diperlukan suatu pembatas atau penutup yang biasa disebut *cap stone*. Penutup ini terletak di atas reservoir dan memiliki permeabilitas yang rendah (Suhada, 2022).

3.2.2. Permeabilitas

Permeabilitas (K) merupakan kapabilitas suatu media bercelah untuk memungkinkan terjadinya pergerakan fluida. Permeabilitas memegang peranan utama dalam menentukan jumlah persediaan cairan yang dapat diekstraksi (Nurwidyanto dkk., 2006). Permeabilitas dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu permeabilitas absolut, yang digunakan dalam menggambarkan aliran suatu fluida dalam satu fasa (seperti uap atau air saja), dan permeabilitas efektif, yang diterapkan ketika cairan bergerak dalam banyak fasa (Hafsari dkk., 2017). Saptadji (2002) menjelaskan permeabilitas batuan bervariasi ke berbagai arah, biasanya lebih tinggi secara horizontal dibandingkan vertikal.

Tanah terdiri dari granul struktur dengan pori-pori yang saling terhubung. Koefisien permeabilitas (K) menunjukkan kemampuan air untuk melewati media seperti tanah. Cara yang dipakai untuk menghitung koefisien permeabilitas ialah metode *constant head* dan *Falling head* (Imamuddin dan Al Hanif, 2017).



Gambar 8. Prinsip uji permeabilitas *falling head* (Imamuddin dan Al Hanif, 2017)

Debit rembesan dihitung dengan **persamaan (2)** dan **persamaan (3)** :

$$q = k \frac{h}{L} A = -a \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

$$t = \frac{aL}{Ak} \left(-\frac{dh}{h} \right) \quad (3)$$

Hasil integral diperoleh dari **persamaan (4)** dan **persamaan (5)** :

$$t = \frac{aL}{Ak} \log_e \frac{h_1}{h_2} \quad (4)$$

$$K = 2.303 \frac{aL}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (5)$$

Koefisien permeabilitas memiliki nilai yang berbeda disesuaikan dengan karakteristik dan kerapatan tanah.

Permeabilitas adalah karakteristik batuan yang mencerminkan kapasitasnya untuk memfasilitasi aliran fluida (**Tabel 3**).

Tabel 3. Klasifikasi permeabilitas (Koesoemadinata, 1980)

Kualitas Umum	Nilai Permeabilitas
Ketat (<i>tight</i>)	$< 5 \text{ mD}$
Cukup (<i>fair</i>)	5-10 <i>mD</i>
Baik (<i>good</i>)	10-100 <i>mD</i>
Baik sekali (<i>very good</i>)	100-1000 <i>mD</i>

Haluk, (2014) menjelaskan pengelompokan permeabilitas panas bumi berdasarkan metode pembentukannya:

a. Permeabilitas primer

Permeabilitas primer akan terbentuk secara bersamaan dengan pembentukan batuan serta sebelum dipengaruhi oleh aktivitas panas bumi. Contoh bentuk permeabilitas ini adalah permukaan lapisan, bidang ketidakselarasan (*unconformity*), kekar (*joint*) serta patahan.

b. Permeabilitas sekunder

Permeabilitas ini terbentuk sesudah atau bahkan bersamaan dengan aktivitas panas bumi. Tipe permeabilitas ini adalah :

1. Patahan yang tercipta akibat tektonik bahkan lokal stress “*hydroulic fracturing*”, yakni akumulasi fluida panas yang tertahan dan menyebabkan tekanan naik serta suatu saat apabila melampaui batas akan memecahkan sekat didalam batuan.
2. Kekar (*Joint*)
3. Hasil proses ubahan *hydrothermal (leaching)*.

Permeabilitas dalam konteks sistem panas bumi secara konseptual mirip dengan permeabilitas dalam pengertian umum. Hal ini mengacu pada kemampuan fisik batuan untuk memungkinkan pergerakan fluida di dalam reservoirnya yang membedakannya adalah dalam sistem panas bumi harus dipenuhi syarat-syarat tambahan yaitu adanya *thermal* yang cukup pada batuan dan fluida yang

mengandung air dalam jumlah yang cukup, serta adanya gradien tekanan (Haluk, 2014).

Haluk (2014) menjelaskan bahwa permeabilitas reservoir mempunyai dampak signifikan terhadap produktivitas lapangan panas bumi. Jika reservoir mempunyai permeabilitas yang tinggi maka medan panas bumi yang terbentuk akan didominasi oleh sistem air panas. Sebaliknya jika reservoir mempunyai permeabilitas yang rendah maka lapangan panas bumi akan cenderung dominan oleh sistem uap kering. Permeabilitas yang baik penting karena memungkinkan fluida yang cukup mengalir ke dalam tangki, sehingga panas dapat dipanaskan dengan baik.

3.2.3. Densitas

Densitas mengacu pada rasio berat batuan terhadap volumenya. Massa jenis suatu batuan meningkat seiring dengan peningkatan massa jenisnya. Gaya tektonik dapat menyebabkan perubahan kepadatan massa batuan sedimen. Faktor-faktor seperti massa jenis partikel penyusun batuan, banyaknya cairan yang memenuhi pori-pori, porositas, pemadatan akibat tekanan, dan derajat pelapukan yang dialami batuan akan mempengaruhi massa jenisnya. Nilai variasi kepadatan dapat dilihat di bawah. (Broto, 2011). Berikut adalah contoh dari variasi nilai densitas yang dapat diamati pada (Tabel 4), (Tabel 5), (Tabel 6).

Densitas batuan dapat dihitung dengan **persamaan (6)** :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (6)$$

Tabel 4. Nilai densitas batuan sedimen (Telford dkk., 1976)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Clay	1,63-2,60	2,21
Gravel	1,70-2,40	2
Loess	1,40-1,93	1,64
Silt	1,80-2,20	1,93
Soil	1,20-2,40	1,92
Sand	1,70-2,30	2
Sandstone	1,61-2,76	2,35

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Shale	1,77-3,20	2,4
Limestone	1,93-2,90	2,55
Dolomit	2,28-2,90	2,7
Chalk	1,53-2,60	2,01
Halite	2,10-2,60	2,35
Glacier Ice	0,88-0,92	0,9

Tabel 5. Nilai densitas batuan beku (Telford dkk., 1976)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Rhyolite	2,35 – 2,70	2,52
Granite	2,50 – 2,81	2,64
Andesite	2,40 – 2,80	2,61
Syenite	2,60 – 2,95	2,77
Basalt	2,70 – 3,30	2,99
Gabbro	2,70 – 3,50	3,03

Tabel 6. Nilai densitas batuan metamorf (Telford dkk., 1976)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Schist	2,39 – 2,90	2,64
Gneiss	2,59 – 3,00	2,80
Phyllite	2,68 – 2,80	2,74
Slate	2,70 – 2,90	2,79
Granulite	2,52 – 2,73	2,65
Amphibolite	2,90 – 3,04	2,96
Eclogite	3,20 – 3,54	3,37

3.2.4. Kalor Jenis

Kalor jenis batuan adalah suatu faktor yang menggambarkan jumlah panas yang diperlukan untuk meningkatkan suhu satu unit massa dari batuan tersebut sebesar 1°C (Saptadji, 2002).

Satuan dari kalor jenis adalah $kJ/kg^{\circ}C$. Biasanya, nilai-nilai kalor jenis batuan adalah sebagai berikut:

- Suhu rendah : $T = 0,75-0,85 \text{ kJ/kg}^{\circ}C$
- Suhu sedang : $T = 0,85-0,95 \text{ kJ/kg}^{\circ}C$
- Suhu tinggi : $T = 0,95-1,10 \text{ kJ/kg}^{\circ}C$ (Saptadji, 2002).

3.2.5. Konduktifitas Panas Batuan

Konduktivitas termal suatu batuan (K) menunjukkan sejauh mana kemampuan batuan dalam memindahkan *thermal* secara konduksi apabila terdapat perbedaan suhu di dalamnya. (Saptaji, 2002). Konduktivitas ini mencerminkan laju perpindahan panas dari reservoir ke permukaan. Nilai konduktivitas *thermal* suatu batuan, baik tinggi maupun rendah, merupakan faktor penentu potensi sumber daya panas bumi sebagai sumber energi. (Endovani dan Putra, 2016). Menurut Donovan dkk., (2018). Konduktivitas termal digunakan untuk menilai kemampuan suatu batuan dalam menghantarkan panas melalui konduksi (Donovan dkk., 2018).

3.3. Metode Volumetrik

3.3.1. Panas yang Tersimpan dalam Batuan

Panas yang berada di dalam batuan yang memiliki massa (m), kalor jenis (c) dan temperatur (T), dapat ditentukan berdasarkan **persamaan (7)** :

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

Jika V merupakan volume reservoir (*bulk volume*), ϕ merupakan porositas batuan dan ρ merupakan densitasnya, jadi massa batuan adalah :

$$mr = V \cdot (1 - \phi) \cdot \rho r \quad (8)$$

Apabila A merupakan luas reservoir dan h adalah ketebalannya maka persamaan di atas menjadi **persamaan (9)** :

$$mr = A \cdot h \cdot (1 - \phi) \cdot \rho r \quad (9)$$

Apabila batuan mempunyai kapasitas panas Cr , maka dengan mensubstitusikan **Persamaan (9)** ke **Persamaan (7)** akan didapatkan persamaan yang menyatakan

panas yang terkandung di dalam batuan (Q_r). Persamaan tersebut adalah **persamaan (10)**:

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

3.3.2. Panas yang Tersimpan dalam Fluida

Energi yang terkandung di dalam air dan uap yang masing-masing mempunyai massa m_w dan m_s , energi dalam u_w dan u_s , ditentukan berdasarkan **persamaan (11)** (Saptadji, 2002)

$$Q_e = m_w u_w + m_s u_s \quad (11)$$

Apabila volume reservoir (*bulk volume*) adalah V , porositas batuan adalah $\emptyset$, saturasi air dan saturasi uap masing-masing S_w dan S_s dan densitasnya adalah ρ_w dan ρ_s maka massa air dan massa uap yang mengisi pori-pori batuan dapat dinyatakan oleh **persamaan (12)** dan **persamaan (13)**:

$$m_w = v \cdot \emptyset \cdot S_w \cdot \rho_w \quad (12)$$

$$m_s = v \cdot \emptyset \cdot S_s \cdot \rho_s \quad (13)$$

Apabila A adalah luas reservoir dan h adalah ketebalannya maka kedua persamaan di atas menjadi **persamaan (14)** dan **persamaan (15)** :

$$m_w = A \cdot h \cdot \emptyset \cdot S_w \cdot \rho_w \quad (14)$$

$$m_s = A \cdot h \cdot \emptyset \cdot S_s \cdot \rho_s \quad (15)$$

Apabila kedua persamaan tersebut disubstitusikan ke **Persamaan (11)** akan diperoleh persamaan yang menyatakan panas yang terkandung di dalam uap dan air (Q_e) sebagai berikut **persamaan (16)** :

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

Persamaan di atas dapat dituliskan kembali sebagai berikut pada **persamaan (17)**:

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

Dengan demikian kandungan energi panas di dalam reservoir (di dalam batuan dan fluida) menurut Saptadji (2002) adalah sebagai berikut pada **persamaan (18)** :

$$He_i = A \cdot h \cdot [(1 - \emptyset) \rho_r C_r T + \emptyset (S_w \cdot \rho_w \cdot U_w + S_s \cdot \rho_s \cdot U_s)] \quad (18)$$

Dengan :

He : 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).

Cr : kapasitas panas batuan (kJ/kg°C).

ρ_r : Densitas uap (kg/m³).

ρ_w : Densitas uap (kg/m³)

ρ_s : Densitas uap (kg/m³)

3.3.3. Perhitungan Metode Volumetrik

Prinsip metode volumetrik adalah mengasumsikan bahwa reservoir panas bumi memiliki bentuk segi empat (kotak), dengan volume yang dapat dihitung melalui perkiraan luas area yang memuat fluida panas bumi, dikalikan dengan ketebalannya. Dalam metode volumetrik, estimasi potensi energi sumber daya atau cadangan dapat dihitung berdasarkan jumlah energi panas yang terdapat dalam reservoir. Kandungan energi panas dalam reservoir adalah total panas yang terdapat dalam batuan dan fluida panas bumi (Habibirahman dkk ., 2019).

Perhitungan potensi energi listrik yang dapat dimaksimalkan dapat dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

Menghitung kandungan energi pada keadaan awal (*initial*) dengan **persamaan (19)**

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

Menghitung kandungan energi pada keadaan akhir (*final*) dengan **persamaan (20)**

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T_f + (S_w \cdot \rho_w \cdot u_w + S_s \cdot \rho_s \cdot u_s)_f] \quad (20)$$

Menghitung energi maksimal yang dapat dimanfaatkan dengan **persamaan (21)**

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

Menghitung energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan pada kenyataannya (besarnya cadangan bila dinyatakan dalam *kJ*) dengan **persamaan (22)**

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

Menghitung besarnya cadangan yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu *t* tahun dengan **persamaan (23)**

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (23)$$

Menghitung besarnya potensi listrik panas bumi, yakni energi listrik yang dapat dibangkitkan selama periode *t* tahun (*MWe*) dengan **persamaan (24)**

$$H_{le} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (24)$$

Dengan :

- T_i : Temperatur reservoir pada keadaan awal ($^{\circ}\text{C}$).
- T_f : Temperatur reservoir pada keadaan akhir (energi panas bumi tidak ekonomis lagi untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik) ($^{\circ}\text{C}$).
- 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_{te} : 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. Solusi Persamaan Numerik:

3.4.1. Algoritma Newton-Raphson

Metode ini dapat digunakan untuk menyelesaikan sistem persamaan diferensial non-linier pada setiap langkah waktu. Persamaan perpindahan energi panas, aliran, tekanan, dan entalpi diselesaikan secara simultan untuk fluida. Perbedaan non-linier ini secara bersamaan untuk fluida, tekanan dan entalpi. Perbedaan non linier ini digambarkan untuk laju aliran dan perpindahan panas secara berurutan dalam setiap titik operasi. Persamaan itu ditulis sebagai nilai sisa untuk N titik operasi.

$$f(u) = 0 \quad (25)$$

Dimana f adalah vektor nilai residual dari persamaan beda hingga non-linear (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, diumpakan ke sekumpulan persamaan, melibatkan penyelesaian persamaan (26) :

$$J(u^{(v)})(u^{(v+1)} - u^{(v)}) + f(u^{(v)}) = 0 \quad (26)$$

Dengan

$$J(u^{(v)}) = \left[\frac{\partial f_1}{\partial u_1} \dots \frac{\partial f_1}{\partial u_N} \vdots \frac{\partial f_N}{\partial u_1} \dots \frac{\partial f_N}{\partial u_N} \right]_{u=u^{(v)}} \quad (27)$$

Dan

$$u^{(v+1)} - u^{(v)} = [u_1^{(v+1)} - u_1^{(v)} : u_N^{(v+1)} - u_N^{(v)}] \quad (28)$$

Dimana J adalah Matriks jacobian 2×2 dengan $N_a \times N_a$ 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 (Kipp dkk., 2008).

3.4.2. Solusi Persamaan Linier

Satu set dari persamaan newton beda hingga linierisasi **Persamaan (26)** 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*.

1. *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 .

$$A u = b \quad (29)$$

Dimana A adalah Matriks balok 2×2 berukuran $N_a \times N_a$, u adalah Matriks balok 2×1 yang tidak diketahui (Tekanan, Entalpi), dan b adalah Vektor balok 2×1 sisi kanan dari persamaan perbedaan dengan panjang N .

Setiap elemen A adalah 2x2 submatrix, 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 **persamaan (30)** :

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - B^{-1}[Au^{(v)} - b] \quad (30)$$

Dimana B adalah Matriks blok 2x2 berukuran $N_x \times N_x$ dan v adalah penghitung iterasi. B dipilih agar mudah untuk menginversi. Untuk menyederhanakan, mengasumsikan semua *node* aktif, jadi $N = N$. Kemudian, dalam **Persamaan (30)**. Matriks A adalah a yang dibagi menjadi blok $N_y \times N_y$ yang masing-masing berisi persamaan untuk satu bidang x - z , dimana $N_x \times N_x \times N = N$.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1N_y} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{N_y 1} & \cdots & A_{N_y N_y} \end{bmatrix} \quad (31.a)$$

$$= \begin{bmatrix} D_1 & U_{12} & \ddots & 0 \\ L_{21} & \cdot & \cdot & \ddots \\ \ddots & \cdot & \cdot & U_{N_y-1, N_y} \\ 0 & \ddots & L_{N_y, N_y-1} & D_{N_y} \end{bmatrix} \quad (31.b)$$

$$= D - L - U \quad (31.c)$$

Dengan :

A_{11} : Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$,

D_i : Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$,

L_{21} : Matriks blok diagonal 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$,

U_{12} : Matriks blok diagonal 2x2 dengan ukuran $N_x \times N_z$,

D : Matriks blok 2x2 dengan ukuran $N \times N$,

L : Matriks blok segitiga bawah 2x2 dengan ukuran $N \times N$,

U : Matriks blok segitiga atas 2x2 dengan ukuran $N \times N$.

Pemisah matriks diberikan oleh **Persamaan (31.c)** dimana *submatrices* renggang Di adalah penta-diagonal dan *submatrices* L_{11} dan U_{12} 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.

$$B = \frac{1}{\omega} [D - \omega L] \quad (32)$$

Dan

$$u^{(v+1)} = \omega u_{GS}^{(v+1)} + (1 - \omega)u^{(v)} \quad (33)$$

Dimana U_{GS} adalah solusi vektor menggunakan algoritma Gauss-Seidel, persamaan matriks untuk SSOR adalah **persamaan (34.a)** dan **persamaan (34.b)**.

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - \omega [D - \omega L]^{-1} [Au^{(v)} - b] \quad (34.a)$$

Dan

$$[D - \omega L]u^{(v+1)} = [(1 - \omega)D + \omega U]u^{(v)} + \omega b \quad (34.b)$$

Dimana ω adalah faktor *over-relaxation*

Persamaan (34.b) 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 ,

$$\frac{\|u^{(v+1)} - u^{(v)}\|}{\|u^{(v+1)}\|} \leq \tau_{SOR} \quad (35)$$

Dimana τ_{SOR} adalah toleransi yang ditentukan.

Dalam *Hydrotherm*, 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 pada tingkat konvergensi yang sangat lambat. Untuk menggunakan pemecah persamaan SSOR, pengguna harus menyediakan nilai untuk faktor relaksasi berlebih, toleransi konvergensi, dan jumlah iterasi maksimum diizinkan. Nilai *default* disediakan algoritma *slice-*

successive-overrelaxation mereduksi menjadi *direct elimination band solver* dari **Persamaan (29)** untuk *mesh* dua dimensi. Dalam kasus tersebut tidak diperlukan iterasi (Kipp dkk., 2008).

2. *Generalized-Minimum-Residual Solver*

Metode *Generalized Minimum Residual* adalah metode *Krylov Subspace* dimana metode ini kontras terhadap SSOR yang tidak memiliki matriks iterasi stasioner, B^{-1} dalam **Persamaan (30)**.

Untuk penyederhanaannya, anggap semua titik adalah aktif menjadi $N_a = N$. Lalu, persamaan matriks linear **Persamaan (29)** memiliki vektor residual.

$$r = b - Au \quad (36)$$

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 **persamaan (37)** :

$$K_v = \text{span}\{r_0, Ar_0, \dots, A^{v-1}r_0\} \quad (37)$$

Dimana K_v 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 :

$$u_v = u_0 + Q_v Y_v \quad (38)$$

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, GMRES_(m), digunakan untuk menyederhanakan pengulangan GMRES setiap iterasi ke m , menggunakan

solusi vektor terbaru sebagai tebakan awal untuk siklus GMRES selanjutnya (Kipp dkk., 2008).

3.5. Persamaan Aliran dan Perpindahan Panas

3.5.1. Persamaan Aliran Tanah

Persamaan aliran komponen air yang telah dijelaskan oleh Faust dan Mercer pada tahun 1979 didasarkan dengan prinsip kekekalan massa air dan berdasarkan unsur volume. Kemudian prinsip Hukum Darcy digunakan menggambarkan aliran berbagai fasa melalui pori-pori sementara itu didalam konteks perpindahan energi panas, dapat dipertimbangkan kekekalan entalpi fasa cair dan padat dan hal ini kemudian ditunjukkan oleh **Persamaan (39)** sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{K k_{rw} \rho_w}{\mu_w} [\nabla p + \rho_w g \hat{e}_z] - \nabla \cdot \frac{K k_{rs} \rho_s}{\mu_s} [\nabla p_g + \rho_s g \hat{e}_z] - q_{sf} = 0 \quad (39)$$

Dengan :

ϕ : Porositas.

ρ : Densitas larutan (kg/m^3).

S_p : Saturasi dari air dalam fasa p.

K : Adalah tensor permeabilitas medium berporos (m^2).

K_r : Permeabilitas relative.

μ : Viskositas ($Pa.s$).

P : Tekanan cairan pada fasa cair (Pa).

P_g : Tekanan cairan pada fasa gas (Pa).

g : Konstanta gravitasi (m/s^2).

$\hat{e}_z$: Satuan vektor dalam arah koordinat z.

q_{sf} : Intensitas laju aliran dari sumber massa fluida ($kg/s.m^3$).

t : Waktu (s).

∇ : Gradien spasial (m^{-1}).

Subscrip fasa 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 (39) dengan tidak melibatkan uap. **Persamaan (39)** menghubungkan perubahan massa air total dalam fasa 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 adapun dua komponen sehingga persamaan saturasi menjadi sebagai berikut pada **persamaan (40)** :

$$S_w + S_s = 1 \quad (40)$$

Dimana h_r adalah entalpi spesifik dari fasa padat matriks berpori (J/kg) dan ρ_r adalah densitas dari poros-matriks fasa 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 berdampingan dalam simulator *Hydrotherm*. Kecepatan interstisial atau pori (V_p) untuk komponen air dalam fasa p diperoleh dari Hukum Darcy sebagai berikut pada **persamaan (41)** :

$$V_p = -\frac{kk_{rp}}{\theta S_p \mu_p} [\nabla_p + \rho_p g \hat{e}_z] \quad (41)$$

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

Permukaan air digambarkan sebagai permukaan yang memiliki tekanan serta profilnya dapat ditentukan dari larutan tekanan. Dengan menggunakan rumus luas daerah jenuh maka sebagian bertri luas aliran yang dapat disimulasikan dapat meluas hingga ke permukaan tanah dan tidak perlu dilaksanakan penyesuain dalam mengakomodasi profil permukaan tanah dan atau air pada saat simulasi.

3.5.2. Persamaan Perpindahan Energi Panas

Persamaan perpindahan panas didasarkan pada kekekalan entalpi pada fasa padat dan cair media berpori di daerah unsur. Entalpi adalah sifat turunan yang mengandung energi dalam dan energi aliran. Dapat didefinisikan sebagai berikut pada **persamaan (42)** :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1 - \phi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot \quad (42)$$

$$K_a I \nabla T + \nabla \cdot \Phi (S_w \rho_w h_w V_w + S_s \rho_s h_s V_s) - q_{sh} = 0$$

Dengan :

h : Entalpi spesifik dari fasa fluida (J/kg).

h_r : Entalpi dari fasa padat matriks berpori (J/Kg).

ρ_r : Densitas dari fasa padat matriks berpori (kg/m^3).

K_a : Konduktivitas termal efektif dari medium berpori ($W/m \cdot ^\circ C$).

I : Matriks identitas orde 3 (tidak berdimensi).

T : Temperatur ($^\circ C$).

q_{sh} : Intensitas laju aliran dari sumber entalpi (W/m^3).

Fasa subskrip w dan s mengacu pada air dan uap. **Persamaan (42)** menghubungkan laju perubahan fluida 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 fasa cair, gas dan padat (Faust dan Mercer, 1977).

3.5.3. Persamaan Fungsi Permeabilitas

Persamaan fungsi permeabilitas muncul dihasilkan atas berdasarkan Hukum Darcy, dimana Hukum ini adalah persamaan yang menentukan kemampuas suatu fluida untuk mengalir dengan media berpori seperti celah pada batuan. Hal ini tentu bergantung pada prinsip besarnya aliran diantara dua titik akan sebanding dengan perbedaan tekanan diantara titik-titik tersebut serta kemampuan medium yang dilaluinya untuk menghambat aliran (Djarwanti, 2008). Didefinisikan sebagai berikut pada **persamaan (43)** dan **persamaan (44)** :

$$Q = k \times I \times A \tag{43}$$

$$k = (Q \times L) \div \left(\frac{\Delta h}{A} \right) \tag{44}$$

Dengan :

Q : Debit (m^3/s).

k : Koefisien Permeabilitas (Darcy).

A : Luas Penampang (m^2).

i : Koefisien Hidrolik atau sama dengan $\Delta h/L$

IV. METODE PENELITIAN

4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan di:

- Tempat : Lapangan Panas Bumi Gunung Rajabasa, Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil, Laboratorium Geofisika Geotermal Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.
- Alamat : Gunung Rajabasa, Kecamatan Kalianda, Kabupaten Lampung Selatan dan Gedung Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung
- Tanggal : Agustus 2023 – Maret 2024

Tabel 7. Jadwal Kegiatan Penelitian

Kegiatan	Agustus				September				Oktober				November				Desember				Januari				Februari				Maret			
	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	2	3	4
Studi Literatur																																
Pengumpulan Data																																
Penyusun Laporan Penelitian																																
Bimbingan Proposal Penelitian																																
Seminar Proposal																																
Pengolahan Data																																
Penyusunan Laporan Hasil																																
Bimbingan dan Revisi Hasil																																
Seminar Hasil																																
Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif																																
Sidang Komprehensif																																

4.2. Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

Tabel 8. Alat dan Bahan

Alat	Bahan
Laptop	Data Karakteristik Batuan
<i>Software Hydrotherm Interactive 2D v3.2.0</i>	Data DEM
<i>Software ArcGIS v10.8</i>	Data PH manifestasi
<i>Software Microsoft Office</i>	Data Temperatur Permukaan dan Temperatur Manifestasi
<i>Notepad +++</i>	
<i>ThermoGun</i>	
Palu Geologi	
Alat Pengambil Fluida Manifestasi	
PH Meter	
<i>Soil Case</i>	
Plastik Sample	
<i>Cubic Permeameter</i>	

4.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi ini bertujuan untuk mengaplikasikan ide-ide tentang teknik geofisika yang digunakan untuk eksplorasi panas bumi. Selanjutnya, berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, pemahaman tentang kondisi geologi di daerah penelitian diperoleh. Menurut hasil pengukuran data geofisika di lapangan, kondisi geologi merupakan faktor penting dalam menentukan zona prospek panas bumi. Mempelajari mekanisme pembentukan panas bumi di wilayah penelitian.

2. Akuisisi Data Lapangan

Akuisisi lapangan dilakukan pada wilayah Gunung Rajabasa dengan total 9 titik pengukuran, yang dimana masing-masing titik mewakili litologi batuan pada daerah tersebut. Data akuisisi yang diperoleh adalah parameter fisis permukaan seperti sampel singkapan alterasi dan non-alterasi, sampel tanah alterasi dan non-alterasi, suhu manifestasi, tingkat keasaman manifestasi (PH) dan temperatur permukaan. Pengujian densitas batuan dilakukan di Laboratorium Explorasi Geotermal dengan melihat parameter fisis pada sampel batuan yang telah diperoleh di lapangan. Pengujian permeabilitas dilaksanakan pada Laboratorium Mekanika Tanah Teknik Sipil Universitas Lampung dengan melakukan proses vakum sampel yang kemudian proses injeksi air kedalam sampel dengan Cubic Permeameter.

3. Data Pendukung (Sekunder)

Penggunaan data geologi dari Peta Geologi Lembar Tanjung Karang untuk melakukan analisis dan interpretasi struktur geologi di Daerah panas bumi Gunung Rajabasa menggunakan pemodelan simulasi numerik. Karakteristik batuan yang digunakan termasuk porositas (%), permeabilitas (m^2), konduktivitas termal ($W/m\ K$), kalor jenis batuan ($J/kg\ K$), dan densitas (g/cm^3). Untuk membuat batas lapisan dan karakteristik batuan dalam simulasi numerik, software *Hydrotherm Interactive 2D* akan memasukkan nilai karakteristik batuan ini. Penampang permukaan permukaan yang digunakan sebagai batas atas model simulasi.

4. Tahapan Pengolahan Data

Dalam menciptakan model simulasi numerik tahap pertama yang harus dilakukan adalah menggunakan data topografi yang diperoleh dari data DEMNAS. Hasil penampang permukaan diperoleh dari analisis *line interpolation* dengan menggunakan software ArcGIS, kemudian dimasukkan kedalam software *Hdrotherm Interactive* menggunakan fungsi *Load Site Map* dalam *Window Site Map* pada kolom *Active Data*. Pada penelitian ini panjang dan kedalaman yang digunakan (lintasan 1 sepanjang 11100 meter, lintasan 2 sepanjang 13000 meter dan lintasan 3 sepanjang 9000 meter) dengan kedalaman masing-masing lintasan adalah 3000 meter. Langkah selanjutnya adalah membuat batas lapisan dengan

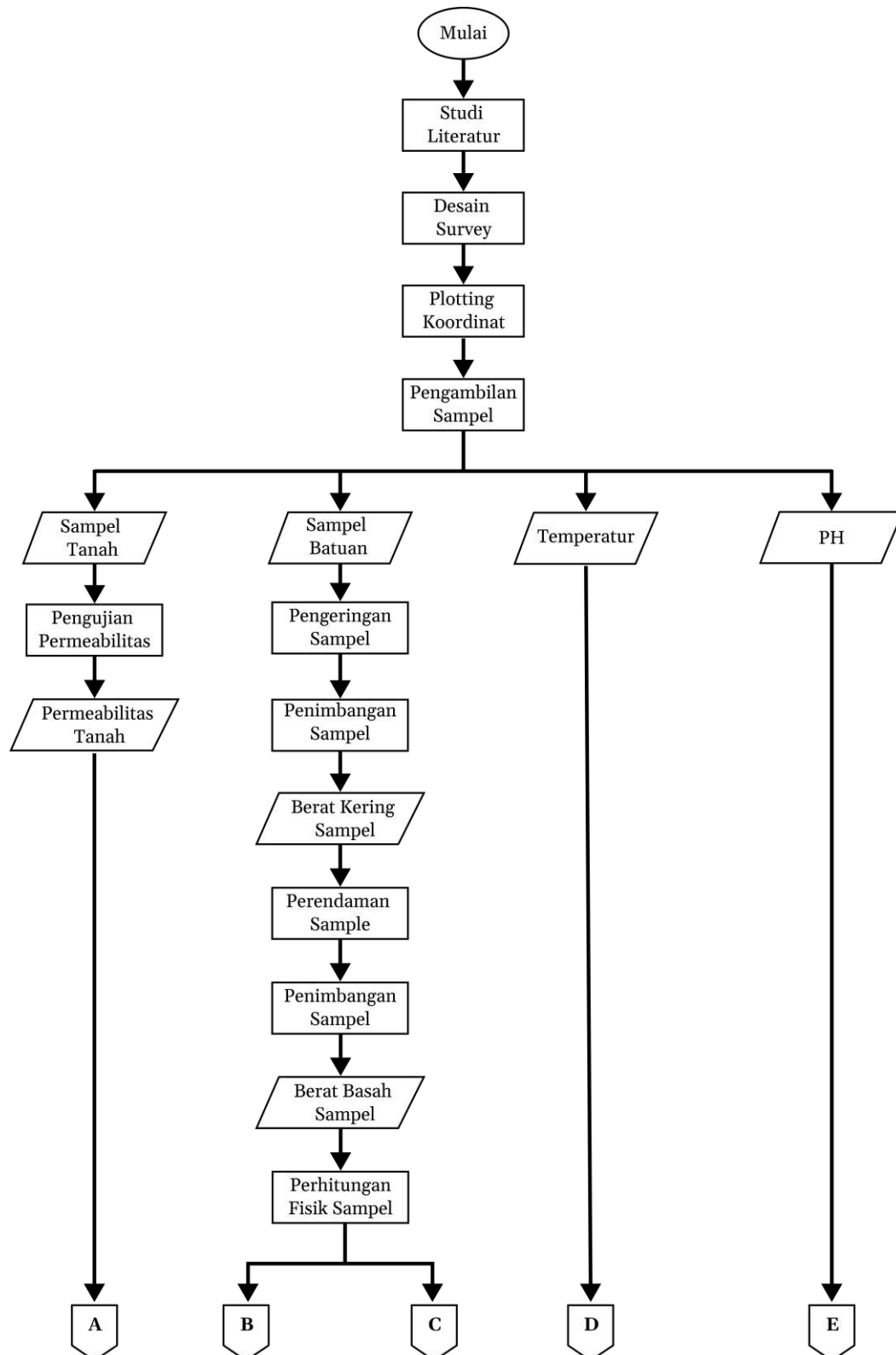
memasukkan nilai-nilai karakteristik batuan, seperti permeabilitas (m^2), konduktivitas termal (W/mK), porositas (%), kalor jenis batuan ($J/g K$), dan densitas batuan (g/cm^3). Nilai-nilai parameter tersebut dimasukkan melalui jendela *Rock Properties* di *Rock Units*, pada kolom *Active Data*. Setelah memasukkan semua data karakteristik batuan, langkah selanjutnya adalah membuat wilayah batuan dengan menggunakan fungsi *Add Polygon Zone*. Selanjutnya, langkah pembuatan model awal dilanjutkan dengan pembuatan *Grid*, *Boundary Condition*, *Initial Temperature*, dan *Simulation Period*. Model awal yang telah dibangun kemudian menghasilkan model simulasi melalui proses running pada *software Hydrotherm Interactive 2D*.

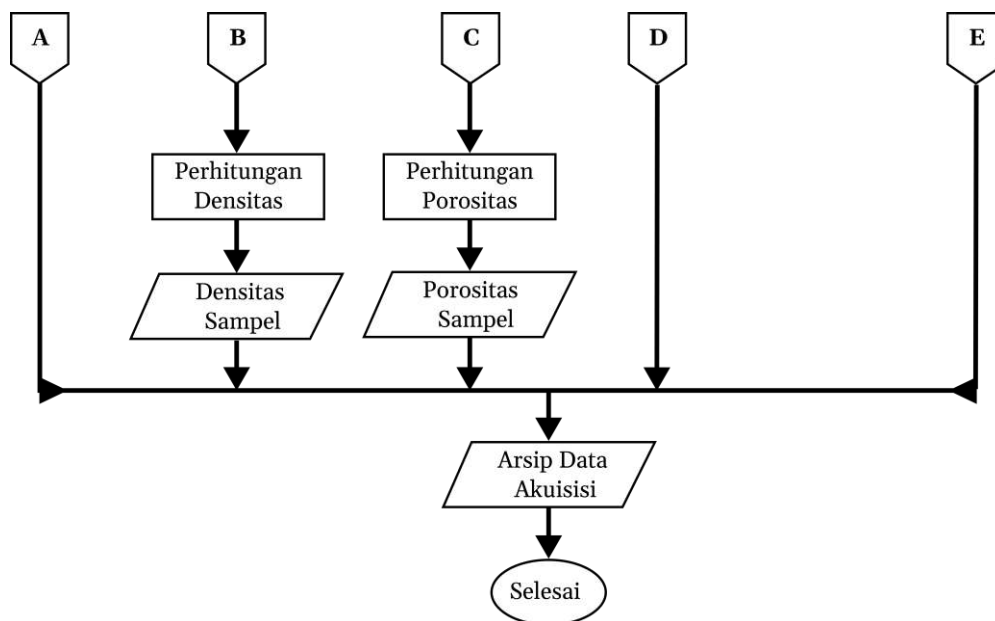
5. Interpretasi

Hasil dari model lintasan menghasilkan pola aliran fluida hidrotermal dan sebaran panas. Hasil simulasi numerik ini dihubungkan dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan dengan metode lain di daerah penelitian untuk menghasilkan model perpindahan panas, perpindahan massa fluida air, dan perpindahan massa fluida uap.

4.4. Diagram Alir

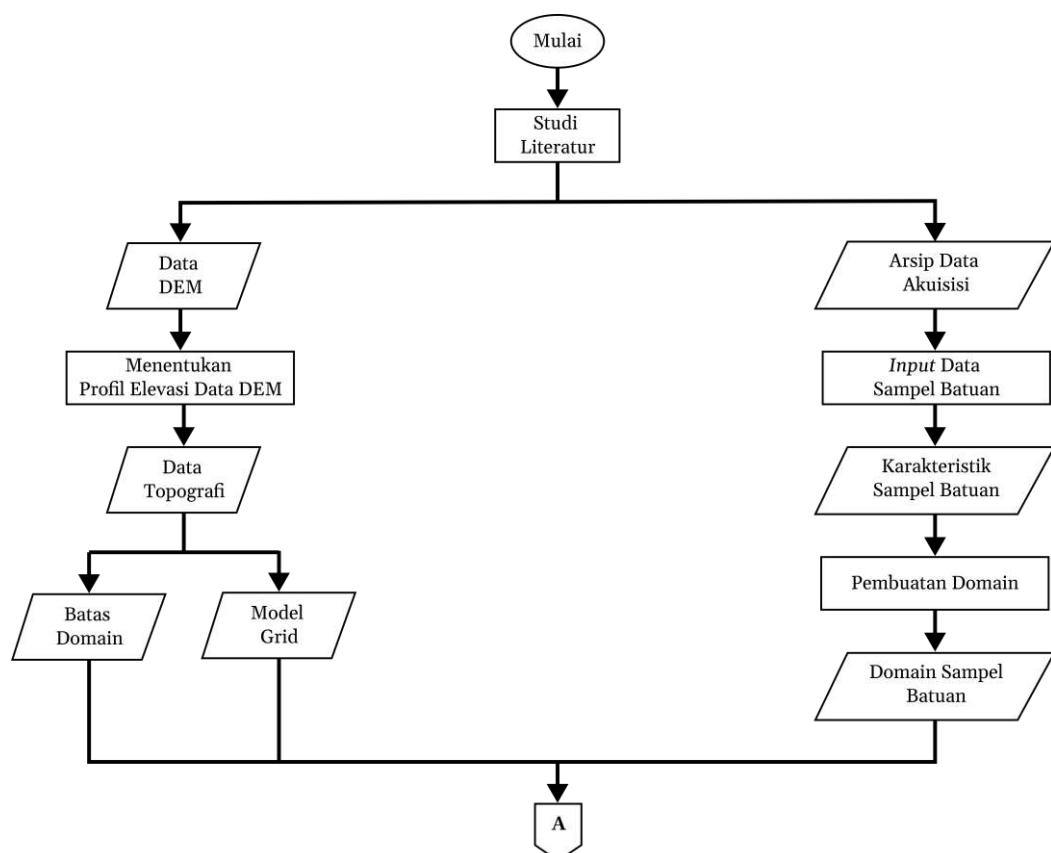
a. Diagram alur akuisisi data lapangan panas bumi Gunung Rajabasa

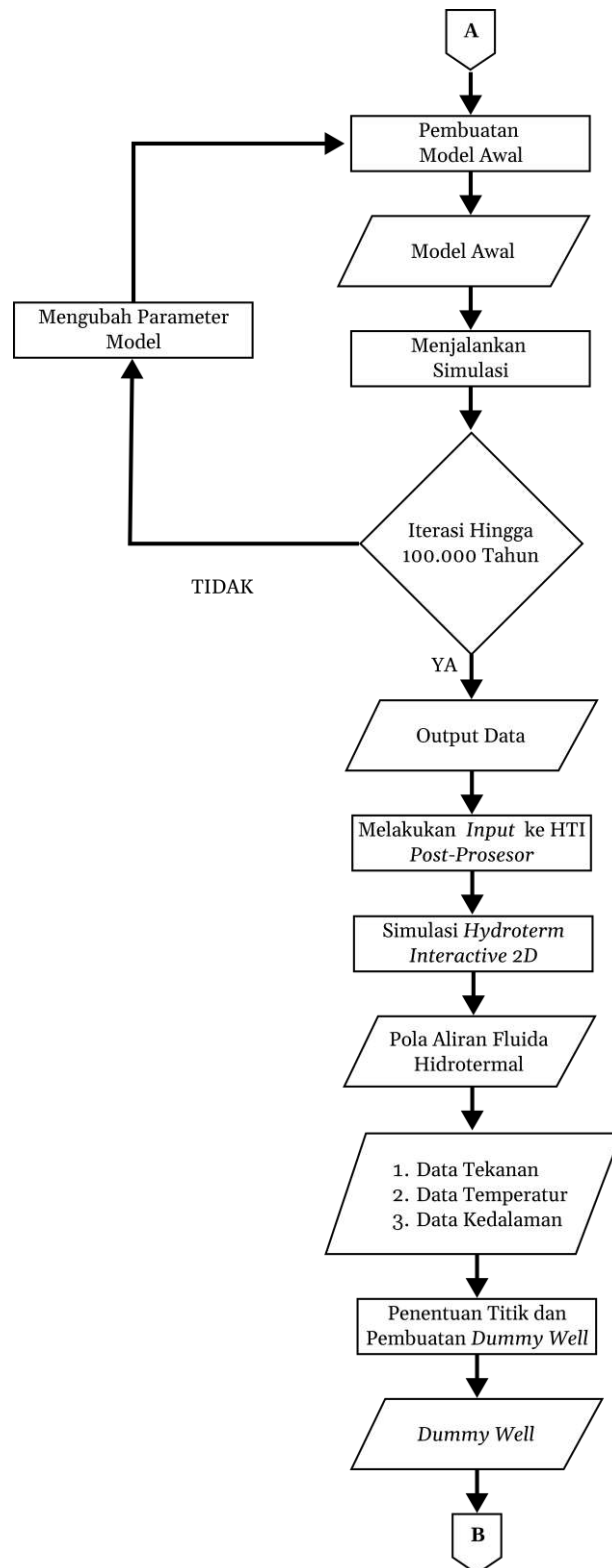


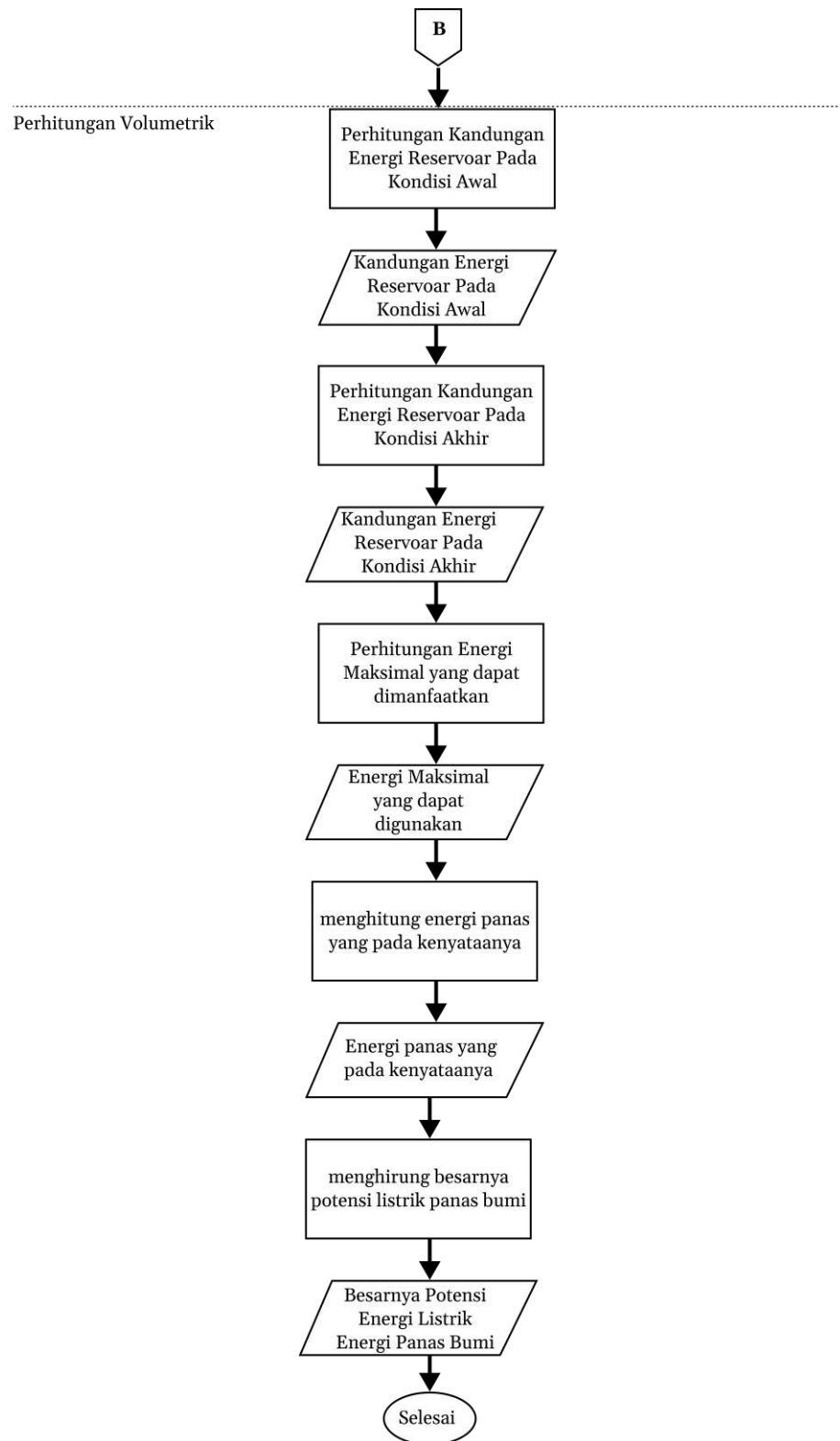


Gambar 9. Diagram alir akuisisi data lapangan

b. Diagram alir pengolahan data akuisisi dan pemodelan awal







Gambar 10. Diagram alir pengolahan data

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Simulasi numerik menampilkan model persebaran panas dan model laju aliran uap dan air pada ketiga lintasan pada lapangan panas bumi Gunung Rajabasa. Lintasan satu menunjukkan sebaran aliran fluida dan sebaran panas yang bergerak dari puncak Gunung Rajabasa berarah tenggara menuju barat laut, lintasan dua menunjukkan sebaran panas yang berarah timur tenggara – barat-barat laut, sedangkan lintasan tiga pergerakan fluida dan panas mengarah timur laut ke barat daya.
2. Berdasarkan *dummy well* dari ketiga lintasan menunjukkan dominasi zona 2 fasa yakni uap dan air. Indikasi *steam cap* pada lintasan satu pada kedalaman 380-1.150 meter, lintasan dua *steam cap* terindikasi pada kedalaman 1.050-1.620 meter, dan pada lintasan tiga *steam cap* terindikasi pada kedalaman 830-2.740 meter.
3. Berdasarkan perhitungan menggunakan metode volumetrik, ditemukan bahwa cadangan panas bumi yang dapat dimanfaatkan di lapangan panas bumi Gunung Rajabasa mencapai 2.09×10^{15} kJ. Oleh karena itu, potensi listrik yang dapat dihasilkan dari sumber panas bumi ini dalam kurun waktu 30 tahun diperkirakan mencapai 220,87 MWe.

6.2. Saran

Perlu dilakukan penelitian tambahan guna memperoleh parameter dukungan yang lebih tepat, seperti melakukan survei geofisika menggunakan metode magnetotelurik. Selain itu, diperlukan pengeboran sumur eksplorasi di area yang menjanjikan, sehingga dapat mencapai tingkat akurasi yang optimal dalam mengenali struktur geologi di bawah permukaan yang mengatur sistem panas bumi Gunung Rajabasa.

VII. DAFTAR PUSTAKA

- Apriani, N. (2021). Penentuan Daerah Prospek Reservoir Panas Bumi Rajabasa Berdasarkan Analisa Data Gaya Berat. *Skripsi*, Universitas Lampung.
- Basid, A., Andriani, N., dan Arfiyaningsih, S. (2014). Pendugaan Reservoir Sistem Panas Bumi Dengan Menggunakan Survey Geolistrik, Resistivitas Dan Self Potensial. *Jurnal Neutrino*, 7(1).
- Broto, S., dan Putranto, T.T. (2011). Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi. *Teknik* , 1(32).
- Cumming, W., dan Mackie, R. (2010). Resistivity Imaging Of Geothermal Resources Using 1D, 2D And 3D MT Inversion And TDEM Static Shift Correction Illustrated By A Glass Mountain Case History. *Proceedings World Geothermal Congress*.
- 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*. 2(16).
- 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*. 376-386.

- 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., Setijadji, L.D., dan Wintolo, D. (2015). Geology and Geothermal System in Rajabasa Volcano South Lampung Regency, Indonesia (Approach to Field of Observations, Water Geochemistry and Magnetic Methods). *Proceedings World Geothermal Congress 2015*.
- Dewi, R. (2023). Identifikasi Struktur Patahan Berdasarkan Analisis Fault Fracture Density (FFD) DEM Alos PALSAR Serta Analisis Derivative Dan Pemodelan 2D Gayaberat Daerah Gunung Rajabasa, Lampung Selatan. *Skripsi*. Universitas Lampung.
- Djarwanti, N. (2008). Komparasi Koefisien Permeabilitas (K) Pada Tanah Kohesif. *Media Teknik Sipil*, 1(8).
- Donovan, R., Karyanto., dan Dewanto, O. (2018). Studi Sifat Termal Batuan Daerah Lapangan Panas Bumi Way Ratai Berdasarkan Pengukuran Metode Konduktivitas Termal. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*. 3(4).
- Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke, H.H., dan Fertl, W. H. (1982). *Handbook Of Geothermal Energy*. Gulf Houston, 1(21).
- Endovani, R., dan Ardian, P. (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*. 1(5).
- 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).
- Habibirahman, S.A., Lestari., dan Kustono, B., (2019). Perhitungan Potensi Cadangan Panasbumi Lapangan “X” Menggunakan Data Eksplorasi. *Jurnal Petro*. 1(8).

- 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*, 3(2).
- Haerudin, N., Wahyudi, Suryanto, W., dan Sarkowi, M. (2013). Analysis Of The 3D Geothermal Reservoir Model From Anomaly Magnetic Data Using Mag3D. *Proceedings The Third Basic Science International Conference*, 1(5).
- Hafsari., Wulandari, S., dan Rading, A. (2017). Potensi Cadangan Panas Bumi Dengan Metoda Volumetrik Pada Sumur Saka-1 Lapangan Panas Bumi "X" Kabupaten Lembata Nusatenggara Timur. *Jurnal Offshore*, 1(1).
- Haluk, H. (2014). Pengaruh Permeabilitas Reservoir Terhadap Pembentukan Lapangan Panasbumi. *ISTECH*, 2(6).
- Harsono, A. (1997). *Evaluasi Formasi dan Aplikasi Log: Edisi Revisi-8. Schlumberger Oil Services: Indonesia.*
- Hochstein, M.P., dan Rowne, B.R.L. (2000), Surface Manifestation Of Geothermal Systems With Volcanic Heat Sources. Editors: Haraldur Sigurdsson. *Encyclopedia Of Volcanoes, Academic Press*, Hal. 835-855.
- 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*, 1126-1130.
- Imamuddin, M., dan Al Hanif, B. (2017). Penggunaan Metode Falling head Dalam Menentukan Daya Serap Air Untuk Mereduksi Genangan Di Kampus FTUMJ. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2017 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)*, 3(25).

- Kipp, K.L., Hsieh, P. A., dan Charlton, S. R. (2008). *Guide To The Revised Groundwater Flow And Heat Transport Simulator: HYDROTHERM – Version 3*. Virginia: U.S. Geological Survey.
- Koesoemadinata, R.P. (1978). *Geologi Minyak Bumi*. Bandung. Penerbit ITB.
- Lipse, 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*, 135-151.
- Mangga , S. A., Amirudin., Suwarti, T., Gafoer, S., dan Sidarto. (1993). *Geological Map Of Tanjungkarang, Sumatra*. Bandung: Geological Research And Development Centre.
- Nurwidyanto, I, M., Meida, Y., dan Sugeng, W. (2006). Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas Dan Permeabilitas Pada Batu Pasir. *Berkala Fisika*, 9(4).
- Rasimeng, S. (2008). Analisis Sesar Gunung Rajabasa Lampung Selatan Sebagai Daerah Prospek Geothermal Berdasarkan Data Anomali Medan Magnet Total. *Jurnal Sains MIPA*, 1(14).
- Santoso, D. (2002). *Pengantar Geofisika*. Bandung. Penerbit ITB.
- Saptadji, N. (2002). *Catatan Kuliah "Teknik Panas Bumi"*. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Suhada, M. F. (2022). Identifikasi Sistem Panasbumi Dengan Analisa Gradien Gravity Serta Pemodelan Data Topex Gayaberat Dan Resistivitas Magnetotelurik 2d Daerah Panasbumi Arjuno-Welirang. *Skripsi*, Universitas Lampung.
- Suharno. (2012). *Sistem Panas Bumi*. Penerbit Universitas Lampung. Bandar Lampung. ISBN 978-602-7509-22-1.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sherrif, R. E. (1976). *Applied Geophysics*. USA: Cambridge University.

Ummah, K. (2018). Identifikasi Litologi Bawah Permukaan Daerah Manifestasi Panas Bumi Tinatar-Karangrejo Kabupaten Pacitan Menggunakan Metode Geomagnet. *Skripsi*, Universitas Negeri Yogyakarta.