

**PERHITUNGAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN
METODE VOLUMETRIK DAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK
ALIRAN FLUIDA HIDROTHERMAL DI WAY RATAI, PESAWARAN**

(Skripsi)

Oleh

**PEGITA URMALA DEWI
1815051006**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

**PERHITUNGAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN
METODE VOLUMETRIK DAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK
ALIRAN FLUIDA HIDROTHERMAL DI WAY RATAI, PESAWARAN**

Oleh

PEGITA URMALA DEWI

Skripsi

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

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

PERHITUNGAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DI WAY RATAI, PESAWARAN

Oleh

PEGITA URMALA DEWI

Lapangan panas bumi di Way Ratai memiliki potensi energi yang cukup tinggi. Namun, karena belum adanya sumur eksplorasi status pengembangan lapangan panas bumi Way Ratai masih berada pada tahap eksplorasi. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal dan perpindahan energi panas, menentukan lokasi potensi sumur eksplorasi serta menghitung besar potensi energi listrik menggunakan metode volumetrik di lapangan panas bumi Way Ratai. Sehingga dapat meningkatkan dukungan data terkait penentuan potensi cadangan energi panas bumi di Way Ratai. Hasil penelitian pada 3 lintasan yang digunakan menunjukkan pergerakan massa fluida air dominan berasal dari zona *recharge* atau sumber air meteorik menuju lokasi manifestasi air panas di wilayah Margodadi dan Kali Tiga. Pergerakan massa aliran fluida uap juga menunjukkan persebaran yang tidak mencapai permukaan. Kondisi ini selaras dengan kondisi sebenarnya di lapangan panas bumi Way Ratai yang belum ditemukan adanya manifestasi uap panas berupa fumarola maupun solfatara. *Dummy well* dari 3 lintasan menunjukkan lokasi potensi reservoir dengan sistem dominasi air ditandai dengan *dummy well* yang menghasilkan zona dua fase, yakni fluida uap dan fluida air. Diindikasikan juga terdapat *steam cap* yang berada pada kedalaman 700 m, 1.450 m dan 1.850 m dengan tiga titik sumur pada lintasan 1, kedalaman 600 m, 800 m dan 1.700 untuk tiga titik sumur pada lintasan 2 dan kedalaman 850 m dan 1.200 m pada tiga titik sumur lintasan 3. Hasil perhitungan potensi energi listrik panas bumi menggunakan metode volumetrik dengan periode waktu 30 tahun dan faktor konversi listrik 10% yang mengacu pada SNI 13-6482-2000 sebesar 48,05 Mwe dengan luas area potensi reservoir untuk 3 lintasan yang digunakan pada penelitian ini adalah 7,5 km².

Kata kunci : Panas bumi, Way Ratai, Simulasi numerik, Volumetrik

ABSTRACT

CALCULATION OF GEOTHERMAL ENERGY POTENTIAL USING VOLUMETRIC METHOD AND NUMERICAL SIMULATION MODELING OF HYDROTHERMAL FLUID FLOW IN WAY RATAI, PESAWARAN

By

PEGITA URMALA DEWI

The geothermal field in Way Ratai has high energy potential. However, due to the absence of exploration wells, the development status of the Way Ratai geothermal field is still at the exploration stage. This research aims to perform numerical simulation modeling of hydrothermal fluid flow and heat energy transfer, determine the location of potential exploration wells and calculate the amount of potential electrical energy using the volumetric method in the Way Ratai geothermal field. So that it can improve data support related to determining the potential of geothermal energy reserves in Way Ratai. The results of the research on the 3 lines used show that the mass movement of water fluid dominantly comes from the recharge zone or meteoric water source towards the location of hot water manifestations in the Margodadi and Kali Tiga areas. The mass movement of the vapor fluid flow also shows a distribution that does not reach the surface. This condition is in line with the actual conditions in the Way Ratai geothermal field which has not found any manifestation of hot steam in the form of fumaroles or solfatara. Dummy wells from 3 lines show the location of potential reservoirs with water dominance systems characterized by dummy wells that produce two-phase zones, namely steam fluid and water fluid. It is also indicated that there is a steam cap located at a depth of 700 m, 1.450 m and 1.850 m with three well on line 1, a depth of 600 m, 800 m and 1.700 for three well on line 2 and a depth of 850 m and 1.200 m at three well on line 3. The results of the calculation of geothermal electrical energy potential using the volumetric method with a time period of 30 years and an electrical conversion factor of 10% referring to SNI 13-6482-2000 amounted to 48,05 Mwe with the area of potential reservoir for the 3 lines used in this research is 7.5 km².

Key words : Geothermal, Way Ratai, Numerical simulation, Volumetric

Judul Skripsi : **PERHITUNGAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DI WAY RATAI, PESAWARAN**

Nama Mahasiswa : **Pegita Urmala Dewi**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1815051006

Program Studi : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik



Pembimbing 1

Pembimbing 2

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

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

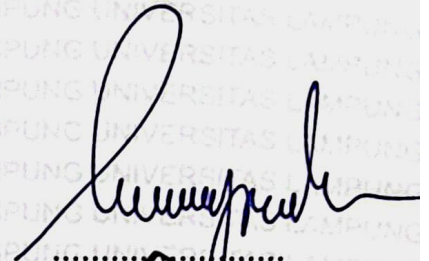
2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

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

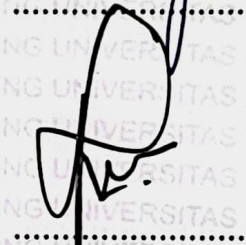
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

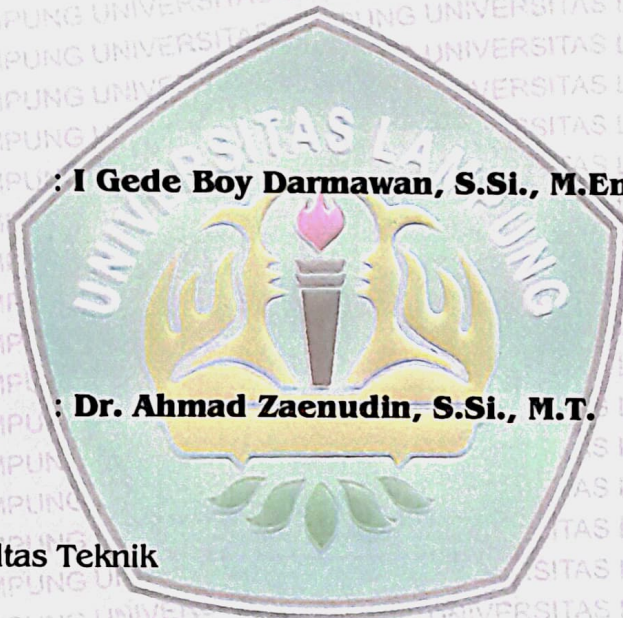
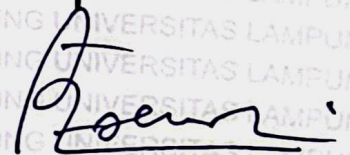
Ketua : Karyanto, S.Si., M.T.



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



Anggota : Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)
NIP. 19750928 200112 1002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 27 Juli 2023

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, 8 Agustus 2023

Penulis



Pegita Urmala Dewi

NPM. 1815051006

RIWAYAT HIDUP



Nama lengkap penulis adalah Pegita Urmala Dewi, lahir di Kutadalom pada tanggal 14 Maret 2001. Anak terakhir dari dua bersaudara pasangan Bapak Umar dan Ibu Romlah. Penulis mengawali pendidikan pada Sekolah Dasar Negeri 1 Gisting Bawah sejak tahun 2006 sampai tahun 2012, kemudian melanjutkan menempuh pendidikan menengah pertama di Madrasah Tsanawiyah Negeri 2 Tanggamus yang diselesaikan pada tahun 2015 dan melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Sumberejo yang diselesaikan pada tahun 2018.

Pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Universitas Lampung dan terdaftar sebagai Mahasiswa Fakultas Teknik Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN). Penulis selama menjalani masa perkuliahan tercatat turut aktif mengikuti kegiatan organisasi diantaranya terlibat aktif sebagai anggota maupun pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika (HIMA TG BHUWANA). Selama terlibat aktif di HIMA TG BHUWANA, penulis dipercaya mengemban amanah sebagai Anggota Bidang Kaderisasi pada kepengurusan

tahun 2020, Sekretaris Bidang Kaderisasi pada kepengurusan tahun 2021 dan menjadi Anggota Divisi Acara pada kegiatan nasional *Geophysics Whiz Event and Seminar* (GWES) ke-7 pada tahun 2021. Penulis juga aktif dalam organisasi *Student-Chapter Society of Exploration Geophysicists* (SEG) Universitas Lampung sebagai Anggota divisi *Human Resource Development* tahun 2021/2022. Selain aktif dalam kegiatan organisasi, penulis dipercaya menjadi asisten praktikum pada beberapa mata kuliah seperti Metode Seismik dan Metode Geomagnetik.

Pada tahun 2021 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Jurusan Teknik Geofisika Unila dengan judul **“Simulasi Numerik Pola Aliran Fluida Hidrotermal Lapangan Panas Bumi Way Ratai Menggunakan Hydrotherm Interactive 2D”**. Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar Sarjan Teknik dengan judul **“Perhitungan Potensi Energi Panas Bumi Menggunakan Metode Volumetrik dan Pemodelan Simulasi Numerik Aliran Fluida Hidrotermal Di Way Ratai, Pesawaran”**

PERSEMBAHAN

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan kepada:

IBU DAN AYAH TERCINTA

UMAR

&

ROMLAH

Yang selalu mendoakan dan memberi dukungan secara moril dan materiil. Terima kasih atas pengertian, perhatian dan kasih sayang tak hingga yang kalian berikan. Semoga Ayah dan Ibu selalu sehat dan diberikan kebahagiaan oleh Allah SWT.

SAUDARA TERKASIH

EUIS RAMILAWATI, ANDRIYANTO

&

MUHAMMAD GHOZALI R

Yang selalu mendoakan, mendukung dan menyemangatiku serta selalu memberikan bantuan kepadaku

Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung

Almamater Tercinta, Universitas Lampung

“Jangan menyerah. Hari ini keras, besok akan semakin berat,
tetapi lusa akan indah”

(Jack Ma)

“Memanusiakan manusia.

You have two hands. One to help yourself, the second to help others”

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 **“PERHITUNGAN POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DI WAY RATAI, PESAWARAN”**. 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 di dalam 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, 8 Agustus 2023

Penulis



Pegita Urmala Dewi

NPM. 1815051006

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas rahmat dan karunia Allah SWT, yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Perhitungan Potensi Energi Panas Bumi Menggunakan Metode Volumetrik dan Pemodelan Simulasi Numerik Aliran Fluida Hidrotermal Di Way Ratai, Pesawaran”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Dalam proses penyusunan, penulisan hingga skripsi ini selesai, penulis mendapatkan bimbingan, arah dan dukungan dari berbagai pihak sehingga penyusunan skripsi dapat berjalan dengan baik. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua Orangtuaku, Bapak Umar dan Ibu Romlah. Terima kasih untuk panjatan doa, semangat, dukungan dan nasihat yang diberikan selama ini. Bapak dan Ibu menjadi penguat dan pengingat paling hebat sehingga penulis dapat menyelesaikan studi sampai sarjana. Semoga Bapak dan Ibu senantiasa dilindungi oleh Allah SWT dan dapat menemani proses hidup penulis sampai akhir.
2. Kakakku dan keluarga bahagianya, Euis Ramilawati dan Andriyanto, serta Muhammad Ghozali Ramadan keponakan yang sampai hal ini ditulis masih menjadi satu-satunya. Terima kasih untuk semangat, doa, dukungan serta dengan ikhlas membantu demi kelancaran penulis menyelesaikan studinya.
3. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan Pembimbing satu yang telah memberikan arahan, saran dan kesediaan bapak dalam membimbing pengerjaan skripsi ini.

4. Bapak I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng. selaku dosen pembimbing kedua yang telah banyak meluangkan waktunya untuk berdiskusi memberikan arahan dengan sabar, koreksi, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
5. Bapak Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T. selaku penguji dan pembimbing akademik yang telah meluangkan waktu, memberikan masukan dan saran atas skripsi ini, sehingga menjadikan skripsi ini lebih baik. Serta, membimbing dan membantu penulis selama masa perkuliahan.
6. Segenap Dosen Pengajar di Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang penuh dedikasi dalam memberikan ilmu yang bermanfaat bagi penulis.
7. Para Staf dan Karyawan Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah membantu dalam bidang administrasi selama penulis menempuh studi.
8. Untuk Saudara Kevin Danilo, yang selalu membantu untuk bertumbuh dan dewasa sebaik ini, menjadi teman bertukar pikiran dan berkeluh kesah, menjadi pendukung terdepan, dan meyakinkan penulis disaat tidak yakin pada diri sendiri. Semoga segala kebaikan yang telah dilakukan dikembalikan dengan wujud yang lebih baik dan segala apa yang diusahakan saat ini dimudahkan jalannya mencapai cita-cita yang diimpikan oleh diri sendiri dan keluarga.
9. Teman-teman yang menemani masa perkuliahan, Wayan Vinna, Naira Pras, Winona Putri, dan Annisa Yulia karena selalu mengingatkan tentang kebaikan, menjadi penolong disaat-saat sulit menjalani kuliah dan memberikan dukungan semangat untuk penulis.
10. Untuk Yasinta Tenria D.U, Rika Yulia N, Qorina Aulia U, dan Sinta Nadia P, teman perkumpulan dan sahabat sejak masa sekolah, semoga kita senantiasa menjadi teman dalam waktu yang lebih lama lagi.
11. Keluarga, Angkatan, Teknik Geofisika 18 (TGasak) yang telah banyak berbagi rasa dari awal perkuliahan hingga saat ini, telah memberikan dukungan dan kebersamaan. Terima kasih karena menjadi bagian dari cerita masa kuliah penulis, semoga kita semua menjadi pribadi yang sukses dimasa depan.

12. Untuk saudara dan keluarga besar yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih untuk doa dan dukungan, bantuan dan motivasinya selama ini.
13. Keluarga besar HIMA TG BHUWANA, terima kasih atas pengalaman dan pembelajaran yang sudah penulis dapati baik berkenaan dengan dunia geofisika maupun kemampuan berorganisasi.
14. Seluruh pihak yang terlibat dalam proses penyusunan skripsi ini yang telah memberikan bantuan, kesempatan dan pengalaman. Penulis mengucapkan terima kasih banyak.

Bandar Lampung, 8 Agustus 2023

Penulis



Pegita Urmala Dewi

NPM. 1815051006

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Lokasi Daerah Penelitian	4
2.2 Geologi dan Stratigrafi Regional	5
2.3 Struktur Sesar.....	6
2.4 Geomorfologi.....	8
2.5 Manifestasi Way Ratai.....	8
2.6 Penelitian Terdahulu	10
III. TEORI DASAR.....	14
3.1 Sistem Panas bumi	14
3.2 Sifat Batuan Panas bumi	16
3.2.1 Porositas.....	16
3.2.2 Permeabilitas.....	17
3.2.3 Densitas.....	17
3.2.4 Kalor Jenis	18
3.2.5 Konduktivitas Panas Batuan	19
3.3 Metode Volumetrik.....	19

3.3.1 Panas yang Tersimpan dalam Batuan	20
3.3.2 Panas yang Tersimpan dalam Fluida	20
3.3.3 Perhitungan Metode Volumetrik	22
3.4 Persamaan Aliran Air Tanah.....	23
3.5 Persamaan Perpindahan Panas	24
IV. METODE PENELITIAN.....	26
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	26
4.2 Alat dan Bahan.....	27
4.3 Prosedur Penelitian	27
4.4 Diagram Alir	29
V. HASIL DAN PEMBAHASAN	31
5.1 Data Karakteristik Batuan.....	31
5.2 Pembahasan	33
5.2.1 Hasil Simulasi Lintasan 1	33
5.2.2 Hasil Simulasi Lintasan 2	42
5.2.3 Hasil Simulasi Lintasan 3	51
5.2.4 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 1	59
5.2.5 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 2	62
5.2.6 Profil Suhu dan Tekanan <i>Dummy Well</i> Lintasan 3	64
5.2.7 Perhitungan Potensi Sumber Energi Panas Bumi	66
VI. KESIMPULAN DAN SARAN	71
6.1 Kesimpulan	71
6.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA.....	73

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Suhu manifestasi Way Ratai	9
2. Penelitian terdahulu.....	11
3. Nilai densitas batuan	18
4. Jadwal kegiatan penelitian	26
5. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 1	31
6. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 2	32
7. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 3	32
8. Nilai parameter potensi sumber daya panas bumi Way Ratai.....	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Peta lokasi daerah penelitian.....	4
2. Peta geologi daerah penelitian	5
3. Peta manifestasi panas bumi Way Ratai	9
4. Model konseptual sistem panas bumi	15
5. Diagram alir	29
6. Profil sayatan geologi dan parameter input Lintasan 1 Way Ratai.....	33
7. Model sebaran panas lintasan 1 iterasi ke 1.000 – 50.000 tahun	35
8. Hasil simulasi model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 1	37
9. Hasil simulasi model aliran massa fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 1	39
10. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000 – 50.000 tahun lintasan 1...	41
11. Profil sayatan geologi dan parameter input lintasan 2	42
12. Model sebaran panas lintasan 2 iterasi ke 1.000 – 50.000 tahun	44
13. Hasil simulasi model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 2	46
14. Hasil simulasi model aliran massa fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 2	48
15. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000 – 50.000 tahun lintasan 2...	50
16. Profil sayatan geologi dan parameter input model simulasi lintasan 3.....	51
17. Model sebaran panas tahun ke 1.000-50.000 tahun Lintasan 3	53

18. Hasil simulasi model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3	55
19. Hasil simulasi model aliran massa fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3	57
20. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000 – 50.000 tahun lintasan 3... ..	59
21. Titik <i>dummy well</i> lintasan 1	60
22. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 1	61
23. Titik <i>dummy well</i> lintasan 2	62
24. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 2	63
25. Titik <i>dummy well</i> lintasan 3	64
26. Profil suhu dan tekanan <i>dummy well</i> lintasan 3	65
27. Zona potensi reservoir lintasan 1	66
28. Zona potensi reservoir lintasan 2	67
29. Zona potensi reservoir lintasan 3	67
30. Lokasi potensi reservoir 3 lintasan daerah penelitian	71

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Potensi energi panas bumi di Indonesia sangat tinggi, hal ini karena secara geologi Indonesia terletak pada zona busur vulkanik berupa subduksi pertemuan Lempeng Samudra Hindia-Australia dan Lempeng Benua Asia. Namun hingga tahun 2016 Direktorat Inventarisasi Sumber Daya Mineral (ESDM) mencatat penggunaan potensi energi panas bumi Indonesia baru mencapai 5% atau sekitar 1493,5 MW dari sekitar 256 daerah potensi panas bumi yang teridentifikasi dengan total potensi mencapai 28.617 MW. Salah satu potensi energi panas bumi berada di Lampung, yakni lapangan panas bumi Way Ratai yang terletak di kecamatan Padang Cermin, Pesawaran. Pada tahun 2017 berdasarkan data Direktorat ESDM panas bumi Way Ratai memiliki potensi lebih dari 330 MW dengan manifestasi air panas. Daerah panas bumi Way Ratai memiliki manifestasi berupa air panas yang terdapat dipermukaan dan mempunyai suhu yang relatif tinggi, oleh karena itu besar kemungkinan suhu di reservoirnya sangat tinggi. Potensi ini yang menjadikan daerah panas bumi Way Ratai sebagai prospek panas bumi yang dapat dikembangkan sebagai sumber energi pembangkit listrik.

Hingga saat ini potensi panas bumi di daerah Way Ratai terus dikembangkan. Kegiatan eksplorasi dan pengembangan di lapangan panas bumi Way Ratai masih pada tahap eksplorasi awal dikarenakan belum selesainya studi kelayakan untuk operasi produksi yang salah satunya diakibatkan karena belum adanya sumur uji atau sumur eksplorasi yang berada pada daerah panas bumi Way Ratai sehingga melatarbelakangi penelitian ini. Penelitian sebelumnya oleh Karyanto dkk., (2021) menggunakan pemodelan numerik aliran fluida hidrotermal yang dapat digunakan

untuk mensimulasikan zona potensi reservoir pada Lapangan Panas bumi Way Ratai. Pada tahapan ini, pemodelan numerik terkait zona reservoir panas bumi menjadi cukup penting karena dapat digunakan dalam proses penentuan lokasi sumur eksplorasi/uji. Keberadaan sumur uji atau sumur eksplorasi adalah untuk membuktikan adanya sumber daya panas bumi di daerah tersebut dan menguji model sistem panas bumi yang dibuat berdasarkan data-data hasil survei (Saptadji, 2002). 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.

Estimasi awal mengenai potensi cadangan pada lapangan panas bumi sangat penting dilakukan untuk memberikan informasi mengenai kelayakan suatu lapangan panas bumi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai PLTP. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan estimasi potensi listrik panas bumi, yakni metode perbandingan dan metode volumetrik (Suhartono, 2014). Pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai metode volumetrik untuk menghitung cadangan potensi sumber daya panas bumi dengan pemodelan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal di lapangan panas bumi Way Ratai.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat model 2D aliran fluida hidrotermal dan perpindahan energi panas pada lapangan panas bumi Way Ratai menggunakan simulasi numerik.
2. Menentukan lokasi potensi sumur uji (*well targeting*) berdasarkan model 2D hasil simulasi.
3. Menghitung potensi sumber daya energi panas bumi di Way Ratai menggunakan metode volumetrik.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah menggunakan 3 lintasan, yaitu 2 lintasan dari arah barat laut-tenggara Gunung Ratai dan 1 lintasan dari arah barat daya-timur laut untuk dilakukan pemodelan menggunakan *software* Hydrotherm Interactive 2D.

1.4 Manfaat Penelitian

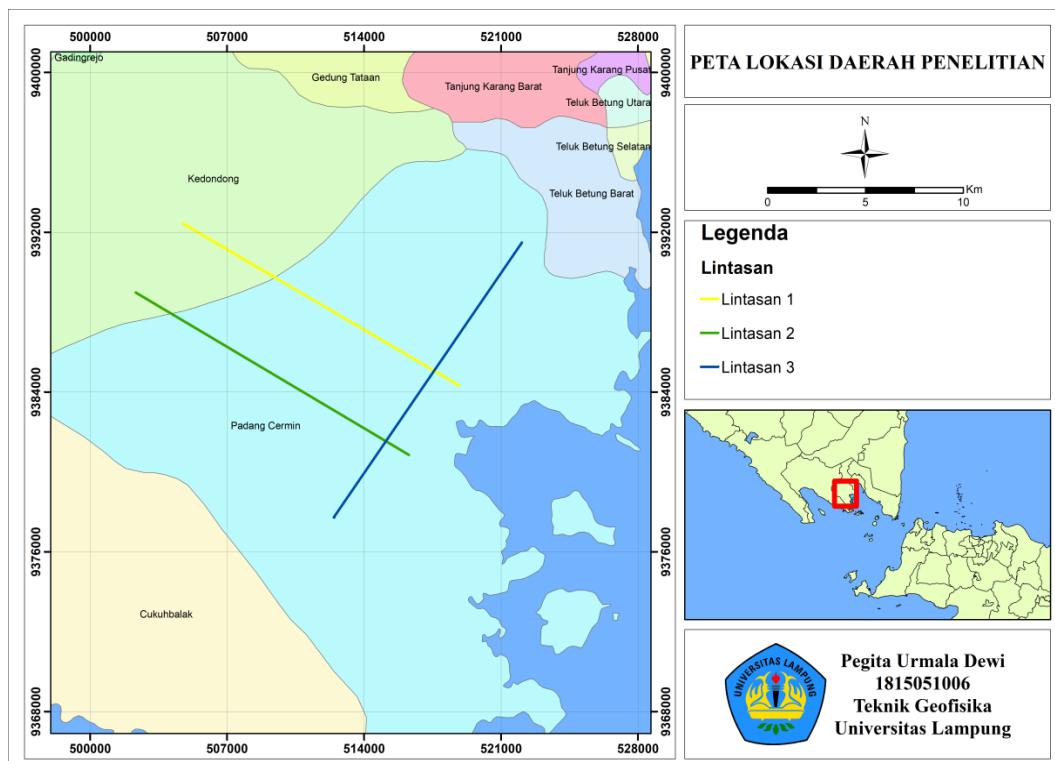
Manfaat dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi dan gambaran mengenai kondisi geologi serta model *steady state* 2D aliran fluida hidrotermal pada 3 lintasan yang digunakan di lapangan panas bumi Way Ratai.
2. Meningkatkan fokus area potensi pengeboran sumur (*well targeting*) untuk meminimalisir resiko eksplorasi di lapangan panas bumi Way Ratai.
3. Data pendukung dalam pengembangan daerah panas bumi Way Ratai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

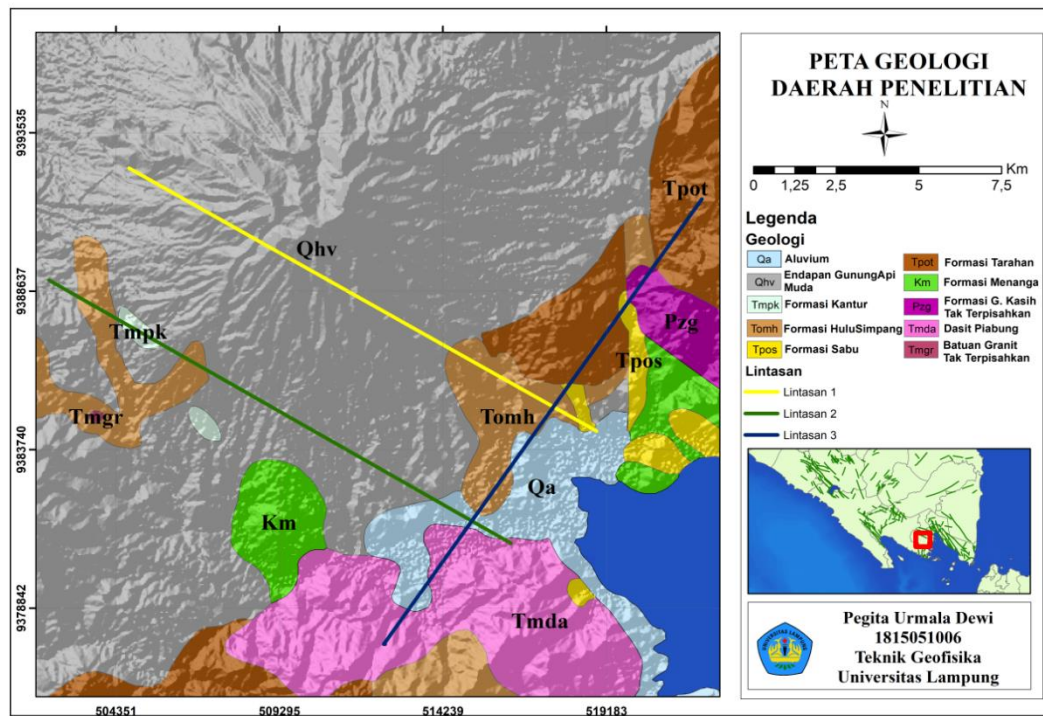
Lokasi daerah penelitian terletak di daerah panas bumi Way Ratai, Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Secara geografis daerah ini terletak pada koordinat $5^{\circ}29'16''$ LS sampai $5^{\circ}38'2''$ LS dan $105^{\circ}04'1''$ BT sampai $105^{\circ}13'11''$ BT. Berikut daerah penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (BIG, 2022)

2.2 Geologi dan Stratigrafi Regional

Lokasi penelitian daerah Way Ratai, Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung berada pada geologi regional Lembar Tanjung Karang. Berikut ini merupakan peta geologi regional daerah panas bumi Way Ratai ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993)

Dari peta geologi yang ditunjukkan oleh Gambar 2 terlihat lokasi penelitian memiliki beberapa formasi batuan diantaranya Aluvium (Qa) yang terdiri atas batuan jenis batuan kerakal, kerikil, pasir, lempung, dan gambut. Endapan GunungApi Muda (Qhv) yang terdiri dari batuan lava (andesit-basal), breksi, dan tuff. Formasi Kantur (Tmpk) yang terdiri atas perselingan antara tuffit, batulempung karbonan, dan batupasir. Formasi Hulu Simpang (Tmoh) yang terdiri atas lava andesit basal, tuf dan breksi. Formasi Sabu (Tpos) yang terdiri atas perselingan antara breksi konglomerat dengan batupasir. Formasi Tarahan (Tpot) yang terdiri atas Tuf padu, breksi dengan sisipan rijang. Formasi Menanga (Km) yang terdiri atas perselingan serpih, dan batulempung dengan basal, sisipan rijang. Formasi Gunung Kasih Tak Terpisahkan (Pzg) yang terdiri dari sekis pelitan dan

sedikit gnes. Dasit Piabung (Tmda) yang terdiri dari dasit. Batuan Granit Tak Terpisahkan (Tmgr) yang terdiri dari granit dan granodiorit (Mangga dkk., 1993).

Adapun stratigrafi lapangan panas bumi Way Ratai dikelompokkan menjadi empat kelompok, yaitu:

- **Batuan Tersier**
Batuan Tersier yang berada di sekitar daerah panas bumi Way Ratai dikenal sebagai batuan sedimen dari Formasi Ratai (Sutawidjaja, 1982) yang tersusun oleh konglomerat, batupasir, breksi lahar dan batulempung yang kadangkala berasosiasi dengan tuf andesit. Sedimen Tersier pada wilayah ini tersebar pada sisi selatan-barat daya (Gafoer dkk., 1993).
- **Batuan Vulkanik Pra Erupsi Gunung Betung dan Ratai**
Batuan vulkanik pra erupsi ini terletak diatas batuan sedimen Tersier. Adapun kelompok batuan vulkanik dari yang lebih tua ke batuan yang lebih muda adalah batuan Vulkanik Gebang, Ignimbrit Gebang, Aliran Lava Gebang, Endapan Debris, dan Banjarmerger Vulkanik.
- **Batuan Vulkanik Erupsi Gunung Betung dan Ratai**
Batuan vulkanik Kuarter di erupsikan menjadi dua sumber erupsi, yaitu erupsi Gunung Betung dan Ratai di dasar Kaldera Gebang.
- **Endapan Permukaan**
Endapan permukaan ini meliputi endapan Lahar dan endapan Aluvium (Donovan dkk., 2018).

2.3 Struktur Sesar

Struktur sesar pada lapangan panas bumi Way Ratai didominasi oleh struktur sesar berarah barat laut-tenggara dan timur laut-barat daya yang diduga sebagai sesar normal. Selain terdapat sesar normal daerah ini dicirikan dengan adanya kelurusan-kelurusan (*lineaments*) berarah timur laut-barat daya dan barat laut-tenggara. Pembentukan sesar normal diakibatkan karena adanya gaya tarik (*extention*) dan menimbulkan *open space* yang cukup lebar. Keberadaan struktur sesar pada daerah panas bumi dianggap penting sebab dapat menyokong tingginya permeabilitas batuan di zona reservoir panas bumi. Struktur sesar normal pada

daerah panas bumi Way Ratai menjadi cukup penting, khususnya untuk struktur sesar normal berarah timur laut-barat daya, sesar normal berarah barat laut–tenggara dan kelurusan-kelurusan karena mempengaruhi zona prospek panas bumi di Way Ratai (Gafoer dkk., 1993).

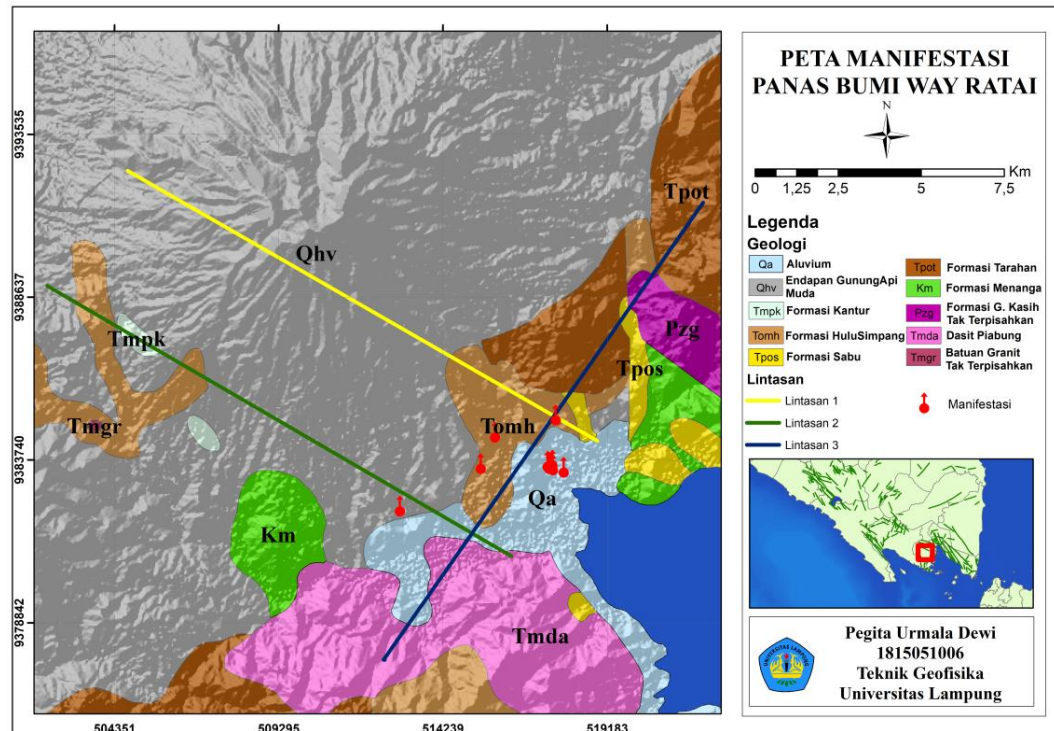
- Sesar normal berarah barat laut – tenggara
 Sesar ini berada pada daerah sekitar puncak, atau sedikit di utara Gunung Betung dan di sebelah selatan–tenggara kawah puncak Gunung Ratai. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal di sekitar puncak Gunung Betung tampak berbeda, yaitu satu diantaranya memperlihatkan blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara. Kedua sesar normal barat laut – tenggara di sekitar puncak Gunung Betung ini membentuk struktur graben. Sedangkan sesar normal berarah barat laut – tenggara di sekitar puncak Gunung Ratai memperlihatkan blok timur laut yang relatif turun terhadap blok barat daya. Struktur sesar normal yang berarah barat laut–tenggara lainnya (relatif kecil), terdapat di sisi tenggara, selatan, barat daya dan barat daerah penyelidikan. Pergerakan sesar normal yang kecil-kecil ini sangat beragam, ada yang blok timur laut relatif turun terhadap blok barat daya, dan sebaliknya ada yang blok barat daya relatif turun terhadap blok timur laut. Sebagai tambahan, satu pasang struktur sesar normal yang berarah barat laut–tenggara di kaki tenggara Gunung Ratai membentuk struktur graben (Gafoer dkk., 1993).
- Sesar normal berarah timur laut – barat daya
 Sesar normal timur laut – barat daya ini dicirikan oleh dua struktur sesar normal, yaitu memotong puncak kawah Gunung Betung dan di kaki tenggara Gunung Betung. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal ini relatif sama, yaitu blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara. Kedua sesar normal timur laut – barat daya ini membentuk *step fault*. Struktur sesar normal yang berarah timur laut – barat daya lainnya tampak relatif pendek, terdapat di sisi timur, tenggara, selatan dan barat daerah penyelidikan. Pergerakan sesar normal yang kecil-kecil ini sangat beragam, ada yang blok barat laut relatif turun terhadap blok tenggara, dan sebaliknya ada yang blok tenggara relatif turun terhadap blok barat laut (Gafoer dkk., 1993).

2.4 Geomorfologi

Lapangan panas bumi Way Ratai berada dalam lingkungan kompleks gunungapi yang memiliki dua kerucut gunungapi berdampingan, yaitu Gunung Ratai dan Gunung Betung. Pembentukan sistem panas bumi Way Ratai dipengaruhi oleh proses endogen dan eksogen yang terjadi pada zaman Kuartar. Proses endogen ini berasal dari dinamika gunungapi Ratai dan Betung, dan tektonik regional yang berpengaruh pada kawasan tersebut. Pada proses eksogen yaitu proses hidrosfer yang diakibatkan erosi permukaan bumi. Proses endogen dan eksogen ini akhirnya menghasilkan suatu bentang alam berupa dataran dan perbukitan di sekitar wilayah tersebut. Bentang alam dikelompokkan berdasarkan karakteristiknya, seperti bentuk atau dimensi morfologi, kemiringan lereng, tekstur dan pola aliran sungai. Berdasarkan karakteristik tersebut, morfologi wilayah Way Ratai dan sekitarnya dikelompokkan kedalam tujuh satuan morfologi, yaitu morfologi kubah lava, perbukitan bertekstur kasar, perbukitan bertekstur halus, perbukitan tua, pedataran bergelombang lemah, pedataran landai, dan perbukitan terisolir (Gafoer dkk., 1993).

2.5 Manifestasi Way Ratai

Daerah yang memiliki potensi panas bumi dapat diketahui melalui peninjauan langsung di lapangan dan ditemukan adanya manifestasi-manifestasi di permukaan. Pada lapangan panas bumi Way Ratai ditemukan adanya manifestasi berupa sumur air panas, undukan silika sinter dan perbedaan vegetasi yang mencolok (Putri dkk., 2014). Keberadaan panas bumi di daerah penelitian berdasarkan peta geologi Lembar Tanjung Karang terletak di sebelah tenggara Gunung Ratai dan sebelah selatan sesar Menangga. Dapat dilihat pada gambar 3 dimana batuan yang tersingkap didominasi oleh batuan gunung api muda diantaranya adalah batu lava (andesit-basal), breksi dan tuf, dan batuan endapan permukaan diantaranya adalah endapan rawa, dan endapan aluvium (Pratama dkk., 2019).



Gambar 3. Peta manifestasi panas bumi Way Ratai

Di daerah panas bumi Way Ratai terdapat sumur-sumur air panas yang bersuhu tinggi ($80^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$) yang berada di beberapa tempat (Karyanto, 2003). Pada manifestasi air panas Padok yang terdapat di lapangan panas bumi Way Ratai didapatkan bahwa data geokimia mata air panas Padok menunjukkan fluida air panas bersifat klorida yang bersumber dari reservoir Gunung Ratai akan tetapi dikarenakan fluida tersebut jauh dari daerah terbentuknya maka terkondensasi dengan air tanah dan batuan sekitarnya, diperkuat dengan beberapa unsur seperti nilai Cl lebih tinggi dibanding nilai B dan Li serta kadar Mg lebih tinggi dari K dan Na (Pratama, 2019).

Tabel 1. Suhu manifestasi Way Ratai (Karyanto dkk., 2020)

No	Nama Manifestasi	Suhu Manifestasi ($^{\circ}\text{C}$)
1	Margodadi	91,0
2	Margodadi	74,0
3	Margodadi	85,3
4	Margodadi	89,3
5	Margodadi	89,0
6	Margodadi	98,1
7	Margodadi	99,6

No	Nama Manifestasi	Suhu Manifestasi (°C)
8	Margodadi	83,3
9	Margodadi	94,3
10	Margodadi	100,8
11	Margodadi	98,4
12	Margodadi	97,6
13	Margodadi	94,7
14	Margodadi	103,0
15	Margodadi	87,5
16	Margodadi	87,5
17	Margodadi	88,1
18	Margodadi	81,9
19	Margodadi	94,0
20	Margodadi	97,8
21	Margodadi	83,9
22	Kalitiga	89,0
23	Kalitiga	76,3
24	Way hurang	56,6
25	Way hurang	65,6
26	Padok	97,1
27	Bambu Kuning	94,3
28	Way Asin	86,9
29	Way Asin	89,1
30	Way Asin	84,0
31	Cangkuang Padang	72,1
32	Padang Cermin	45,9

2.6 Penelitian Terdahulu

Lapangan panas bumi Way Ratai merupakan lokasi potensi untuk pengembangan panas bumi di Indonesia. Sehingga, banyak penelitian yang telah dilakukan di lapangan panas bumi Way Ratai untuk mengembangkan potensi panas bumi tersebut. Salah satu penelitian di lapangan panas bumi Way Ratai oleh (Putri dkk., 2014) mengenai studi pendahuluan manifestasi panas bumi di lapangan panas bumi Way Ratai. Adapun metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah melalui survei geologi, analisis geokimia dan survei manifestasi disekitar lokasi prospek panas bumi Way Ratai. Kemudian diambil sampel berupa air panas dan silika sinter yang selanjutnya di uji secara kimia untuk menghitung temperatur pada reservoir.

Hasilnya didapatkan bahwa berdasarkan kondisi geologi sumber air resapan lapangan panas bumi Way Ratai berasal dari dataran tinggi yang mengelilingi lokasi panas bumi dan air laut yang berada didekat lokasi panas bumi. Dari analisis kimia untuk menghitung temperatur pada reservoir didapatkan hasil bahwa suhu reservoir panas bumi adalah 131,8°C dan sistem panas bumi Way Ratai didominasi oleh air dan termasuk dalam kategori *liquid dominated system*. Adapun penelitian terkait lapangan panas bumi Way Ratai disajikan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Tabel 2. Penelitian terdahulu

No.	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
1.	Wayan Vinna E, (2022)	Pemodelan Numerik dan Perhitungan Volumetrik	Berdasarkan hasil pemodelan simulasi numerik 2 lintasan berarah barat daya – timur laut dan 1 lintasan berarah barat laut-tenggara menunjukkan bahwa lapangan panas bumi Way Ratai merupakan tipe dominasi air ditunjukkan dengan adanya fluida dua fase, yakni fluida uap dan air. Potensi listrik panas bumi menggunakan perhitungan metode volumetrik dengan periode waktu 30 tahun didapatkan sebesar 62,55 MWe.
2.	Karyanto dkk., (2021)	Pemodelan Numerik	Hasil pemodelan simulasi numerik menunjukkan bahwa pada iterasi 25.000 tahun merupakan kondisi <i>steady-state</i> karena distribusi massa uap tidak mencapai area manifestasi sejalan dengan kondisi sebenarnya dilapangan. Potensi reservoir panas bumi memiliki panjang sekitar 9 km, tebal 0,5 – 1,5 km yang berada di bawah Gunung Ratai. Serta didapatkan suhu fluida reservoir berkisar antara 250°C – 300°C.

No.	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
3.	Karyanto dkk., (2021)	Metode <i>Heat Loss</i>	Berdasarkan hasil pengukuran dan perhitungan nilai <i>heat loss</i> di lapangan panas bumi Way Ratai total seluruh manifestasi terukur di wilayah panas bumi Way Ratai mencapai 895,55 kWe atau 0,895 MWe. Hasil ini menunjukkan pola yang berbeda dengan sebaran suhu manifestasi tertinggi yang didominasi oleh manifestasi Margodadi, Way Asin dan Bambu Kuning, sedangkan nilai <i>heat loss</i> total didominasi oleh manifestasi Margodadi.
4.	Karyanto dkk., (2020)	Pengukuran konduktivitas termal	Dari pengukuran konduktivitas termal di sekitar area manifestasi dihasilkan nilai termal konduktivitas berkisar 0,056 dan 0,664 W/mK, nilai resistivitas termal 1,344 dan 17,527 mK/W dan memiliki suhu antara 22,7 dan 52,6°C. perbedaan nilai ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti struktur geologi, alterasi dan manifestasi.
5.	Suryadi dkk., (2019)	Metode <i>Audio Magnettotelluric</i> (AMT)	Hasil dari pengukuran AMT menggambarkan keadaan bawah permukaan berdasarkan sebaran resistivitasnya. Nilai resistivitas daerah panas bumi Way Ratai bervariasi. Resistivitas rendah (0-10 Ω), resistivitas sedang (10-60 Ω), resistivitas dan resistivitas tinggi (>60 Ω). Batuan penutup teridentifikasi berada pada kedalaman 100-750 meter, reservoir berada pada kedalaman 300-1600 meter, batuan dasar berada pada kedalaman 700-3000 meter.

No.	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
6.	Setyawan dkk., (2019)	Metode <i>Self Potential</i> (SP)	Pola aliran fluida dan sebaran suhu permukaan dangkal yang dilakukan dengan menggunakan metode SP, didapatkan hasil penelitian dimana lapangan panas bumi Way Ratai merupakan zona konduktif dengan nilai SP berkisar antara - 193 mW - 133 mW dan suhu permukaan dangkal antara 29°C – 37°C. Hasil pemetaan arah gradien potensial listrik diinterpretasikan sebagai pola aliran fluida dimana arah aliran fluida secara umum mengalir dari arah utara menuju selatan.
7.	Haerudin dkk., (2016)	Survei Radon dan Thoron	Dilakukan untuk menentukan lokal sesar dimana dari 70 titik pengukuran dihasilkan bahwa terdapat tiga anomali kelurusan melalui manifestasi panas bumi yang terindikasi sebagai sesar lokal. Sesar pertama menghubungkan mata air panas Bambu Kuning dan Margodadi berarah barat laut-tenggara. Sesar kedua menghubungkan mata air panas Padok dan Way Asin berarah barat daya-timur laut. Sesar ketiga melewati pemandian air panas Margodadi. Sesar pertama dan kedua diindikasikan sebagai saluran fluida panas bumi

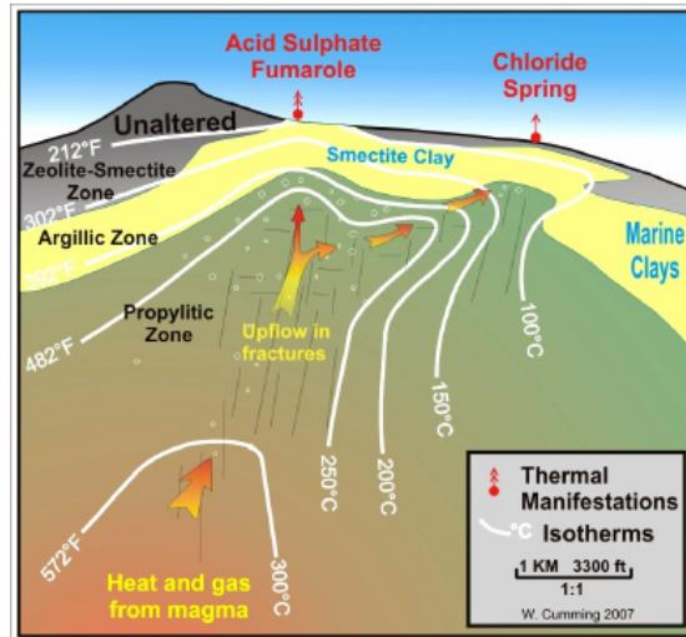
III. TEORI DASAR

3.1 Sistem Panas bumi

Energi panas bumi merupakan energi panas alami yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Budihardi (1998) dalam (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. Sedangkan, 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 diklasifikasikan kedalam beberapa jenis, yaitu sistem hidrotermal, *geopressured system*, *hot dry rock*, dan *magmatic system*. Sistem panas bumi yang paling banyak dimanfaatkan adalah sistem panas bumi hidrotermal karena pada sistem ini pori-pori batuan mengandung air, uap atau keduanya dan reservoir umumnya terletak tidak terlalu dalam sehingga masih ekonomis untuk diusahakan (Saptadji, 2001). Sistem panas bumi di Indonesia umumnya merupakan sistem panas bumi hidrotermal dimana proses perpindahan panas dari sumber panas menuju permukaan terjadi secara konveksi yang melibatkan fluida meteorik. Sistem panas bumi di Indonesia juga memiliki temperatur tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$), hanya beberapa diantaranya yang memiliki temperatur sedang ($150 - 225^{\circ}\text{C}$) (Isa, 2018).

Sistem panas bumi merupakan satu kesatuan yang saling mendukung terciptanya energi panas bumi. Suatu sistem panas bumi akan menjadi sempurna apabila terdapat komponen seperti sumber panas (*heat source*), reservoir, batuan penudung (*cap rock*), geologi yang bersifat *permeable*, serta terdapat *recharge area* (Suharno, 2012).



Gambar 4. Model konseptual sistem panas bumi (Cumming dan Mackie, 2010).

Suatu sistem panas bumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dan sumber panas. Air akan merembes ke dalam tanah melalui pori-pori atau rongga batuan, akibatnya air akan menerobos turun ke batuan panas (*hot rock*). Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas yang menyebabkan temperatur air meningkat, volume air bertambah, dan tekanan menjadi naik. Keadaan ini menyebabkan air panas bergerak naik ke atas melalui celah, retakan atau pori-pori yang bisa menghantarkan air menuju permukaan dan dapat ditemui sebagai manifestasi yang mencirikan keberadaan suatu sistem panas bumi. Namun bila celah itu tidak tersedia maka fluida panas akan tetap terperangkap di bawah permukaan (Suharno, 2010).

3.2 Sifat Batuan Panas Bumi

3.2.1 Porositas

Porositas (ϕ) adalah perbandingan volume pori terhadap volume total batuan. Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persen. Porositas merupakan representasi dari kemampuan suatu batuan reservoir untuk menyimpan fluida (Harsono, 1997). Reservoir panas bumi dapat ditemukan pada batuan rekah alami, dimana batuan tersebut terdiri dari rekahan-rekahan dan rongga atau pori. Volume rongga atau pori batuan tersebut umumnya dinyatakan sebagai fraksi dari volume total batuan dan didefinisikan sebagai porositas (Saptadji, 2002).

Porositas batuan reservoir panas bumi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu porositas total dan porositas efektif. Porositas total adalah perbandingan antara volume pori total terhadap volume batuan total yang dinyatakan dalam persen (Loversen, 1954). Secara matematis dapat dituliskan pada persamaan berikut :

$$\text{Porositas total } (\phi) = \frac{(\text{Volume pori-pori total})}{(\text{Volume total batuan})} \times 100\% \quad (1)$$

Sedangkan porositas efektif merupakan perbandingan antara volume pori-pori yang saling berhubungan dengan volume batuan total yang dinyatakan dalam persen (Labo, 1987), yang secara matematis dituliskan sebagai berikut:

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

Porositas diklasifikasikan menjadi dua jenis yakni porositas primer dan porositas sekunder. Porositas primer yaitu porositas yang terbentuk selama proses pengendapan berlangsung. Porositas sekunder terbentuk karena proses geologi setelah pengendapan. Porositas sekunder umumnya dijumpai pada reservoir panas bumi, berupa rekahan-rekahan (*fracture*). Reservoir panas bumi umumnya mempunyai harga porositas rata-rata sekitar 5-30% (Hafsari dkk., 2017).

3.2.2 Permeabilitas

Permeabilitas merupakan ukuran kemampuan batuan untuk mengalirkan fluida. Permeabilitas menjadi parameter penting untuk menentukan kecepatan aliran fluida dalam batuan berpori dan batuan rekah alami. Satuan permeabilitas dinyatakan dalam mD (*mili Darcy*), namun dalam panas bumi sering dinyatakan dalam m^2 , dimana 1 Darcy besarnya sama dengan $10^{-12} m^2$. Batuan reservoir panas bumi umumnya mempunyai permeabilitas matriks batuan sangat kecil, dimana reservoir mempunyai permeabilitas antara 1 sampai 100 mD dan transmisivitas (hasil kali permeabilitas dan ketebalan) antara 1 sampai 100 Dm (*Darcy meter*) (Saptadji, 2002). Permeabilitas sangat penting untuk menentukan besarnya cadangan fluida yang dapat diproduksi (Nurwidyanto dkk., 2006).

Permeabilitas dibedakan menjadi permeabilitas *absolute* dan permeabilitas efektif. Permeabilitas *absolute* merupakan permeabilitas untuk fluida yang mengalir pada satu fasa (air atau uap). Sedangkan, permeabilitas efektif merupakan permeabilitas untuk fluida yang mengalir lebih dari satu fasa. Untuk reservoir panas bumi, biasanya permeabilitas vertikal sekitar 10-14 m^2 , dan permeabilitas horizontal dapat mencapai 10 kali lebih besar (Hafsari dkk., 2017).

3.2.3 Densitas

Densitas batuan (ρ) merupakan perbandingan antara berat batuan dengan volume dari batuan tersebut. Semakin besar densitas suatu batuan, maka semakin tinggi kerapatan suatu batuan (Saptadji, 2002). Tingkat densitas batuan dipengaruhi oleh jenis dan jumlah mineral penyusun batuan, porositas, serta fluida pengisi rongga. 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, 2016).

Berikut merupakan nilai variasi densitas dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah.

Tabel 3. Nilai Densitas Batuan (Telford dkk., 1990)

Jenis Batuan	Rentang Densitas (Mg/m ³)	Rata-rata (Mg/m ³)
Batuan Sedimen		
Alluvium	1,96 – 2,00	1,98
Clay	1,63 – 2,60	2,21
Gravel	1,70 – 2,40	2,00
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	2,00
Sandstone	1,61 – 2,76	2,35
Shale	1,77 – 3,20	2,40
Limestone	1,93 – 2,90	2,55
Dolomite	2,28 – 2,90	2,70
Chalk	1,53 – 2,60	2,01
Halite	2,10 – 2,60	2,22
Glacier ice	0,88 – 0,92	0,90
Batuan Beku		
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
Batuan Metamorf		
Schist	2,39 – 2,90	2,64
Gneiss	2,59 – 3,00	2,80
Phylite	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 (C_p) pada batuan adalah 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 harga sebagai berikut :

- Pada temperatur rendah : $T = 0,75-0,85$ kJ/kg°C
- Pada temperatur sedang : $T = 0,85-0,95$ kJ/kg°C

- Pada temperatur tinggi : $T = 0,95-1,10 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ (Saptadji, 2002).

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). Konduktivitas ini mengindikasikan seberapa cepat panas pada reservoir mengalir sampai ke permukaan bumi. Tinggi rendahnya nilai konduktivitas panas batuan menentukan potensi reservoir dari panas bumi sebagai energi panas bumi (Endovani dan Putra, 2016).

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 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. Dalam metode volumetrik, besarnya potensi energi sumber daya atau cadangan dapat diperkirakan berdasarkan kandungan energi panas di dalam reservoir. Kandungan energi panas di dalam reservoir merupakan jumlah keseluruhan panas yang tersimpan dalam batuan dan panas yang tersimpan dalam fluida (Habibirahman dkk., 2019).

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

3.3.1 Panas yang Tersimpan dalam Batuan

Panas yang terkandung di dalam batuan yang memiliki massa m , kapasitas panas (c) dan temperatur (T), dapat ditentukan berdasarkan persamaan dasar berikut: (Saptadji, 2002)

$$Q = m \cdot c \cdot T \quad (3)$$

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

$$m_r = V \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \quad (4)$$

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

$$m_r = A \cdot h \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \quad (5)$$

Apabila batuan mempunyai kapasitas panas C_r , maka dengan mensubstitusikan persamaan (5) ke persamaan (3) akan didapatkan persamaan yang menyatakan panas yang terkandung di dalam batuan (Q_r). Persamaan tersebut adalah:

$$Q_r = A \cdot h \cdot (1 - \phi) \cdot \rho_r \cdot C_r \cdot T \quad (6)$$

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 dasar berikut: (Saptadji, 2002)

$$Q_e = m_w u_w + m_s u_s \quad (7)$$

Apabila volume reservoir (*bulk volume*) adalah V , porositas batuan adalah ϕ , 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 berikut :

$$m_w = v \cdot \phi \cdot S_w \cdot \rho_w \quad (8)$$

$$m_s = v \cdot \phi \cdot S_s \cdot \rho_s \quad (9)$$

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

$$mw = A. h. \emptyset. Sw. \rho_w \quad (10)$$

$$ms = A. h. \emptyset. Ss. \rho_s \quad (11)$$

Apabila kedua persamaan tersebut disubstitusikan ke persamaan (7) akan diperoleh persamaan yang menyatakan panas yang terkandung di dalam uap dan air (Q_e) sebagai berikut:

$$Q_e = A. h. \emptyset. Sw. \rho_w. U_w + A. h. \emptyset. Ss. \rho_s. U_s \quad (12)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$Q_e = A. h. \emptyset. (Sw. \rho_w. U_w + Ss. \rho_s. U_s) \quad (13)$$

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

$$H_e = A. h. [(1 - \emptyset) \rho_r C_r T + \emptyset (Sw. \rho_w. U_w + Ss. \rho_s. U_s)] \quad (14)$$

Dimana :

H_e = Kandungan energi panas (kJ)

A = Luas daerah panas bumi (m^2)

h = Tebal reservoir (m)

T = Temperatur reservoir ($^{\circ}C$)

Sw = Saturasi air (fraksi)

Ss = 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 $^{\circ}C$)

ρ_r = Density batuan (kg/m^3)

ρ_w = Density air (kg/m^3)

ρ_s = Density 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 prosedur sebagai berikut:

Menghitung kandungan energi pada keadaan awal (*initial*)

$$H_{ei} = A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_i + (S_w \cdot \rho_w \cdot u_w + S_s \cdot \rho_s \cdot u_s)_i] \quad (15)$$

Menghitung kandungan energi pada keadaan akhir (*final*)

$$H_{ef} = A \cdot h \cdot [(1 - \Phi) \cdot \rho_r \cdot c_r \cdot T_f + (S_w \cdot \rho_w \cdot u_w + S_s \cdot \rho_s \cdot u_s)_f] \quad (16)$$

Menghitung energi maksimal yang dapat dimanfaatkan

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (17)$$

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

$$H_{de} = R_f \cdot H_{th} \quad (18)$$

Menghitung besarnya cadangan yang dapat dimanfaatkan dalam kurun waktu t tahun

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (19)$$

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

$$H_{le} = \frac{H_{de} \cdot \eta}{t \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \quad (20)$$

Dimana :

T_i = Temperatur reservoir pada keadaan awal (°C)

T_f = Temperatur reservoir pada keadaan akhir (energi panas bumi tidak ekonomis lagi untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik), °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_{le} = 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 (1979), Huyakorn dan Pinder (1983), persamaan aliran komponen air yang didasarkan pada kekekalan massa air dalam elemen volume, dengan hukum Darcy yang digunakan untuk aliran multifase melalui berpori sehingga didapatkan persamaan :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{K K_{rw} \rho_w}{\mu_w} [\nabla p + \rho_w g \hat{e}_z] - \nabla \cdot \frac{K K_{rs} \rho_s}{\mu_s} [\nabla p_g + \rho_s g \hat{e}_z] - q_{sf} = 0 \quad (21)$$

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 relative, μ adalah Viskositas (Pa.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 (kg/s.m^3), t adalah waktu (s), dan ∇ adalah gradien spasial (m^{-1}).

Subskrip fase w dan s masing-masing mengacu pada air dan uap. Pada zona komponen tunggal (air), $p_g = p$ dikarenakan tekanan kapiler diasumsikan 0. Sedangkan dalam zona tak jenuh dengan dua komponen (udara-air) mengacu pada persamaan 21 dengan tidak melibatkan uap. Persamaan 21 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:

$$S_w + S_g = 1 \quad (22)$$

Dimana h_r adalah entalpi spesifik dari fase padat matriks berpori (J/kg) dan ρ_r adalah Densitas dari poros-matriks fase solid (kg/m³). 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 :

$$V_p = -\frac{k k_{rp}}{\theta S_p \mu_p} [\nabla_p + \rho_p g \hat{e}_z] \quad (23)$$

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

Permukaan air didefinisikan sebagai permukaan dari tekanan atmosfer dan konfigurasinya dapat di determinasikan dari solusi tekanan. Menggunakan formula zona tersaturasi parsial mengartikan bahwa wilayah simulasi aliran dapat meluas ke permukaan tanah 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 adalah sifat turunan yang mengandung energi internal dan energi aliran. Dapat didefinisikan menjadi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1 - \phi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot K_a \nabla T + \nabla \cdot \\ \phi(S_w \rho_w h_w V_w + S_s \rho_s h_s V_s) - q_{sh} = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

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 konduktivitas 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).

Fase subskrip w dan s mengacu pada air dan uap. Persamaan 24 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 (Faust dan Mercer, 1977; Huyakorn dan Pinder, 1983).

4.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Laptop
2. *Software* Hydrotherm Interactive 2D v3.2.0
3. *Software* ArcGIS v10.8
4. *Software* Microsoft Office
5. Notepad +++
6. Data Karakteristik Batuan
7. Data DEM

4.3 Prosedur Penelitian

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

1. Studi Literatur

Pada studi literatur ini dilakukan untuk mempelajari konsep dari metode geofisika yang digunakan dalam eksplorasi panas bumi. Kemudian, Memahami kondisi geologi pada daerah penelitian, berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Kondisi geologi menjadi salah satu parameter penting dalam mengidentifikasi zona prospek panas bumi terhadap respon pengukuran data geofisika di lapangan. Selanjutnya, mempelajari sistem terbentuknya panas bumi di daerah penelitian.

2. Data Pendukung (Sekunder)

Pengolahan pemodelan simulasi numerik di lapangan panas bumi Way Ratai menggunakan data geologi yang didapat pada Peta Geologi Lembar Tanjung Karang untuk menganalisis serta menginterpretasi struktur geologi pada area ini. Karakteristik batuan yang digunakan yaitu porositas (%), permeabilitas (m^2), konduktivitas termal ($W/m K$), kalor jenis batuan ($J/kg K$), densitas batuan (g/cm^3). Nilai-nilai karakteristik batuan ini akan diinput didalam *software* Hydrotherm Interactive 2D untuk membuat batas lapisan dan karakteristik batuan dalam simulasi numerik. Kemudian, data topografi dibuat berdasarkan data DEMNAS yang menghasilkan penampang permukaan yang digunakan sebagai batas atas model simulasi.

3. Tahap Pengolahan Data

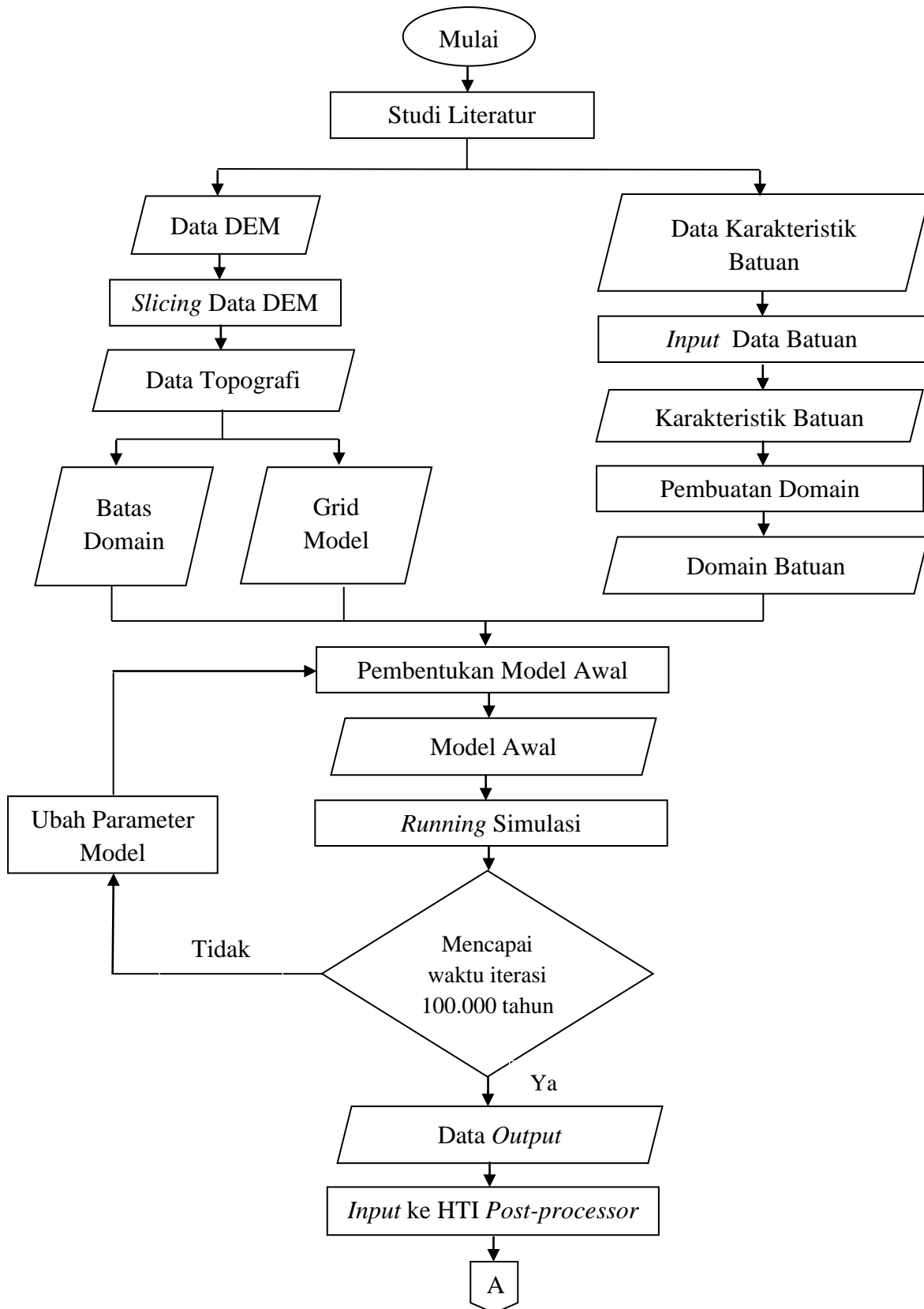
Dalam pembangunan model simulasi numerik yang dilakukan pertama adalah pembuatan domain simulasi menggunakan data topografi yang diambil dari data DEMNAS. Penampang permukaan didapatkan dari analisis *line interpolation* menggunakan *software* ArcGIS, hasil tersebut kemudian dimasukkan kedalam *software* Hydrotherm Interactive menggunakan fungsi *Load Site Map* dalam *Window Site Map* pada kolom *Active Data*. Hasil domain simulasi pada lintasan 1 penelitian ini adalah sedalam 5000 meter dengan panjang penampang 18000 meter. Pada lintasan 2 penelitian ini adalah sedalam 5000 meter dengan panjang penampang 16000 meter. Lintasan 3 sedalam 4000 meter dengan panjang penampang 16000 meter. Selanjutnya yaitu membuat batas lapisan dengan menginput nilai-nilai karakteristik batuan yaitu Permeabilitas (m^2), konduktivitas termal (W/mK), porositas (%), kalor jenis batuan ($J/g K$), dan densitas batuan (g/cm^3). 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*. 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.

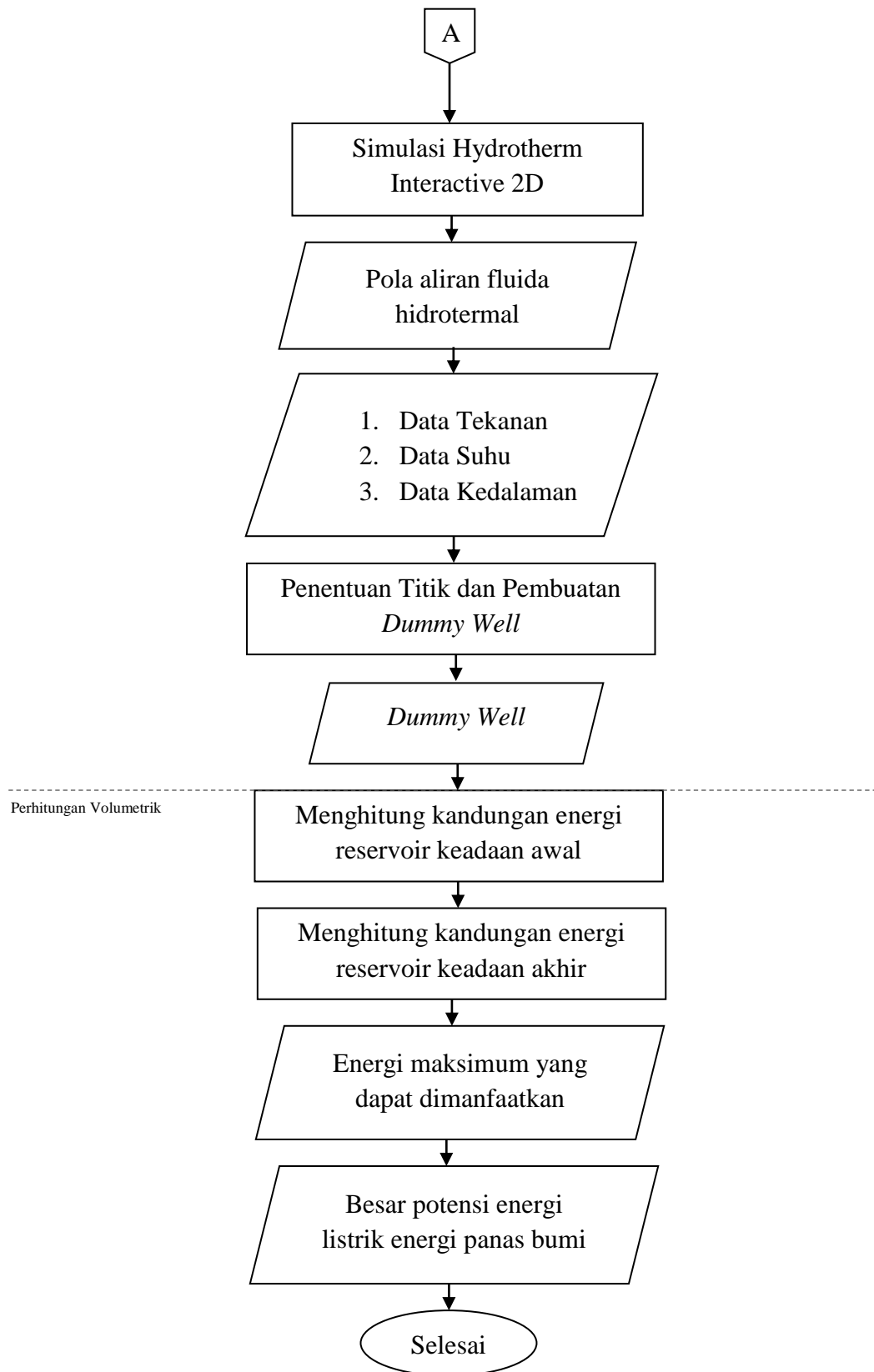
4. Interpretasi

Hasil dari *running* model lintasan, menghasilkan pola aliran fluida hidrotermal dan sebaran panas hasil simulasi numerik di daerah penelitian yang selanjutnya dikorelasikan dengan penelitian sebelumnya menggunakan metode - metode lainnya pada daerah penelitian guna didapatkan model perpindahan panas, perpindahan massa fluida air dan perpindahan massa fluida uap.

4.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut pada Gambar 5





Gambar 5. Diagram alir

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

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

1. Simulasi numerik menunjukkan model persebaran panas dan model laju aliran fluida air dan uap pada tiga lintasan di area panas bumi Way Ratai. Lintasan 1 dan 2 menunjukkan sebaran panas dan aliran fluida bergerak dari puncak Gunung Ratai berarah barat laut menuju tenggara, lintasan 3 menunjukkan pergerakan sebaran panas dan fluida dari arah barat daya menuju timur laut. Model pergerakan massa fluida uap dari 3 lintasan juga menunjukkan penyebaran yang tidak sampai kepermukaan selaras dengan kondisi di lapangan yang belum ditemukan adanya manifestasi berupa fumarola dan solfatara.
2. *Dummy well* tiga lintasan yang dihasilkan dari pemodelan 2D simulasi numerik memperlihatkan dominasi zona dua fase, yaitu uap dan air. Serta diindikasikan adanya *steam cap* yang terbentuk pada lintasan 1 di kedalaman 700 m, 1.450 m dan 1.850 m, lintasan 2 *steam cap* diindikasikan terbentuk sekitar kedalaman 600 m, 800 m dan 1.700 dan lintasan 3 pada kedalaman 850 m dan 1.200 m.
3. Hasil perhitungan dengan menggunakan metode volumetrik didapatkan cadangan energi panas bumi yang kenyataannya dapat diambil adalah $4,55 \times 10^{14}$ kJ dan besarnya potensi listrik yang dapat dibangkitkan pada periode 30 tahun sebesar 48,05 Mwe untuk 3 lintasan di area panas bumi Way Ratai.

6.2 Saran

Perlu dilakukan survei lebih lanjut untuk mendapatkan parameter – parameter pendukung yang lebih akurat dengan melakukan survei geofisika tambahan seperti melakukan survei menggunakan metode MT maupun pemboran sumur eksplorasi yang mencakup daerah prospek untuk mencapai akurasi dalam mengidentifikasi struktur geologi bawah permukaan yang mengendalikan sistem panas bumi Way Ratai.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. *Portal pencarian dan integrasi informasi geospasial melalui Ina-SDI*. Diakses pada tanggal 14 April 2022, dari <https://tanahair.indonesia.go.id>.
- Badan Standarisasi Nasional. *Angka Parameter dalam Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI. 13-6482-2000. Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- Badan Standarisasi Nasional. *Metode Estimasi Potensi Energi Panas Bumi*. SNI. 13-6171-1999. Badan Standarisasi Nasional: Jakarta.
- 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*.
- Direktorat Panas Bumi, Direktorat Jenderal EBTKE Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara, dan Panas bumi, Badan Geologi. 2017. *Potensi Panas bumi Indonesia Jilid 1*. Direktorat Panas bumi, Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral: Jakarta.
- 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*, 4(3): 103-119.
- Elvira, W. V. 2022. Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Menggunakan Metode Volumetrik dengan Pemodelan Simulasi Numerik Aliran Fluida Hidrotermal dan Perpindahan Panas pada Lapangan Panas Bumi Way Ratai, Lampung. Skripsi. Lampung: Universitas Lampung.
- 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.

- Gafoer, S., Amirudin, A. M., dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tangjungkarang, Sumatera, Skala 1 : 250.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- 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., Karyanto, dan Kuntoro, Y. 2016. Radon and Thoron Mapping To Delineate The Local-Fault In The Way Ratai Geothermal Field Lampung Indonesia. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(7): 4804– 4809.
- Hafsari., Wulandari, S., dan Rading, A. 2017. Potensi Cadangan Panas bumi dengan Metoda Volumetrik Pada Sumur Saka-1 Lapangan Panas bumi “X” Kabupaten Lembata Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 1(1): 1-8.
- Handayani, D.T. 2012. *Energi Panas bumi Sebagai Alternatif Energi Terbarukan*. Bandung. Institut Teknologi Bandung.
- Harsono, A. 1997. *Evaluasi Formasi dan Aplikasi Log*: Edisi Revisi-8. Schlumberger Oil Services: Indonesia.
- Huyakorn, P.S., dan Pinder, G.F. 1983. *Computational methods in subsurface flow*: New York, Academic Press.
- Isa, M. 2018. *Eksplorasi Energi Panas bumi*. Syiah Kuala University Press.
- Karyanto. 2003. Pencitraan Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Way Ratai Lampung dengan Metode Tahanan Jenis 2 Dimensi. *Jurnal Sains Teknologi*, 9(3): 55-59.
- Karyanto, Haerudin, N., Mulyasari, R., Suharno., dan Manurung, P. 2020. Geothermal Potential Assesment of Way Ratai Area Based on Thermal Conductivity Measurement to Measure Thermal Properties of Rocks. *Journal of the Earth and Space Physics* 45(4): 89–98.
- 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*, 25(3): 447-456.
- Karyanto, Sarkowi, M., Hidayatika, A., Ukhti, F., Haerudin, N., dan Darmawan, I.G.B. 2020. Analisis Heat Loss dan Pemetaan Sebaran Suhu Permukaan Manifestasi di Lapangan Panas bumi Way Ratai. *Prosiding SINTA 3*.

- Labo, J. 1987. *A Practical Introduction to Borehole Geophysic*. Society of Exploration Geophysicists. Tulsa.
- Loverson, A. 1954. *Geology of Petroleum*. W.H. Freeman & Company. San Fransisco. Amerika Serikat.
- Mangga, S. A., Amirudin, T., Suwarti, S., Gafoer, dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatra*. Bandung. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Nurwidyanto, M. I., Meida, Y., dan Sugeng, W. 2006. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas Pada Batu pasir. *Berkala Fisika*, 9(4): 191-195.
- Pratama, W., Rustadi, dan Haerudin, N. 2019. Aplikasi Metode Geolistrik Resistivitas Konfigurasi Wenner-Schlumberger Untuk Mengidentifikasi Litologi Batuan Bawah Permukaan dan Fluida Panas bumi Way Ratai Di Area Manifestasi Padok Di Kecamatan Padang Cermin Kabupaten Pesawaran Provinsi Lampung. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 5(1): 30-44.
- Putri, M. K., Suharno, dan Hidayatika, A. 2014. Introduction to Geothermal System of Way Ratai. *Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition*, 1-5.
- Putriyana, L. 2018. Evaluasi Cadangan Mungkin Untuk Sistem Panas bumi Vulkanik dengan Metode Volumetrik: Studi Area Kamojang dan Lahendong. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 13(3), 215-225.
- Ridha, M., dan Darminto, D. 2016. Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi dan Kedalaman. *JFA (Jurnal Fisika dan Aplikasinya)*, 12(3): 124-130.
- Saptaji, N. 2001. *Teknik Panas bumi*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Saptaji, N. 2002. *Catatan Kuliah "Teknik Panas bumi"*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Saptaji, N. 2009. *Karakterisasi Reservoir Panas bumi*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Setyawan, N., Setiawan, M. R., dan Singarimbun, A. 2019. Identifikasi Aliran Fluida Panas Bawah Permukaan di Lapangan Panas bumi Way Ratai Menggunakan Metode Self Potential. *Journal of Science and Applicative Technology*, 13(1): 1-7.
- Suryadi, Haerudin, N., Karyanto, dan Sudrajat, Y. 2019. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Lapangan Panas bumi Way Ratai Berdasarkan Data Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(1): 85-97.

- Suharno. 2010. *Pengembangan Prospek Panas bumi*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- Suharno. 2012. *Sistem Panas bumi*. Penerbit Universitas Lampung. Bandar Lampung. ISBN 978-602-7509-22-1.
- Suhartono, N. 2014. Pola Sistem Panas dan Jenis Geothermal Dalam Estimasi Cadangan Daerah Kamojang. *Jurnal Ilmiah MTG*, 5(2): 1-1.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. 1990. *Applied Geophysics*. Second Edition. London: Cambridge University Press.