ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG

(Skripsi)

Oleh

Wayan Vinna Elvira

1815051020

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022

ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG

Oleh

WAYAN VINNA ELVIRA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Geofisika

Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2022

ABSTRAK

ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG

Oleh

Wayan Vinna Elvira

Panas bumi Way Ratai merupakan daerah yang berada di Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Pada daerah panas bumi Way Ratai telah dilakukan penelitian sebelumnya mengenai analisis *heat loss* dan pemetaan sebaran suhu permukaan yang menunjukan hasil perhitungan nilai *heat l*oss total di seluruh manifestasi terukur di wilayah panas bumi Way Ratai mencapai 6414 kWe atau setara dengan 6.4 MWe. Namun hasil tersebut belum mampu menghitung volume potensi sumber daya panas bumi di Way Ratai. Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi energi panas bumi menggunakan metode volumetrik dengan pemodelan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal pada lapangan panas bumi Way Ratai. Berdasarkan hasil pemodelan simulasi numerik pada 3 lintasan dapat di interpretasi bahwa lapangan panas bumi Way Ratai adalah tipe dominasi air, dimana terdapat banyak air dari pada dua fase dan uap pada simulasi. Berdasarkan hasil *dummy well* lokasi reservoar panas bumi diperkirakan berada pada kedalaman >2000 m di bawah permukaan bumi dan diindikasikan adanya *steam cap* yang terbentuk pada lintasan 1 yaitu pada kedalaman antara 600 m -2000 m, lintasan 2 diindikasikan tidak adanya *steam cap* dan pada lintasan 3 diindikasikan adanya *steam cap* pada kedalaman 1400 m – 4400 m. Hasil estimasi energi panas bumi di lapangan Panas Bumi Way Ratai yang dihitung menggunakan metode volumetrik dengan periode waktu 30 tahun adalah sebesar 62,55 MWe. Perlu adanya data pendukung yang lebih akurat, seperti data sumur menggunakan survei lanjutan metode geofisika lainnya, seperti metode magnetotelurik yang dapat menunjukan data mengenai lapisan bawah permukaan bumi yang lebih akurat.

Kata Kunci : Numerik, Panas Bumi, Volumetrik, Way Ratai

ABSTRACT

ESTIMATION OF GEOTHERMAL ENERGY POTENTIAL USING VOLUMETRIC METHOD WITH NUMERICAL SIMULATION MODELING HYDROTERMAL FLUID FLOW AND HEAT ENERGY TRANSFER IN WAY RATAI GEOTHERMAL FIELD, LAMPUNG

By

Wayan Vinna Elvira

Way Ratai Geothermal is an area located in Padang Cermin District, Pesawaran Regency, Lampung Province. In the Way Ratai geothermal area, previous research on heat loss and surface temperature distribution mapping showed that the heatfor all measurable manifestations in the Way Ratai geothermal area reached 6414 kWe or equivalent to 6.4 MWe. However, these results have not been able to calculate the volume of potential geothermal resources in Way Ratai. Therefore, this study is intended to conduct further research on the potential of geothermal energy using the volumetric method with numerical simulation modeling of hydrothermal fluid flow in the Way Ratai geothermal field. Based on the results of numerical simulation modeling on 3 paths, it can be interpreted that the Way Ratai geothermal field is a water-dominated type, where there is more water than two phases and steam in the simulation. Based on the results of the dummy well , the location of the geothermal reservoir is estimated to be at a depth of > 2000 m below the earth's surface and indicated the presence of a steam cap formed on track 1, namely at a depth of between 600 m -2000 m, track 2 indicated the absence of a steam cap and on track 3 indicated the presence of a steam cap at a depth of 1400 m – 4400 m. The results of the estimation of geothermal energy in the Way Ratai Geothermal Field calculated using the volumetric method with a period of 30 years is 62.55 MWe. There is a need for more accurate supporting data, such as well data using a follow-up survey of other geophysical methods, such as the magnetotelluric method which can show data about layers. more accurate below the earth's surface.

Keywords : Geothermal, Numerical, Volumetric, Way Ratai

Judul Skripsi : **ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : *Wayan Vinna Elvira*

Nomor Pokok Mahasiswa : 1815051020

Program Studi : Teknik Geofisika

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing 1	Pembimbing 2
Karyanto, S.Si., M.T.	**I Gede Boy Darmawan, S.Si., M.Eng.**
NIP. 196912301998021001	NIP. 198805052019031019

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

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

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

2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 197509282001121002

Tanggal Ujian Skripsi : **24 Oktober 2022**

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, 08 November 2022

METERAI TEMPEL
C18AKX119854910

Wayan Vinna Elvira
1815051020

RIWAYAT HIDUP

WAYAN VINNA ELVIRA, dilahirkan di Lampung Tengah pada tanggal 13 April 2000. Anak pertama dari dua bersaudara pasangan dari Bapak Ketut Karnawan dan Ibu Wayan Rita. Penulis telah menempuh pendidikan akademik yang dimulai dari Taman Kanak-Kanak (TK) di TK Abadi Perkasa diselesaikan pada tahun 2006, kemudian dilanjutkan ke jenjang Sekolah Dasar (SD) di SD Abadi Perkasa diselesaikan pada tahun 2012, penulis menempuh pendidikan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Abadi Perkasa diselesaikan pada tahun 2015 dan melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Atas (SMA) di SMA Negeri 2 Metro diselesaikan pada tahun 2018.

Pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Universitas Lampung Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Geofisika melalui jalur undangan SNMPTN. Selama menjadi mahasiswa penulis turut aktif dalam beberapa organisasi kemahasiswaan. Pada tahun 2018, penulis mulai berorganisasi menjadi anggota kerohanian UKM Hindu Universitas Lampung dan anggota PC KMHDI Bandar Lampung, Penulis aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (Hima TG Bhuwana) Universitas Lampung sebagai anggota Biro Kesekretariatan Rumah Tangga pada tahun 2019-2021, kemudian penulis aktif di organisasi BEM Fakultas Teknik Universitas Lampung Sebagai staff eksternal tahun 2020. Pada tahun 2021 penulis juga turut aktif di Himpunan Mahasiswa Geofisika Indonesia sebagai staff divisi MSDM

dan Society Of Exploration Geophysicists Universitas Lampung SC (SEG Unila SC) sebagai anggota divisi eksternal. Selain aktif dalam kegiatan organisasi kemahasiswaan, penulis juga pernah menjadi asisten praktikum Metode Seismik.

Pada tahun 2021 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di jurusan Teknik Geofisika Unila dengan judul "**PEMODELAN SIMULASI NUMERIK 2D ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DI LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI**". Pada tahun 2022, Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian untuk memperoleh gelar sarjana teknik dengan judul "**ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG**".

PERSEMBAHAN

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

IBU DAN BAPAK TERCINTA

KETUT KARNAWAN

&

WAYAN RITA

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, support, semangat, dan segala dukungan yang tidak terhingga. Dimana Vinna 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 Vinna dan adek. Vinna akan selalu berusaha menjadi anak yang terbaik untuk bapak dan ibu.

ADIK TERCINTA

MADE ELVAN VIRGIA

Adik satu-satunya yang menjadi adik sekaligus teman 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.

“Mulailah hari ini dan buat akhir yang baru”
Vinna

“Berbuat baiklah tanpa perlu alasan”

KATA PENGHANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadirat Tuhan Yang Maha Esa , karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul "**ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG**". 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.

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 "**ESTIMASI POTENSI ENERGI PANAS BUMI MENGGUNAKAN METODE VOLUMETRIK DENGAN PEMODELAN SIMULASI NUMERIK ALIRAN FLUIDA HIDROTERMAL DAN PERPINDAHAN ENERGI PANAS PADA LAPANGAN PANAS BUMI WAY RATAI, LAMPUNG**" 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. Diri saya sendiri, terimakasih.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberi dukungan, motivasi, kekuatan dan senantiasa selalu mendoakan yaitu Bapak Ketut Karnawan dan Ibu Wayan Rita yang selalu menyemangati dan menyayangi dengan sepenuh hati.
3. Adik satu-satunya yaitu Made Elvan Virgia yang amat saya sayangi walaupun kadang menyebalkan yang selalu memberi semangat serta senantiasa mendoakan.
4. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. yaitu selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung dan pembimbing satu yang telah memberikan pengarahan, saran dan kesediaan bapak dalam membimbing pengerjaan skripsi ini.

5. 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 dan memberikan kritik, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Ir. Muhammad Sarkowi, S.Si., M.Si, IPU. selaku penguji yang telah meluangkan waktunya, serta senantiasa memberikan saran dan masukan.
7. Dosen-dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan.
8. Sahabat dan teman-teman terdekat yaitu Bocil, Naya, Sabi, Urmala, Mega, Juwita, Rachma, dan Reka, begitu banyak yang kalian berikan. Terimakasih sudah hadir dan bertahan. Banyak cinta untuk kalian.
9. Warga lab PPDG yang telah menjadi tempat berbagi rasa, habiskan waktu, serta banyak membantu dalam penyelesaian skripsi. Terimakasih atas warna-warna yang tercipta selama ini. Sayang kalian yang absurd.
10. Penghuni lab Mitigasi TG lama yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi, serta memberikan dukungan dan motivasi satu sama lain.
11. Keluarga Teknik Geofisika 2018 (TGasak) yang telah banyak memberikan semangat, yang menjadi tempat keluh kesah, berbagi beban bersama, menjalani dunia perkuliahan bersama dan telah memberikan dukungan selama ini. Terimakasih atas kenangan yang selama ini kita buat bersama. Kalian tidak akan terlupakan. Semoga kita semua sukses selalu.
12. Serta semua pihak yang terlibat, penulis mengucapkan terima kasih banyak.

Bandar Lampung, 08 November 2022

Penulis

Wayan Vinna Elvira
NPM. 1815051020

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK ..... **ii**

ABSTRAK ..... **iii**

PERSETUJUAN ..... **iv**

PENGESAHAN ..... **v**

PERNYATAAN ..... **vi**

RIWAYAT HIDUP ..... **vii**

PERSEMBAHAN ..... **ix**

KATA PENGHANTAR ..... **xi**

SANWACANA ..... **xii**

DAFTAR ISI ..... **xiv**

DAFTAR GAMBAR ..... **xvii**

DAFTAR TABEL ..... **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 Manifestasi Way Ratai 8
2.5 Penelitian Terdahulu 11
2.6 Geomorfologi 13
III. TEORI DASAR 14
3.1 Panas Bumi 14
3.2 Sistem Panas Bumi 15
3.3 Sifat Batuan Panas Bumi 16
3.3.1 Porositas 16
3.3.2 Permeabilitas 17
3.3.3 Densitas 17
3.3.4 Kalor Jenis 18
3.4 Metode Volumetrik 18
3.4.1 Panas yang Tersimpan dalam Batuan 19
3.4.2 Panas yang Tersimpan dalam Fluida 19
3.5 Persamaan Aliran Air Tanah 21
3.6 Persamaan Perpindahan Panas 22
3.7 Solusi Persamaan Numerik 23
3.7.1 Algoritma Newton-Raphson 23
3.7.2 Solusi Persamaan Linier 24
IV. METODE PENELITIAN 29
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian 29
4.2 Alat dan Bahan 30
4.3 Prosedur Penelitian 30
4.4 Diagram Alir 32

V. HASIL DAN PEMBAHASAN 34

5.1 Karakteristik Batuan..... 34

5.2 Pembahasan..... 36

5.2.1 Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 1 36

5.2.2 Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 2 44

5.2.3 Hasil Simulasi Hydroterm Interactive 2D Lintasan 3 52

5.2.4 Profil Suhu dan Tekanan *Dummy Well* Lintasan 1 59

5.2.5 Profil Suhu dan Tekanan *Dummy Well* Lintasan 2 62

5.2.6 Profil Suhu dan Tekanan *Dummy Well* Lintasan 3 64

5.2.7 Perhitungan Potensi Sumber Energi Panas Bumi 66

VI. KESIMPULAN DAN SARAN 72

DAFTAR PUSTAKA 73

DAFTAR GAMBAR

Gambar Halaman

1. Peta lokasi daerah penelitian (BIG, 2020) 4
2. Peta geologi daerah penelitian (Mangga dkk., 1993)..... 5
3. Peta struktur geologi regional Sumatera (Darmawan dkk., 2021)..... 7
4. Peta manifestasi panas bumi way ratai (Mangga dkk., 1993)..... 9
5. Model konseptual sistem panas bumi (Cumming dan Mackie 2010)..... 15
6. Diagram alir 33
7. Profil sayatan geologi dan parameter input final pada model simulasi numerik lintasan 1 37
8. Model sebaran panas lintasan 1 iterasi ke 1.000 – 25.000 tahun 38
9. Model sebaran panas lintasan 1 iterasi ke 50.000 tahun 39
10. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 1..... 40
11. Model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 1 . 42
12. Model aliran massa fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 1 44
13. Profil sayatan geologi dan parameter input final pada model simulasi numerik lintasan 2 44
14. Model sebaran panas pada iterasi ke 1.000-25.000 tahun lintasan 2 46
15. Model sebaran panas pada iterasi ke 50.000 tahun lintasan 2..... 47
16. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 2..... 48
17. Hasil simulasi model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1000-50.000 tahun lintasan 2 50
18. Model sebaran fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 2 51

19. Profil sayatan geologi dan parameter input final pada model simulasi numerik lintasan 3 52
20. Model sebaran panas pada tahun ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3 54
21. Model sebaran fase fluida pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3..... 55
22. Hasil simulasi model aliran massa fluida air pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3 57
23. Model sebaran fluida uap pada iterasi ke 1.000-50.000 tahun lintasan 3 59
24. Titik dummy well lintasan 1 60
25. Profil suhu dan tekanan *dummy well* lintasan 1 62
26. Titik dummy well lintasan 2 62
27. Profil suhu dan tekanan *dummy well* lintasan 2 63
28. Titik dummy well lintasan 3 64
29. Profil suhu dan tekanan *dummy well* lintasan 3 65
30. Zona potensi reservoar lintasan 1..... 66
31. Zona potensi reservoar lintasan 2..... 67
32. Zona potensi reservoar lintasan 3..... 67

DAFTAR TABEL

Tabel Halaman

1. Suhu manifestasi way ratai (Karyanto dkk., 2020) 10
2. Penelitian terdahulu.....11
3. Nilai densitas batuan sedimen (Telford dkk., 1976) 17
4. Nilai densitas batuan beku (Telford dkk., 1976).....18
5. Nilai densitas batuan metamorf (Telford dkk., 1976) 18
6. Jadwal kegiatan penelitian 29
7. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 1 34
8. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 2 35
9. Hasil karakteristik batuan penelitian lintasan 3 36
10. Parameter potensi sumber daya panas bumi lapangan way ratai 69

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi panas bumi merupakan energi terbarukan yang ramah lingkungan dimana energinya dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit tenaga listrik. Energi panas bumi menjadi sumber daya alternatif menggantikan sumber daya fosil yang semakin menipis. Indonesia sebagai wilayah yang dilalui cincin api, memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia (Alhamri dkk., 2017). Provinsi Lampung sendiri memiliki potensi panas bumi yang cukup tinggi yang tersebar di beberapa daerah, salah satunya Lapangan panas bumi Way Ratai merupakan salah satu potensi energi panas bumi yang terletak di Gunung Ratai, kabupaten Pesawaran, Lampung. Status pekerjaan yang sampai saat ini dilakukan di Way Ratai masih pada tahap eksplorasi (Haerudin dkk., 2017).

Belum meningkatnya status ini diakibatkan oleh salah satunya belum selesainya studi kelayakan untuk operasi produksi sehingga melatarbelakangi penelitian ini. Belum meningkatnya status tahapan eksplorasi di Way Ratai diakibatkan oleh salah satunya belum adanya sumur uji atau sumur eksplorasi. Salah satu tahapan dalam kegiatan eksplorasi ini adalah menentukan lokasi potensi untuk menempatkan sumur eksplorasi/uji yang ada di lapangan panas bumi (Kristensen dkk., 2016).

Penelitian sebelumnya tentang analisis *heat loss* dan pemetaan sebaran suhu permukaan di Way Ratai menunjukan Hasil perhitungan nilai *heat l*oss total di seluruh manifestasi terukur di wilayah panas bumi Way Ratai mencapai 6414 kWe atau setara dengan 6.4 MWe (Karyanto dkk., 2020). Meskipun penelitian

sebelumnya menunjukan persebaran suhu permukaan di Way Ratai, namun hasil tersebut belum mampu menghitung volume potensi sumber daya panas bumi di Way Ratai. Oleh karena itu, penelitian ini ditujukan untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi energi panas bumi menggunakan metode volumetrik dengan pemodelan simulasi numerik aliran fluida hidrotermal pada lapangan panas bumi Way Ratai.

Simulasi numerik sangat dibutuhkan untuk mendapatkan model yang tepat khususnya mekanisme aliran fluida hidrotermal dan perpindahan energi panas pada sistem panas bumi Way Ratai. Model aliran fluida hidrotermal maupun model perpindahan energi panas pada sistem panas bumi Way Ratai dimodelkan dengan menggabungkan data penelitian sebelumnya dan data *audio magnetotelurik* (AMT) di Way Ratai yang dapat digunakan untuk korelasi gambaran model panas bumi secara konseptual. Pada penelitian ini menggunakan metode numerik untuk mensimulasikan kondisi aktivitas panas bumi di lapangan Way Ratai dan sebagai tambahan untuk meningkatkan model konseptual. Metode ini menggunakan algoritma Newton-Raphson untuk sistem diferensial non linier dan *Slice Successive Over Relaxation* (SSOR) maupun *Generalized Minimum Residual* (GMRES) untuk sistem linier (Karyanto dkk., 2021).

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan simulasi aliran fluida hidrothermal dan perpindahan energi panas pada lapangan panas bumi Way Ratai menggunakan simulasi numerik.
2. Menganalisis potensi lokasi sumur eksplorasi (*well targeting*) di lapangan panas bumi Way Ratai berdasarkan model numerik.
3. Menghitung estimasi potensi sumber daya energi panas bumi di Way Ratai menggunakan metode volumetrik.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam pelaksanaan penelitian ini adalah pemodelan simulasi numerik perpindahan panas dan aliran fluida hidrotermal menggunakan *software* Hydrotherm Interactive 2D menggunakan 3 lintasan, yaitu 2 lintasan di bagian selatan Gunung Ratai dan 1 lintasan di puncak Gunung Ratai.

1.4 Manfaat Penelitian

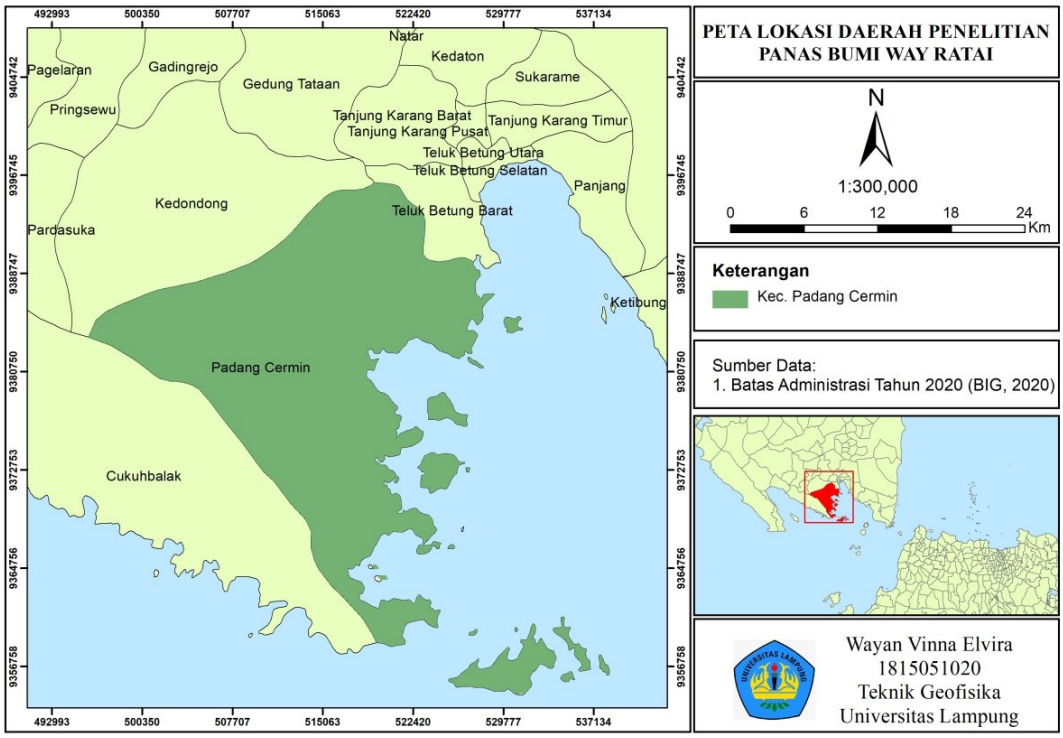
Adapun manfaat dalam pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi dan gambaran geologi serta model *steady state* 2D aliran fluida hidrotermal pada lapangan panas bumi Way Ratai.
2. Meningkatkan fokus area potensi pengeboran sumur (*well targeting*) dan area prospek panas bumi pada lapangan panas bumi Way Ratai.
3. Data pendukung dalam pengembangan daerah panas bumi Way Ratai.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lokasi Daerah Penelitian

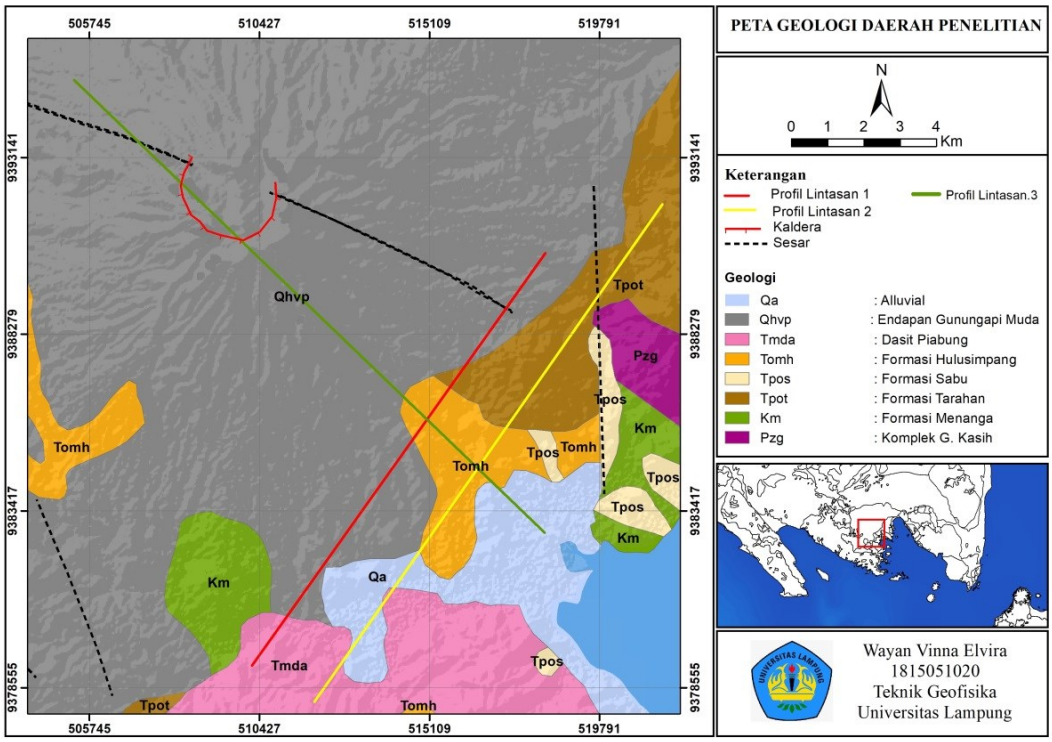
Lokasi daerah penelitian terletak pada area lapangan panas bumi Way Ratai, Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung. Adapun pada lokasi penelitian ini terletak pada koordinat 5º29’16,36” LS sampai 5º38’2,05” LS dan 105º04’1,45” BT sampai 105º13’11,3” BT. Berikut daerah penelitian ditunjukan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi daerah penelitian (BIG, 2020).

2.2 Geologi dan Stratigrafi Regional

Secara umum daerah Way Ratai, Kecamatan Padang Cermin, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung berada pada geologi regional Lembar Tanjung Karang. Berikut merupakan peta geologi regional daerah panas bumi Way Ratai, Provinsi Lampung yang ditunjukan pada Gambar 2.



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

Adapun pada peta geologi daerah penelitian di atas yaitu menggunakan lembar geologi Tanjung Karang. Dari peta geologi pada Gambar 2 terlihat lokasi penelitian memiliki formasi batuan diantaranya adalah Menanga (Km) terdiri atas perselingan serpih, dan batu lempung dengan basal, sisipan rijang dan lensa batu gamping. Komplek Gunung Kasih (Pzg) yang berisikan sekis pelitan dan sedikit gnes. Formasi Lampung (QTI) terdiri atas tuf berbatu apung, tuf riolit, tuf padu tufit, batu lempung tufan dan batupasir tufan. Alluvial (Qa) terdiri atas kerakal, kerikil, pasir, lempung dan gambut. Gunungapi Pesawaran (Qhvp) terdiri atas lava (andesit-basal), breksi dan tuff erupsi dari Gunung Pesawaran. Formasi Tarahan (Tpot) terdiri atas tuf padu, breksi dengan sisipan rijang. Dasite Piabung (Tmda) terdiri atas dasit. Formasi Hulusimpang (Tomh), terdiri atas lava andesit basal, tuf dan

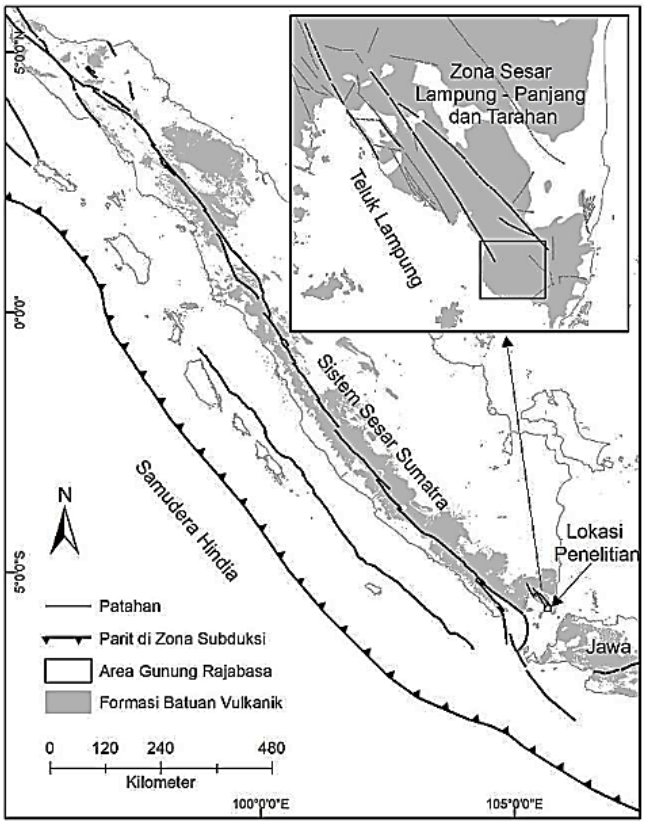
breksi gunungapi terubah dengan lensa batugamping dan Formasi Sabu (Tpos) terdiri atas perselingan antara breksi konglomeratan dengan batupasir (Mangga dkk., 1985)

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

1. Batuan Tersier. Batuan Tersier di sekitar daerah panas bumi Way Ratai dikenal sebagai batuan sedimen dari Formasi Ratai, disusun oleh konglomerat, batupasir, breksi lahar dan batulempung yang kadangkala berasosiasi dengan tuf andesit.
2. Batuan Vulkanik Pra Erupsi Gunung Betung dan Ratai. Kelompok batuan vulkanik dari yang lebih tua ke muda adalah batuan Vulkanik Gebang, Ignimbirit Gebang, Aliran Lava Gebang, Endapan Debris, dan Banjarmerger Vulkanik, dan Batuan vulkanik pra erupsi ini secara stratigrafi terletak diatas batuan sedimen Tersier.
3. Batuan Vulkanik Erupsi Gunung Betung dan Ratai. Batuan vulkanik Kuarter dierupsikan menjadi dua sumber erupsi, yaitu erupsi Gunung Betung dan Ratai di dasar Kaldera Gebang.
4. Endapan Permukaan. Adapun endapan permukaannya meliputi endapan Lahar dan endapan Aluvium (Donovan dkk., 2018)

2.3 Struktur Sesar

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



Gambar 3. Peta struktur geologi regional sumatera (Darmawan dkk., 2021)

Mekanisme pembentukan sesar normal diakibatkan oleh gaya tarik (*extention*) dan cenderung menimbulkan *open space* yang cukup lebar. Karena itu, kehadirannya dianggap penting sebab dapat menyokong tingginya permeabilitas batuan di zona reservoar panas bumi Way Ratai. Karena itu pembahasan struktur sesar adalah sangat penting, khususnya untuk struktur sesar normal berarah timur laut – barat daya, sesar normal berarah barat laut – tenggara dan kelurusan-kelurusan yang diperkirakan mempengaruhi zona prospek panas bumi di Way Ratai (Gafoer dkk., 1993).

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

1. Sesar normal berarah barat laut – tenggara

   Terutama berada di sekitar puncak, atau sedikit di utara Gunung Betung dan di sebelah selatan–tenggara kawah puncak Gunung Ratai. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal di sekitar puncak Gunung Betung tampak berbeda, yaitu

satu diantaranya memperlihatkan blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara. Kedua sesar normal barat laut – tenggara di sekitar puncak Gunung Betung ini membentuk struktur graben. Sedangkan sesar normal berarah barat laut – tenggara disekitar 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).

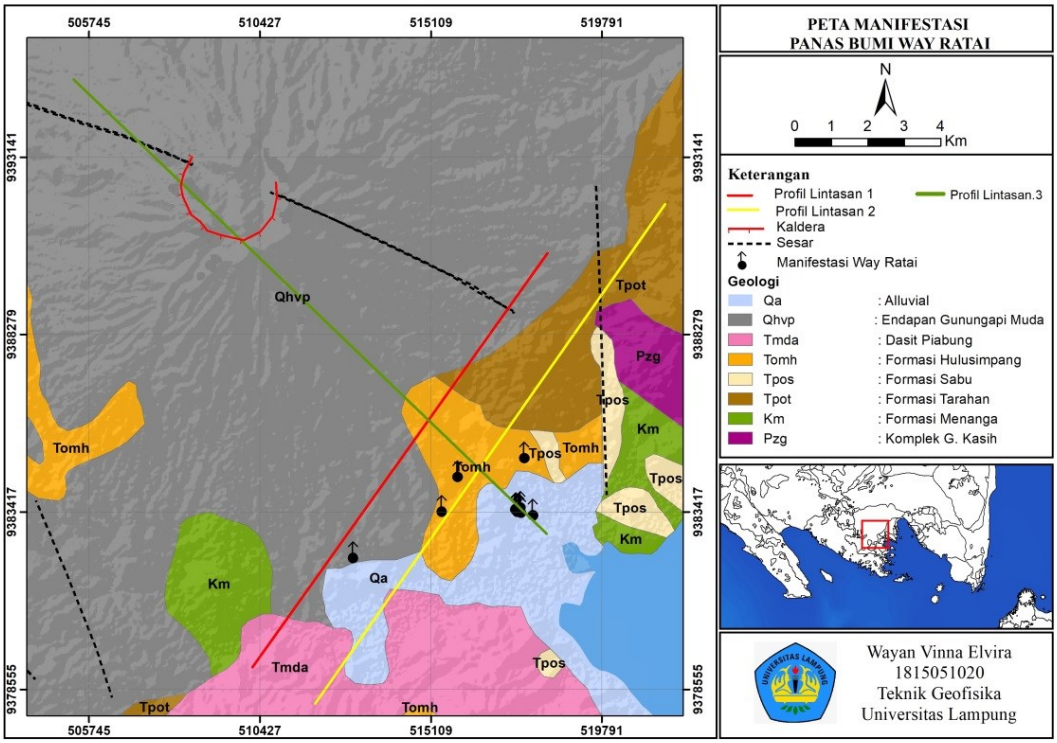
2. Sesar normal berarah timur laut – barat daya

   Terutama dicirikan oleh dua struktur sesar normal, yaitu yang pertama memotong puncak kawah Gunung Betung, sedangkan yang kedua di kaki tenggara Gunung Betung. Pergerakan relatif dari kedua sesar normal ini relatif sama, yaitu blok timur laut relatif turun terhadap blok tenggara. Kedua sesar normal timur laut – barat daya ini membentuk *step fault*. Struktur sesar normal yang berarah timur laut – barat daya lainnya tampak relatif pendek, terdapat di sisi timur, tenggara, selatan dan barat daerah penyelidikan. Pergerakan sesar normal yang kecil-kecil ini sangat beragam, 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 Manifestasi Way Ratai

Panas bumi Way Ratai memiliki banyak daerah manifestasi diantaranya manifestasi Kali Tiga, Padok, Bambu Kuning, Margodadi, dan Way Asin. 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 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 alluvium (Pratama dkk., 2019)



Gambar 4. Peta manifestasi panas bumi way ratai (Mangga dkk., 1993)

Pada mata air panas padok berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Pratama dkk., 2019) data geokimia mata air panas padok menunjukan fluida air panas bersifat klorida yang bersumber dari reservoar 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. Sumur-sumur air panas yang terdapat di permukaan mempunyai suhu yang relatif tinggi (80°C-90°C) yang berada di beberapa tempat (Karyanto, 2003).

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

No	Nama Manifestasi	Suhu Manifestasi (°C)
1	Margodadi	91.033
2	Margodadi	74
3	Margodadi	85,3
4	Margodadi	89,3
5	Margodadi	89
6	Margodadi	98,1
7	Margodadi	99,6
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
15	Margodadi	87.517
16	Margodadi	87.517
17	Margodadi	88.175
18	Margodadi	81.883
19	Margodadi	94
20	Margodadi	97,8
21	Margodadi	83,9
22	Kalitiga	89
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
31	Cangkuang Padang	72,1
32	Padang Cermin	45,9

2.5 Penelitian Terdahulu

Tabel 2. Penelitian terdahulu

No.	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
1	Darmawan dkk (2021)	Simulasi numerik membangun permeabilitas	Model permeabilitas menunjukkan adanya area impermeabel yang cukup tebal bawah Gunung Ratai. Hasil ini diinterpretasikan batuan penutup yang sangat tebal, sehingga menyebabkan belum ditemukannya manifestasi berupa fumarola maupun solfatara di Gunung Ratai saat ini.
2	Karyanto dkk (2021)	Pemodelan Numerik	Hasil simulasi yang signifikan diperoleh pada 25.000 tahun iterasi, mengidentifikasi sebagai kondisi tunak untuk sistem panas bumi Way Ratai. Hasil numerik menunjukkan bahwa reservoar panas bumi berpotensi memiliki rentang panjang kurang lebih 9 km, dengan ketebalan 0,5-1,5 km dengan suhu berkisar antara 250 – 350◦C
3	Suryadi dkk (2017)	*Audio Magnetotelluric* (AMT)	Komponen sistem panas bumi pada daerah panas bumi Way Ratai yang teridentifikasi adalah batuan penudung berada pada kedalaman 100-750 meter, reservoar berada pada kedalaman 300-1600 meter, batuan dasar berada pada kedalaman 700-3000 meter.

No.	Nama Penulis dan Tahun	Metode	Hasil
4	Putri dkk (2014)	Pemetaan geologi permukaan	Dari hasil perhitungan sampel SiO_2 untuk mencari suhu reservoar didapatkan hasil bahwa suhu reservoar geothermal Way Ratai adalah 131,8 °C, sesuai dengan zona steam loss yaitu 100 – 250 °C. Sistem geothermal way ratai didominasi oleh air maka dapat disimpulkan bahwa sistem geothermal Way Ratai termasuk dalam kategori *liquid dominated system.*
5	Donovan dkk (2018)	Metode Konduktivitas Termal	Hasil data pengukuran dengan metode konduktivitas termal pada daerah lapangan panas bumi Way Ratai berupa data k, Rt, dan T. Data konduktivitas yang terukur di lapangan panas bumi tersebut berkisar 0.056–0.664 W/Mk, nilai data resistivitas termal yang terukur berkisar 1.344–17.527 Mk/W, dan nilai suhu yang terukur berkisar 22.68–52.59°C.
6	Karyanto dkk (2020)	Analisis *heat loss* dan pemetaan sebaran suhu permukaan	Hasil perhitungan nilai heat loss total di seluruh manifestasi terukur di wilayah panas bumi Way Ratai mencapai 6414 kWe atau setara dengan 6.4MWe. Hasil ini menunjukkan pola yang cukup berbeda dengan sebaran suhu manifestasi. Suhu manifestasi tinggi didominasi oleh manifestasi Margodadi,

Way Asin dan Bambu Kuning, dan nilai *heat loss* total didominasi oleh manifestasi Padok, Kalitiga, Way Hurang dan Cangkuang.

2.6 Geomorfologi

Lapangan panas bumi Way Ratai berada di dalam lingkungan komplek gunung api yang memiliki dua kerucut gunung api berdampingan, yaitu Gunung Ratai di sebelah barat daya dan Gunung Betung di sebelah timur laut. Pembentukan bentang alam komplek gunung api yang mendasari pembentukan sistem panas bumi daerah Way Ratai dipengaruhi oleh proses endogen dan eksogen yang terjadi selama zaman Kuarter. Proses endogen berasal dari dinamika gunungapi Ratai dan Betung, serta tektonik regional yang berpengaruh di kawasan tersebut. Sementara itu, proses eksogen merupakan proses hidrosfir yang diakibatkan oleh erosi permukaan bumi. Kedua proses alam ini pada akhirnya menghasilkan suatu bentang alam berupa perbukitan dan dataran. Masing-masing bentang alam dikelompokan berdasarkan karakteristik bentang alamnya, seperti bentuk atau dimensi morfologi, kemiringan lereng, tekstur dan pola aliran sungai. Berdasarkan parameter tersebut, morfologi Way Ratai dan sekitarnya dikelompokan menjadi 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).

III. TEORI DASAR

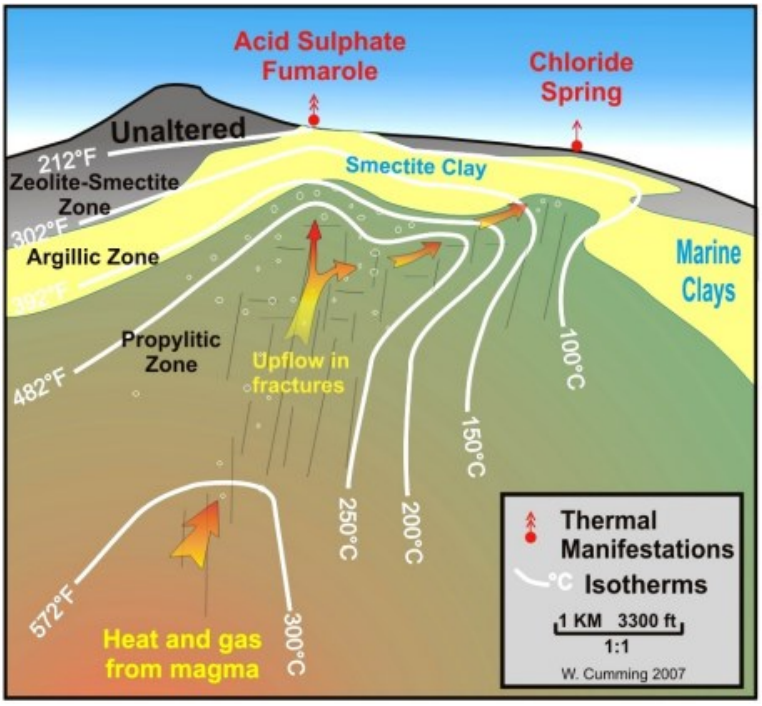
3.1 Panas Bumi

Panas bumi dapat diartikan sebagai jumlah kandungan panas yang tersimpan dalam bumi dan salah satu energi yang berkelanjutan serta ramah lingkungan. Membentuk sistem panas bumi yang telah ada sejak bumi terbentuk yang dimana energi panas bumi ini tidak dapat habis serta terjaga keseimbangannya, hal tersebut dikarenakan proses pembentukannya yang terus menerus selama kondisi lingkungannya yaitu geologi dan hidrologi (Hochstein dkk., 2000). Sumber daya panas bumi dapat dikaitkan dengan mekanisme pembentukan magma dan kegiatan vulkanisme. Sistem panas bumi dengan suhu yang tinggi, umumnya terletak di sepanjang zona vulkanik punggungan pemekaran benua, di atas zona subduksi seperti di Indonesia, dan anomali pelelehan di dalam lempeng. Batas-batas pertemuan lempeng yang bergerak merupakan pusat lokasi untuk munculnya sistem hidrotermal magma. Transfer energi panas secara konduktif pada lingkungan tektonik lempeng diperbesar oleh gerakan magma dan sirkulasi hidrotermal (Basid dkk., 2014).

Sumber daya panas bumi (*geothermal energy*) dapat ditemui di banyak tempat dimuka bumi ini. Namun daerah panas bumi yang memiliki temperatur tinggi sehingga dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tidak tersedia di banyak tempat. Ada beberapa jenis reservoir panas bumi, yaitu reservoir hidrotermal (*hydrothermal reservoir*), reservoir bertekanan tinggi (*geopressured reservoir*), reservoir batuan panas kering (*hot dry rock reservoir*), dan reservoir magma (Edwards dkk., 1982).

3.2 Sistem Panas Bumi

Gambaran mengenai sistem panas bumi di suatu daerah biasanya dibuat dengan persyaratan utama untuk pembentukan sistem panas bumi adalah sumber panas yang besar (*heat source*), reservoir untuk mengakumulasi panas, dan lapisan penudung terakumulasinya panas (*cap rock*). Dalam sistem panas bumi ini, panas dapat berpindah secara konduksi dan konveksi (Basid dkk., 2014).



Gambar 5. Model konseptual sistem panas bumi (Cumming dan Mackie 2010)

Proses pembentukan panas bumi, sama halnya dengan prinsip memanaskan air (erat hubungan dengan arus konveksi). Air yang terdapat pada teko yang dimasak di atas kompor, setelah panas, air akan berubah menjadi uap air. Hal serupa juga terjadi pada pembentukan energi panas bumi (Sumintadiredja, 2005). Air hujan (*rain water*) akan merembes ke dalam tanah melalui saluran pori-pori atau rongga-rongga di antara butir-butir batuan, sehingga air dengan leluasa menerobos turun ke batuan panas (*hot rock*). Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas (*hot rock*), akibatnya temperatur air meningkat, volume bertambah dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang terus meningkat menyebabkan air panas naik ke atas melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan di dalam permukaan. Sumber panas bumi berasal dari distribusi suhu dan energi panas di bawah permukaan bumi. Suhu

di permukaan ditentukan oleh konduksi panas melalui batuan padat dan konveksi di dalam sirkulasi fluida (Suharno, 2012).

3.3 Sifat Batuan Panasbumi

3.3.1 Porositas

Porositas (ϕ) adalah perbandingan volume rongga-rongga pori terhadap volume total seluruh batuan. Perbandingan ini biasanya dinyatakan dalam persen. Nilai porositas akan menjadi tinggi jika semua butirannya mempunyai ukuran butiran yang hampir sama dan sebaliknya akan menjadi rendah jika ukuran butirannya bervariasi sehingga butiran yang kecil akan mengisi ruang pori diantara butiran yang besar. Porositas adalah representasi dari kemampuan suatu batuan reservoar untuk menyimpan fluida. (Harsono, 1997).

Menurut (Koesoemadinata, 1980) porositas dapat dibedakan sebagai berikut yaitu; Porositas primer ialah porositas yang terjadi pada waktu pengendapan batuan, dimana besar kecilnya porositas sangat dipengaruhi oleh susunan butiran, bentuk atau kebundaran butiran, kompaksi dan juga sedimentasi. Porositas sekunder ialah porositas yang terjadi oleh adanya proses geologi setelah terjadinya pengendapan batuan, proses pembentukan porositas tersebut antara lain karena pelarutan, retakan dan rekahan

Terdapat 2 jenis porositas yang dikenal dalam teknik reservoar, yaitu porositas absolut dan porositas efektif. Porositas absolut merupakan perbandingan antara volume pori-pori total batuan terhadap volume total batuan. Secara matematis dapat dituliskan pada persamaan berikut :

$$Porositas\ absolut\ (\varphi) = \frac{(Volume\ pori-pori\ total)}{(Volume\ total\ batuan)}\ x\ 100\% \qquad (1)$$

Sedangkan porositas efektif merupakan perbandingan antara volume pori-pori yang saling berhubungan dengan volume batuan total, yang secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$Porositas\ efektif\ (\varphi e) = \frac{(Volume\ pori-pori\ berhubungan)}{(Volume\ total\ batuan)}\ x\ 100\% \qquad (2)$$

3.3.2 Permeabilitas

Permeabilitas (k) adalah kemampuan medium berpori untuk meluluskan/mengalirkan fluida. Permeabilitas sangat penting untuk menentukan besarnya cadangan fluida yang dapat diproduksikan. (Nurwidyanto dkk., 2006). Permeabilitas dibedakan menjadi Permeabilitas absolute, untuk fluida yang mengalir satu fasa (air atau uap saja) dan permeabilitas efektif, digunakan untuk fluida yang mengalir lebih dari satu fasa (Hafsari dkk., 2017). Besarnya permeabilitas batuan tidak sama ke segala arah, umumnya permeabilitas pada arah horizontal jauh lebih besar dari permeabilitasnya pada arah vertikal (Saptadji, 2002)

3.3.3 Densitas (ρ)

Densitas adalah perbandingan antara berat batuan terhadap volume. Dimana semakin besar densitas suatu batuan, maka semakin tinggi kerapatan suatu batuan. Gaya tektonik akan menyebabkan terjadinya variasi rapat massa pada batuan sedimen. Rapat massa butir pembentuknya, kandungan fluida yang mengisi pori-porinya, porositas, dan pemadatan akibat tekanan serta pelapukan yang dialami oleh batuan akan mempengaruhi besaran rapat massa batuan (densitas) (Broto, 2001). Berikut merupakan nilai variasi densitas (Telford dkk., 1976) dapat dilihat pada Tabel dibawah.

Tabel 3. 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	2,00
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
Dolomit	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

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

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Granit	Granit	Granit
Andesit	Andesit	Andesit
Syenite	Syenite	Syenite
Basalt	Basalt	Basalt
Gabro	Gabro	Gabro

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

Jenis Batuan	Rentang Densitas (g/cc)	Rata-rata (g/cc)
Gneiss	2,59-3,00	2,80
Phylite	2,68-2,80	2,74
Slate	2,70-2,90	2,79
Granulite	2,52-2,7	2,65
Amphibolite	2,90-3,04	2,96
Eclogite	3,20-3,54	3,37

3.3.4 Kalor Jenis *(Cp)*

Kalor jenis batuan adalah suatu parameter yang menyatakan banyaknya panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu satu satuan massa batuan tersebut 1°C.

Satuan dari kalor jenis adalah kJ/kg°C. Kalor jenis batuan umumnya mempunyai 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 kJ/kg°C (Saptadji, 2002)

3.4 Metode Volumetrik

Volumetrik umum digunakan untuk perhitungan sumberdaya panas bumi (*resources*), banyaknya energi panas bumi yang dapat dimanfaatkan pada kenyataannya/cadangan dan besarnya energi listrik yang dapat dihasilkannya potensi listrik tenaga panas bumi. Prinsip dasar metode volumetrik adalah menganggap reservoar panas bumi sebagai suatu bentuk kotak (box) yang volumenya dapat dihitung dengan mengalikan luas sebaran dan ketebalannya (volume). Dalam metoda volumetrik besarnya sumber daya atau cadangan diperkirakan berdasarkan kandungan energi panas di dalam reservoir. Perhitungan

dilakukan berdasarkan jumlah kandungan energi panas yang ada tersimpan dalam batuan dengan kandungan energi panas yang tersimpan dalam fluida (Suranta dkk., 2020)

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

3.4.1 Panas yang Tersimpan dalam Batuan

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

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

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

$$mr = V.(1 - \emptyset).\rho r \quad (4)$$

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

$$mr = A.h.(1 - \emptyset).\rho r \quad (5)$$

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

$$Qr = A.h.(1 - \emptyset).\rho r.Cr.T \quad (6)$$

3.4.2 Panas yang Tersimpan dalam Fluida

Energi yang terkandung di dalam air dan uap yang masing-masing mempunyai massa mw dan mw, energi dalam uw dan us, ditentukan berdasarkan persamaan dasar berikut : (Saptadji, 2002)

$$Qe = mw\ uw + ms\ Us \quad (7)$$

Apabila volume reservoar (*bulk volume*) adalah V, porositas batuan adalah $\emptyset$, saturasi air dan saturasi uap masing-masing Sw dan Ss dan densitasnya adalah ρw dan ρs maka massa air dan massa uap yang mengisi pori-pori batuan dapat dinyatakan oleh persamaan berikut :

$$mw = v.\emptyset.Sw.\rho w \quad (8)$$

$$ms = v.\emptyset.Ss.\rho s \quad (9)$$

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 (Qe) sebagai berikut:

$$Qe = A.h.\emptyset.Sw.\rho w.Uw + A.h.\emptyset.Ss.\rho s.Us \quad (12)$$

Persamaan di atas dapat dituliskan kembali sebagai berikut:

$$Qe = A.h.\emptyset.(Sw.\rho w.Uw + A.h.\emptyset.Ss.\rho s.Us) \quad (13)$$

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

$$He = A.h.[(1-\emptyset)\rho r\ Cr\ T + \emptyset\ (Sw.\rho w.Uw + Ss.\rho s.Us) \quad (14)$$

Dimana :

He = Kandungan energi panas (kJ)

A = Luas daerah panas bumi (m^2)

h = Tebal reservoir (m)

T = Temperatur reservoir (°C)

Sw = Saturasi air (fraksi)

Ss = Saturasi uap (fraksi)

Uw = Energi dalam air (kJ/kg)

Us = Energi dalam uap (kJ/kg)

$\emptyset$ = Porositas batuan reservoir (fraksi)

Cr = Kapasitas panas batuan (kJ/kg °C)

ρr = Density batuan (kg/m^3)

ρw = Density air (kg/m^3)

ρs = Density uap (kg/m^3)

3.5 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, degan hukum Darcy yang digunakan untuk aliran multifase melalui berpori sehingga didapatkan persamaan :

$$\frac{\partial}{\partial t}[\phi(\rho_w S_w + \rho_s S_s)] - \nabla \cdot \frac{\mathrm{K}\, K_{rw}\, \rho_w}{\mu_w}[\nabla \mathrm{p} + \rho_w g \hat{e}_z] - \nabla \cdot \frac{\mathrm{K}\, K_{rs}\, \rho_s}{\mu_s}\left[\nabla \mathrm{p}_g + \rho_s g \hat{e}_z\right] - q_{sf} = 0 \quad (15)$$

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 15 dengan tidak melibatkan uap. Persamaan 15 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 adapun dua komponen sehingga persamaan saturasi menjadi sebagai berikut:

$$S_w + S_s = 1 \tag{16}$$

Dimana h_r adalah entalpi spesifik dari fase padat matriks berpori (J/kg) dan ρ_r adalah Densitas dari poros-matriks fase solid (kg/m^3). Berdasarkan asumsi diatas, S_s 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 :

$$V_p = -\frac{\mathrm{k}k_{rp}}{\theta S_p \mu_p}\left[\nabla_p + \rho_p g \hat{e}_z\right] \tag{17}$$

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 tanak dan tidak perlu disesuaikan untuk menyelaraskan dengan konfigurasi permukaan air selama simulasi berlangsung.

3.6 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:

$$\frac{\partial}{\partial t}[\phi(\rho_w h_w S_w + \rho_s h_s S_s) + (1-\phi)\rho_r h_r] - \nabla \cdot K_a \mathrm{I}\nabla \mathrm{T} + \nabla \cdot \phi(S_w \rho_w h_w V_w + S_s \rho_s h_s V_s) - q_{sh} = 0 \tag{18}$$

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/m^3), K_a adalah konduktivitas termal efektif dari medium berpori (W/m^{o}C), I adalah matriks identitas orde 3 (tidak berdimensi), T adalah Temperatur (^{o}C), dan q_{sh} adalah intensitas laju aliran dari sumber entalpi (W/m^3).

Fase subskrip w dan s mengacu pada air dan uap. Persamaan 18 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) dan (Huyakorn dan Pinder, 1983).

3.7 Solusi Persamaan Numerik

3.7.1 Algoritma Newton-Raphson

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

$$f(u) = 0 \tag{19}$$

Dimana f adalah vektor nilai residual dari persamaan beda hingga nonlinier (W), u adalah Blok vektor 2x1 yang tidak diketahui (tekanan, enthalphi) dengan panjang N_a, dan N_a adalah jumlah titik aktif dalam *mesh*.

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

$$J\left(u^{(v)}\right)\left(u^{(v+1)} - u^{(v)}\right) + f(u^v) = 0 \tag{20}$$

Dengan

$$J\left(u^{(V)}\right) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial u_N} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial u_1} & \cdots & \frac{\partial f_N}{\partial u_N} \end{bmatrix}_{u=u^{(v)}} \tag{21}$$

Dan

$$u^{(v+1)} - u^{(v)} = \begin{bmatrix} u_1^{(v+1)} - u_1^{(v)} \\ \vdots \\ u_N^{(v+1)} - u_N^{(v)} \end{bmatrix} \tag{22}$$

Dimana J adalah Matriks Jacobian 2x2 dengan ukuran $N_a x N_a$ dan $U^{(v)}$ adalah vektor dari nilai tekanan dan enthaphi dalam setiap titik aktif pada iterasi v.

Sel batas dengan tekanan dan entalpi tertentu serta sel *seepage-surface* yang merembes tidak dimasukkan dalam uji konvergensi karena residunya tidak menjadi kecil saat larutan mendekati. Sebenarnya, residu mereka menentukan laju aliran melalui permukaan batas regional sel tersebut (Stoer dan Bulirsch,1993)

3.7.2 Solusi Persamaan Linier

Satu set dari persamaan newton beda hingga linierisasi Persamaan 20 diselesaikan dengan salah satu dari dua algoritma untuk persamaan linear, matriks jarang, digunakan Metode *Slice-successive-over-relaxation* (SSOR) atau metode *Generalize-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.

a. Slice-Successive-Overrelaxation Solver

Untuk metode ini, setiap titik bidang $X - Z$ atau irisan diselesaikan dengan eliminasi langsung. Satu siklus iterasi terdiri dari penyelesaian untuk setiap titik bidang menggunakan penyelesaian *band-matrix storage*. *Overrelaxation* digunakan untuk mempercepat konvergensi, dengan faktor *overrelaxation* optimal yang disediakan oleh pengguna.

Satu set dari persamaan Newton linier untuk *mesh* dengan N titik aktif membentuk blok persamaan matriks 2x2.

$$A\,u = b \tag{23}$$

Dimana *A adalah* Matriks balok 2x2 berukuran $N_a x\, N_a$, *u adalah* Matriks balok 2x1 yang tidak diketahui (Tekanan, Enthalpi), dan *b adalah* Vektor balok 2x1 sisi kanan dari persamaan perbedaan dengan panjang *N*. Setiap elemen *A* adalah 2x2 sub-matriks, dan setiap elemen *u* dan *b* terdapat dua komponen, karena terdapat dua persamaan dan dua yang tidak diketahui untuk setiap titik *node*. Metode *iterative stasioner generic* dapat ditulis sebagai:

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - B^{-1}\left[Au^{(v)} - b\right] \tag{24}$$

Dimana *B adalah* Matriks blok 2x2 berukuran $N_a\, x\, N_a$ dan *v adalah* penghitung iterasi. *B* dipilih agar mudah untuk menginversi. Untuk menyederhanakannya, mengasumsikan semua *node* aktif, jadi $N = N$. Kemudian, dalam persamaan (19) matriks *A* adalah *a* yang dibagi menjadi blok $N_y\, x\, N_y$ yang masing-masing berisi persamaan untuk satu bidang *x-z*, dimana $N_x\, x\, N\, x\, N = N$.

$$A \quad = \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{1N_y} \\ \vdots & & \vdots \\ A_{N_y 1} & \dots & A_{N_y N_y} \end{bmatrix} \tag{25}$$

$$= \begin{bmatrix} D_1 & U_{12} & & 0 \\ L_{21} & \cdot & \cdot & \\ & \cdot & \cdot & U_{N_{y-1},N_y} \\ 0 & & L_{N_y,N_{y-1}} & D_{N_y} \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$= \; D - L - U \tag{27}$$

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

Pemisah matriks diberikan oleh Persamaan 17 dimana *submatrices* renggang D_i adalah penta-diagonal dan submatrices L_{ij} dan U_{ij} berbentuk diagonal. Matriks ini berukuran N_x x N_z, dimana *node* telah dinomori dengan indeks arah x meningkat paling cepat, indeks arah z meningkat paling tinggi lalu cepat, dan indeks arah y meningkat tetapi tidak begitu cepat. Memilih

$$B = \frac{1}{\omega}\,[D - \omega L] \tag{28}$$

Dan

$$u^{(v+1)} = \omega u_{GS}^{(v+1)} + (1-\omega)u^{(v)} \tag{29}$$

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

$$u^{(v+1)} = u^{(v)} - \omega[D - \omega L]^{-1}\left[Au^{(v)} - b\right] \tag{30}$$

Dan

$$[D - \omega L]u^{(v+1)} = [(1-\omega)D + \omega U]u^{(v)} + \omega b \tag{31}$$

Dimana ω adalah faktor *over-relaxation*.

Persamaan 31 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,

$$\frac{\|u^{(v+1)} - u^{(v)}\|}{\|u^{(v+1)}\|} \leq \tau_{SOR} \tag{32}$$

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 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 23 untuk *mesh* dua dimensi. Dalam kasus tersebut tidak diperlukan iterasi (Varga, 1962).

b. *Generalized-Minimum-Residual Solver*

Metode *Generalized Minimum Residual* adalah metode *Kylov Subspace* dimana metode ini kontras terhadap SSOR yang tidak memiliki matriks iterasi stasioner, B^{-1} dalam Persamaan 24. Untuk penyederhanaannya, anggap semua titik adalah aktif menjadi $Na = N$. Lalu, persamaan matriks linier Persamaan 23 memiliki vektor residual

$$r = b - Au \tag{33}$$

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

$$K_v = span\{r_0, Ar_0, \cdots, A^{v-1}r_0\} \tag{34}$$

Dimana K_v adalah adalah *Krylov Subspace* saat iterasi v. *Krylov subspace* didasari oleh matriks A dan sekuen residual vektor r_v dari semua iterasi sebelumnya. Dimulai dari tebakan awal solusi vektor u_0, Metode GMRES mendapatkan estimasi solusi u dari

$$u_v = u_0 + Q_v Y_V \tag{35}$$

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-squar*e 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 tebakal awal untuk siklus GMRES selanjutnya (Varga, 1962).

IV. METODE PENELITIAN

4.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun Penelitian ini yaitu dilakukan di:

Tempat : Laboratorium Geofisika Geothermal, Teknik Geofisika Universitas Lampung

Alamat : Laboratorium Terpadu JTG Lt. 1 – Jl. Brojonegoro No. 1 Gedong Meneng, Rajabasa, Gedong Meneng, Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142

Tanggal : 20 Juni 2022 – 24 Oktober 2022

Tabel 6. Jadwal kegiatan penelitian

Kegiatan	Juni Minggu Ke-		Juli Minggu Ke-				Agustus Minggu Ke-				September Minggu Ke-				Oktober Minggu Ke-			
	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi Literatur																		
Pengumpulan Data																		
Pengolahan Data																		
Penyusunan Laporan dan Usul																		
Bimbingan dan Seminar Usul																		
Penyusunan Skripsi																		
Revisi dan Bimbingan Hasil																		
Seminar Hasil																		
Revisi dan Persiapan Sidang Komprehensif																		
Sidang Komprehensif																		

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.
3. *Software* ArcGIS v10.3.
4. *Software* Microsoft Office
5. Notepad
6. Data Karakteristik Batuan
7. Data Topografi

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. Serta, 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 dan Kota Agung untuk menganalisis serta menginterpretasi struktur geologi pada area ini. Karakteristik batuan yang digunakan yaitu porositas (%), permeabilitas (m2), 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 yang digunakan untuk membuat batas lapisan dan karakteristik batuan dalam simulasi numerik. Kemudian, data topografi dibuat berdasarkan data DEMNAS yang menghasilkan penampang ketinggian.yang dibuat untuk batas atas model simulasi. Serta, kajian geokimia yang bertujuan

untuk mendukung pembuatan model konseptual seperti penentuan titik lokasi *upflow*, estimasi temperatur reservoir dengan *geothermometer*, dan daerah yang memiliki permeabilitas tinggi.

3. Tahap Pengolahan Data

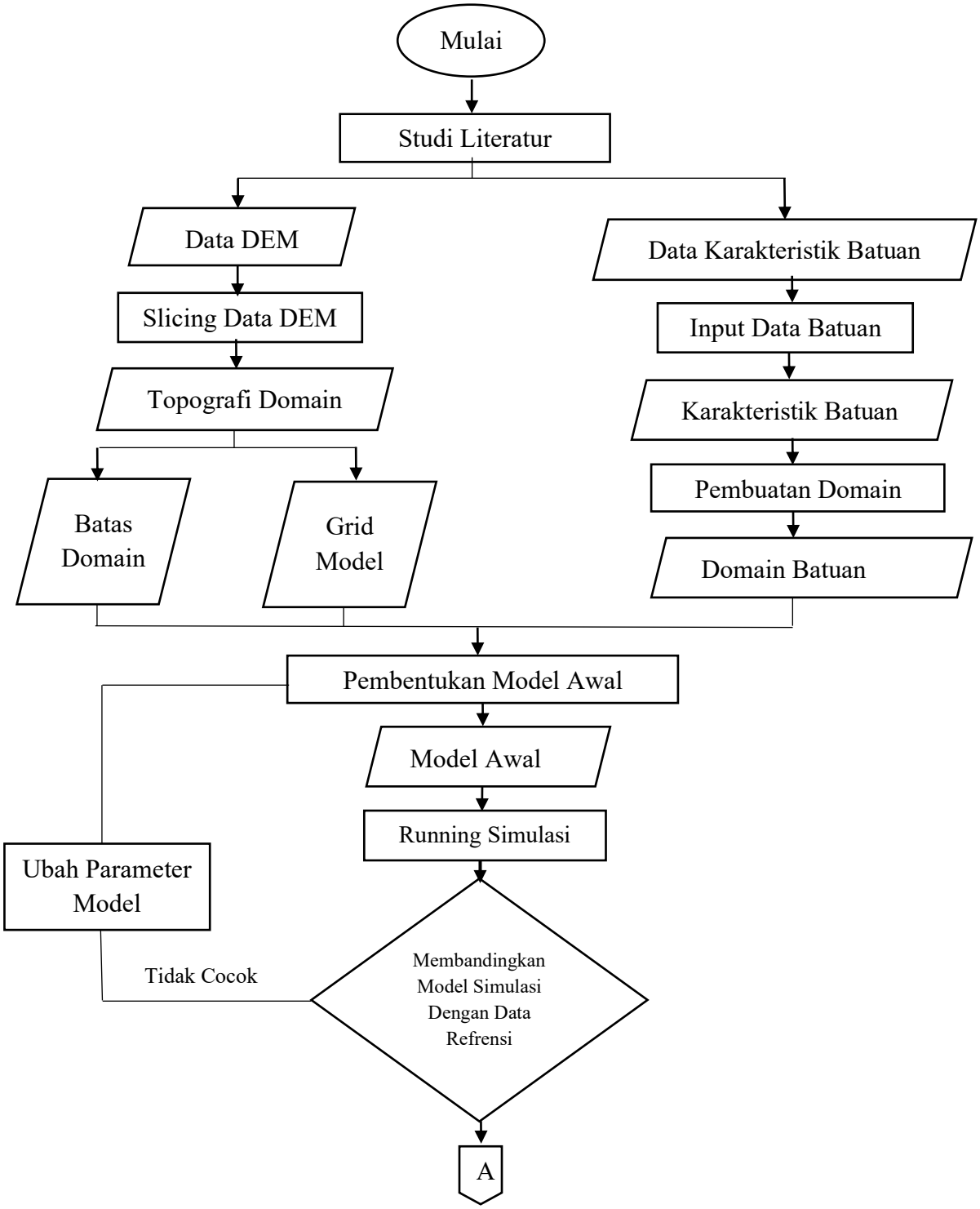
   Dalam pembangunan model simulasi numerik yang dilakukan pertama adalah pembuatan domain simulasi. Dimana, untuk membuat domain simulasi ini menggunakan data topografi yang dibuat berdasarkan data DEMNAS. Data topografi menghasilkan penampang ketinggian yang digunakan untuk membuat bagian batas atas model simulasi. Penampang ketinggian didapatkan menggunakan *software* arcGIS dari *analisis line interpolation*, dari hasil penampang ketinggian dimasukan kedalam *software* Hydrotherm Interactive pada *window Site Map* pada kolom *Active Data* dengan menggunakan fungsi *Load Site Map.* Hasil domain simulasi pada lintasan 1 penelitian ini adalah sedalam 5000 meter dengan panjang penampang 16000 meter. Pada lintasan 2 penelitian ini adalah sedalam 4500 meter dengan panjang penampang 14000 meter. Lintasan 3 sedalam 5000 meter dengan panjang penampang 19000 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 dimasukan dalam jendela *Rock Properties* pada kolom *Active Data* pada *Rock Units*. Setelah memasukan semua parameter dan nilai karakteristik batuan, dilakukan pembuatan wilayah batuan menggunakan fungsi *Add Polygone Zone*.

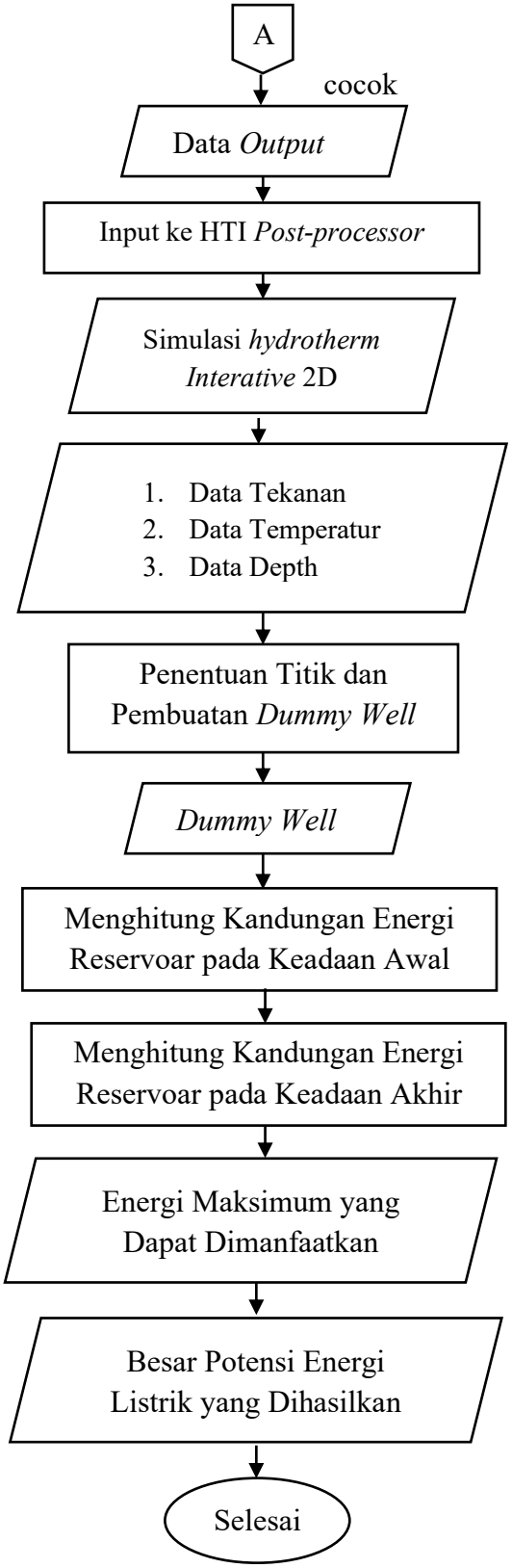
4. Interpretasi

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

4.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir pada penelitian ini adalah sebagai berikut pada Gambar 6





Gambar 6. Diagram alir penelitian

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi numerik pada lintasan 1 dan lintasan 2 menunjukan pergerakan aliran panas dan fluida yang mengalir dari arah barat ke timur Laut. Pada lintasan 3 pergerakan aliran fluida dan panas mengalir dari puncak gunung ratai menuju Tenggara. Hasil pemodelan simulasi numerik pada 3 lintasan dapat di interpretasi bahwa lapangan panas bumi Way Ratai adalah tipe dominasi air, dimana terdapat banyak air dari pada dua fase dan uap pada simulasi.
2. Berdasarkan hasil *dummy well* lokasi reservoar panas bumi diperkirakan berada pada kedalaman >2000 m di bawah permukaan bumi yang diukur di atas permukaan dan diindikasikan adanya *steam cap* yang terbentuk pada lintasan 1 yaitu pada kedalaman antara 600 m -2000 m, lintasan 2 diindikasikan tidak adanya *steam cap* dan pada lintasan 3 diindikasikan adanya *steam cap* pada kedalaman 1400 m – 4400 m.
3. Hasil estimasi energi panas bumi di lapangan Panas Bumi Way Ratai yang dihitung menggunakan metode volumetrik dengan periode waktu 30 tahun adalah sebesar 62,55 MWe.

6.2 Saran

Perlu adanya data pendukung yang lebih akurat, seperti data sumur menggunakan survei lanjutan metode geofisika lainnya, seperti metode MT yang dapat menunjukan data mengenai lapisan bawah permukaan bumi yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Alhamri, R.Z., dan Dianta, A.F. 2017. Model Simulasi Sistem Dinamik Estimasi Potensi Energi Panas Bumi Metode Volumetrik Studi Kasus Gunung X. *Jurnal Informatika & Multimedia*, 9(1).

Badan Informasi Geospasial. 2020. *Portal pencarian dan integrasi informasi geospasial melalui Ina-SDI*. Diakses pada tanggal 06 Maret 2022, dari https://tanahair.indonesia.go.id.

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).

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 Reservoar Panas Bumi Berdasarkan Analisis Fault Fracture Density Citra Digital Elevation Model Alos Palsar Di Gunung Rajabasa. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 16(2):119-131.

Darmawan, I. G. B., Hidayatika, A., Sarkowi, M., dan Karyanto. 2021. Pemanfaatan Simulasi Numerik Sebagai Studi Pendahuluan Untuk Membangun Model Permeabilitas Zona Potensi Reservoar Panas Bumi. *Prosiding SINTA 4.*

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).

Edwards, L.M., Chilingar, G.V., Rieke, H.H., dan Fertl, W. H. 1982. *Handbook of Geothermal Energy*. Gulf. Houston 1-21.

Faust, C.R., dan Mercer, J.W. 1977. *Finite-difference model of two-dimensional, single- and two-phase heat transport in a porous medium-version I*: U.S. Geological Survey Open-File Report 77−234, 84 p.

Gafoer, S., Amirudin, A. M., dan Sidarto. 1993. *Peta Geologi Lembar Tangjungkarang, Sumatera, Skala 1 : 250.000.* Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Giggenbach, W. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochemica et Cosmochimica Acta*.Vol. 52, p. 27: 49-2765

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).

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).

Hochstein, M. P., dan Browne, P. R. L. 2000. *Surface Manifestation of Geothermal System with Volcanic Heat Source*. Roma: Academic Press.

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, 473 p.

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., 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.*

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.

Koesoemadinata, R.P. 1978. *Geologi Minyak Bumi*. Bandung. Penerbit ITB.

Kristensen, L., Hjuler, M. L., Frykman, P., Olivarius, M., Weibel, R., Nielsen, L. H., dan Mathiesen, A. 2016. Pre-drilling assessments of average porosity and permeability in the geothermal reservoirs of the Danish area. *Geothermal Energy*, *4*.

Mangga, SA., Amirudin, T., Suwarti, S., Gafoer dan Sidarto.1993. *Peta Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatra*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

Nurwidyanto., Irham, M., Meida, Y., dan Sugeng, W. 2006. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas Dan Permeabilitas Pada Batu pasir. *Berkala Fisika*, 9(4).

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.

Saptadji, N. 2002. *Catatan Kuliah "Teknik Panas bumi"*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.

Saptaji, N. 2009. *Karakterisasi Reservoir Panas Bumi.* Institut Teknologi Bandung. Bandung.

Stoer, J., dan Bulirsch, R. 1993. *Introduction to numerical analysis*, (2d ed.) New York : Springer-Verlag, 660 p.

Suryadi., Herudin, N., Karyanto., dan Sudrajat, Y. 2017. Identifikasi Struktur Bawah Permukaan Lapangan Panas Bumi Way Ratai Berdasarkan Data Audio Magnetotelluric (AMT). *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 3(1).

Sumintadiredja, P. 2005, *Vulkanologi dan Geothermal, Teknik Geologi*, ITB. Bandung.

Suranta, B.Y., Wenov, V.S., Sofyan, A., dan Aka, H.S. 2020. Estimasi Potensi Sumber Daya Panas bumi Menggunakan Metode Volumetrik Di Lapangan Patuha. *Indonesian Journal of Energy*.

Suharno. 2010. *Pengembangan Prospek Panasbumi.* Bandar lampung: Universitas Lampung.

Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sherrif, R. E. 1976. *Applied Geophysics*. USA: Cambridge University.

Varga, R.S. 1962. *Matrix iterative analysis*: Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 322 p.