

**PRE-FEASIBILITY STUDI UNTUK MEDIUM ENTALPI,  
STUDI KASUS: LAPANGAN PANAS BUMI DANAU RANAU**

**PROPOSAL TESIS**

**Oleh:  
GLADIEZ FLORISTA RERA  
NIM: 22618010  
(Program Studi Magister Teknik Geotermal)**



**INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG  
Desember 2019**

## ABSTRAK

### PRE-FEASIBILITY STUDI UNTUK MEDIUM ENTALPI, STUDI KASUS: LAPANGAN PANAS BUMI DANAU RANAU

Oleh:

**Gladiez Florista Rera**

**NIM: 22618010**

**(Program Studi Magister Teknik Geotermal)**

Lapangan panas bumi Danau Ranau merupakan salah satu dari 166 lapangan panas bumi bertemperatur sedang (*medium enthalpy*) yang dimiliki oleh Indonesia. Dalam tahapan pengembangannya, lapangan ini telah dilakukan kajian 3G (Geologi, Geokimia dan Geofisika). Sebagai bentuk pengendalian terhadap risiko pengembangan, sebelum dilakukan tahapan berikutnya, perlu dilakukan tahapan pra kajian kelayakan. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan seberapa feasible lapangan panas bumi Danau Ranau dengan karakteristik medium enthalpy dikembangkan baik dari sisi pemanfaatan langsung maupun tidak langsung dengan melihat keberterimaan dari kajian teknis, finansial, lingkungan dan risiko, sehingga PT PLN sebagai pengembang dapat memutuskan apakah akan lanjut atau tidak melakukan tahapan pengembangan berikutnya yaitu pemboran sumur eksplorasi. Melalui pendekatan holistic dan beberapa kajian, peneliti mengambil *key points lesson learned* dari studi literatur yang kemudian dijadikan dasar perancangan pola perusahaan. Hasil model perusahaan lapangan penelitian Danau Ranau dengan model kaskade mempunyai peluang perusahaan yang optimum baik dari sisi operasional maupun finansial. Pola perusahaan bertingkat dirancang dengan berbagai level. Level 1 digunakan untuk kelistrikan menggunakan teknologi konversi sistem biner (ORC) dan level berikutnya digunakan untuk pemanfaatan langsung dengan dasar *Lindal Diagram* yang juga memperhatikan pendekatan pemberdayaan masyarakat sekitar. Dari sisi ekonomi, sistem kaskade akan menghasilkan nilai profitabilitas yang optimum, baik untuk nilai NPV, IRR, maupun ROI di sisi pengembang.

**Kata kunci:** medium entalpi, model kaskade, perusahaan langsung dan tidak langsung, ORC, NPV, IRR, ROI

## **ABSTRACT**

### **PRE-FEASIBILITY STUDI FOR MEDIUM ENTHALPY, CASE STUDI: DANAU RANAU GEOTHERMAL FIELD**

By:  
**Gladiez Florista Rera**  
**NIM: 22618010**  
*(Magister Program in Geothermal Engineering)*

*Danau Ranau geothermal field is one of the 166 medium enthalpy geothermal fields owned by Indonesia. In the development phase, this field has been carried out 3G studies (Geology, Geochemistry and Geophysics). As a form of control over development risk, before the next stage is taken, a pre-feasibility study stage needs to be done. This research was conducted to determine how feasible the Danau Ranau geothermal field with the characteristics of the medium enthalpy was developed both in terms of direct and indirect utilization by looking at the acceptance of technical, financial, environmental and risk studies, so PT PLN as a developer can decide whether to proceed or not carry out the next stage of development, namely exploration well drilling. By the holistic approaches and some analysis, researcher take some key points lesson learned from literature study and make those as development basic model. The result development of cascade model by levelling utility of energy for Danau Ranau Geothermal Field, shows optimal value both in operational sides and financial sides. Technically, first level designed for electricity with ORC conversion technology, and the cascade level for indirect use approaching by Lindal Diagram and community empowerment in economic and social. In financial analysis, the cascade model has optimum profitability value shows in NPV, IRR and ROI.*

**Keywords:** *medium enthalpy, cascade model, direct use, indirect use, ORC, NPV, IRR, ROI*

**PRE-FEASIBILITY STUDI UNTUK MEDIUM ENTALPI,  
STUDI KASUS: LAPANGAN PANAS BUMI DANAU RANAU**

Oleh:  
**Gladiez Florista Rera**  
**NIM: 22618010**  
**(Program Studi Magister Teknik Geotermal)**

Institut Teknologi Bandung

Menyetujui  
Tim Pembimbing

Tanggal 25 November 2019

Pembimbing 1,

---

(Ir. Nenny Miryani Saptadji Ph.D)

Pembimbing II,

Pembimbing III,

---

(Heru Berian Pratama, S.T., M.T)

---

(Dr.rer.nat Yodha Yudhistra N)

## KATA PENGANTAR

Puji syukur alhamdulillah terpanjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya serta hidayah-Nya sehingga proposal tesis *Pre-Feasibility* Studi Untuk Medium Entalpi, Studi Kasus: Lapangan Panas Bumi Danau Ranau dapat terselesaikan. Sholawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW beserta keluarga dan para sahabatnya hingga pada umatnya sampai akhir zaman.

Proposal tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan di Jurusan Teknik Panas Bumi Institut Teknologi Bandung, dan dalam proses penyusunan proposal ini, penulis mendapatkan banyak sekali bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak, sehingga dalam kesempatan ini penulis juga bermaksud menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Ir. Sutopo, M. Eng selaku Ketua Jurusan Panas Bumi Institut Teknologi Bandung
2. Ir. Nenny Miryani Saptadji Ph.D selaku Pembimbing I yang selalu memberi bimbingan, masukan dan waktunya untuk membimbing penulis.
3. Heru Berian Pratama, S.T., M.T selaku Pembimbing II yang selalu memberi bimbingan, masukan dan waktunya untuk membimbing penulis.
4. Dr.rer.nat Yodha Yudhistra N selaku pembimbing lapangan yang memberikan kemudahan dalam akses data dan waktu untuk berdiskusi
5. Serta pihak-pihak lain yang tidak mungkin penulis sebutkan satu-persatu.

Semoga Allah SWT memberi balasan yang setimpal kepada semuanya.

Penulis berharap proposal yang telah disusun ini bisa memberikan sumbangsih untuk menambah pengetahuan para pembaca, dan akhir kata, dalam rangka perbaikan selanjutnya, penulis akan terbuka terhadap saran dan masukan dari semua pihak karena penulis menyadari skripsi yang telah disusun ini memiliki banyak sekali kekurangan.

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vii
<b>DAFTAR SINGKATAN</b> .....	viii
<b>Bab I Pendahuluan</b> .....	1
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	4
I.3 Tujuan Penelitian .....	4
I.4 Batasan Masalah .....	5
I.5 Metodologi Penelitian .....	5
I.6 Hipotesis .....	7
<b>Bab II Tinjauan Lapangan Penelitian</b> .....	8
II.1 Informasi Regional .....	8
II.2 Rona Awal .....	8
II.3 Kondisi Kelistrikan Regional .....	11
II.4 Kajian Geologi .....	12
II.5 Kajian Geokimia .....	13
II.6 Kajian Geofisika .....	15
II.7 Model Konseptual .....	16
II.8 Potensi Panas Bumi .....	20
<b>Bab III Tinjauan Pustaka</b> .....	23
III.1 Lapangan Panas Bumi: <i>Medium Enthalpy</i> .....	23
III.2 Pengusahaan Panas Bumi Langsung (Direct Use) .....	24
III.2.1 Definisi dan Keuntungan Sistem Kaskade .....	25
III.2.2 Karakteristik Sistem Kaskade .....	26
III.2.3 Pemanfaatan Integrasi dan Sistem Hibrid .....	28
III.2.4 Kelebihan dan Kekurangan Sistem Kaskade .....	28
III.3 Pengusahaan Panas Bumi Tidak Langsung (In-direct Use) .....	29
III.3.1 Sistem Biner .....	30
<b>Bab IV Metodologi Penelitian</b> .....	40
IV.1 Studi Literatur .....	40
IV.2 Penentuan Lapangan Penelitian .....	40
IV.3 Pengumpulan Data Lapangan .....	41
IV.4 Perhitungan Potensi Lapangan Panas Bumi .....	42
IV.5 Perancangan Pengusahaan Lapangan .....	42
IV.6 Perancangan Kajian Aspek dan Dampak Lingkungan .....	43
IV.7 Perancangan Kajian Risiko Pengusahaan .....	43
IV.8 Perancangan Kajian Keekonomian Proyek .....	43
IV.9 Pembuatan Analisa Sensitivitas .....	44
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	45

## DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Status Lahan WKP Danau Ranau.....	9
Gambar II. 2 Objek Wisata Kolam Air Panas Danau Ranau.....	11
Gambar II. 3 Komposisi Sumber Daya Listrik.....	11
Gambar II. 4 Komposisi Sumber Daya Listrik.....	12
Gambar II. 5 Penjualan Energi Listrik Provinsi Sumatera Selatan.....	12
Gambar II. 6 Model Konseptual Kajian Geokimia.....	15
Gambar II. 7 Daerah Prospek Danau Ranau.....	19
Gambar II. 8 Fitur Geothermal Danau Ranau dan Sebaran Manifestasi.....	19
Gambar II. 9 Model konseptual Danau Ranau.....	20
Gambar II. 10 Distribusi Hasil Simulasi Monte Carlo.....	22
Gambar III. 1 Diagram Konsep Pemanfaatan Kaskade Energi Panas Bumi.....	25
Gambar III. 2 Skema diagram pembangkit listrik sistem siklus biner.....	31
Gambar III. 3 Diagram T-s dan Diagram P-h sistem ORC sederhana.....	32
Gambar III. 4 <i>Temperatur-heat transfer</i> diagram untuk <i>pre-heater</i> dan <i>evaporator</i> . .....	36
Gambar IV. 1 Flow Chart Metodologi Penelitian.....	41

## DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Parameter Input Simulasi Monte Carlo .....	21
--	----



## DAFTAR SINGKATAN

BPP	: Biaya Pokok Produksi
BPS	: Badan Pusat Statistik
CNG	: <i>Compact Natural Gas</i>
COD	: <i>Commissioning on Date</i>
HSD	: <i>High Speed Diesel</i>
IPPKH	: Izin Pinjam Pakai Kawasan Hutan
IRR	: <i>Internal Rate Return</i>
KPHL	: Kesatuan Pengelolaan Hutan Lindung
MW	: <i>Mega Watt</i>
NPV	: <i>Net Present Value</i>
ORC	: <i>Organic Rankine Cycle</i>
PLTP	: Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi
PT PLN	: Perusahaan Listrik Negara
P10	: Probabilitas dengan eror 10%
P50	: Probabilitas dengan eror 50%
P90	: Probabilitas dengan eror 90%
ROI	: <i>Return on Investment</i>
RUPTL	: Rencana Usaha Penyelenggaran Tenaga Listrik
SNI	: Standar Nasional Indonesia
Ti	: <i>Temparature Intial</i>
Tf	: <i>Temperature Final</i>
WKP	: Wilayah Kerja Panas Bumi
3G	: Geologi, Geokimia dan Geofisika

# Bab I Pendahuluan

## I.1 Latar Belakang

Sebagai negara yang terletak di pertemuan dua lempeng benua, tidak heran jika Indonesia memiliki sumber energi panas bumi yang melimpah. Indonesia memiliki hampir seluruh tipe panas bumi berdasarkan rentang temperatur reservoirnya, yaitu *high enthalpy* dengan rentang temperatur reservoir  $>225^{\circ}\text{C}$ , *medium enthalpy* dengan rentang temperatur reservoir  $125\text{-}225^{\circ}\text{C}$ , hingga *low enthalpy* dengan rentang temperatur  $<125^{\circ}\text{C}$  (Hochstein, 2000). Total lokasi potensi panas bumi yang telah ditemukan sebanyak 331 lapangan, dengan 166 lapangan merupakan daerah panas bumi bertemperatur sedang (*medium enthalpy*) dan 80 lapangan panas bumi bertemperatur rendah (*low enthalpy*). Saat ini, pengembangan energi panas bumi hingga menjadi PLTP di Indonesia masih terfokus pada daerah yang mempunyai temperatur tinggi, belum banyak pengembang yang tertarik pada lapangan panas bumi *medium* maupun *low enthalpy*, padahal lebih dari 50% lapangan panas bumi yang telah diidentifikasi adalah berkarakteristik *low to medium enthalpy*. Berbagai hal melatarbelakangi lambatnya progress pengusahaan lapangan panas bumi karakteristik *medium* maupun *low enthalpy*, antara lain kesulitan dalam pemilihan teknologi konversi dan keberterimaan risiko finansial dalam kurun waktu tahapan eksplorasi, eksploitasi sampai dengan pemanfaatan.

Salah satu pengembangan *medium enthalpy* yang dapat dijadikan contoh adalah pengembangan lapangan panas bumi *medium enthalpy* di Iceland. Iceland adalah negara yang minim kepemilikan sumber daya bumi, dominasi sumber daya yang terdapat di Iceland adalah panas bumi. Tidak heran hal ini mendorong Iceland untuk memanfaatkan sebaik baiknya potensi panas bumi yang dimiliki untuk pemenuhan kebutuhan energi negaranya. Iceland telah menjadi salah satu negara terkemuka dalam penggunaan energi panas bumi, baik untuk pembangkit listrik dan aplikasi pemanas. Tetapi yang kurang diketahui tidak semua pemanfaatan sumber daya panas bumi di negara ini didasarkan pada sumber daya entalpi tinggi bersuhu tinggi. Sumber daya panas yang lebih rendah di seluruh negeri digunakan untuk memanaskan rumah, kolam renang, dan berbagai keperluan lainnya.

Pengembangan sumber daya *medium enthalpy* di Iceland untuk membangkitkan listrik cenderung lambat (Sveinbjörnsson, 2016). Hal ini didasari adanya kesulitan pengaplikasian teknologi konversi yang tepat sehingga menghasilkan kelayakan pengembangan yang kecil. Teknologi konversi yang umum diaplikasikan pada lapangan panas bumi medium enthalpy di Iceland adalah *Rankine system* seperti yang telah diaplikasikan pada lapangan panas bumi Húsavík (Sveinbjörnsson, 2016). *Rankine System* dalam menghasilkan listrik menggunakan fluida kerja sekunder yang mempunyai titik didih lebih rendah daripada air sebagai fluida geothermal (Sveinbjörnsson, 2016).

Sebuah penelitian baru-baru ini menunjukkan bahwa untuk suhu sumber daya panas bumi sedang, ORC yang terintegrasi dalam sistem tenaga energi terbarukan hibrida adalah pendekatan yang paling efektif untuk mengurangi biaya pembangkit listrik, meningkatkan efisiensi pabrik dan memperpanjang umur reservoir (Rubio-Maya et al., 2015). Iceland memiliki 37 lapangan panas bumi *medium enthalpy* yang mana didalamnya telah terdapat 289 sumur, dengan 193 sumur mempunyai temperatur reservoir diatas 90°C, dengan potensi membangkitkan listrik sebesar 132 MWth atau 7.4 MWe (Sveinbjörnsson, 2016). Salah satu pemanfaatan pembangunan pembangkit listrik lokal *medium enthalpy* adalah memastikan listrik dapat mensuplai sistem pemanas distrik sehingga menguatkan sistem pemanas dan terhindar dari kerentanan sistem transmisi listrik akibat bencana alam seperti gempa (Sveinbjörnsson, 2016).

Selain pemanfaatan sebagai pembangkit tenaga listrik, lapangan panas bumi medium enthalpy telah banyak dimanfaatkan secara langsung. Sebagai contoh, di Cina pemanfaatan langsung dengan metode kaskade dianggap sebagai cara yang efektif, rasional dan berkelanjutan untuk menggunakan sumber daya panas bumi, seperti pada lapangan panas bumi di provinsi Tianjin, Qinhuangdao and Hengshui. Pemanfaatan langsung sumber daya panas bumi diterapkan untuk *radiant heating*, *plate Heat exchangers*, *heat pumps* untuk sistem pemanas dan lain sebagainya (Rubio-Maya et al., 2015), Pemanfaatan kaskade lain sesuai dengan pembangkit listrik penggabungan dengan proses di ladang minyak yaitu dengan

menggabungkan sistem produksi daya suhu medium melalui ORC yang berinteraksi dengan pasokan panas yang diarahkan ke dua proses minyak (Rubio-Maya et al., 2015). Selain Cina, Thailand merupakan salah satu negara yang juga mengaplikasikan metode cascade. Di Thailand EGAT (Otoritas Pembangkit Listrik Thailand) telah menginstal PLTP siklus biner 300 kWe dan telah mempertimbangkan untuk menggunakan sisa panas untuk proses dehidrasi cabai dan bawang putih. Suhu sumber daya panas bumi yang memasuki siklus adalah 116°C dan air panas bumi meninggalkan siklus biner pada suhu 80°C untuk bersirkulasi melalui penukar panas yang dipasang di kabin dehidrasi. Kapasitas netto PLTP bervariasi sesuai dengan musim yaitu antara 150-250 kWe (rata-rata 175 kWe) menghasilkan 1,2 GWh per tahun. Dalam proyek ini penggunaan energi panas bumi lainnya dianggap untuk mengeringkan produk pertanian dan juga untuk spa. Secara kajian ekonomi menunjukkan bahwa sistem ini menguntungkan (Rubio-Maya et al., 2015).

Lapangan penelitian yang dipilih pada penelitian ini adalah lapangan panas bumi Danau Ranau yang letaknya masuk kedalam dua propinsi yaitu Provinsi Lampung tepatnya di Kecamatan Sukau Lampung barat dan Provinsi Sumatera Selatan yaitu masuk ke dalam wilayah Kecamatan Banding Agung Oku Selatan. Sebagai salah satu lapangan panas bumi medium enthalpy Indonesia, lapangan ini telah secara resmi dijadikan salah satu objek pengembangan sesuai surat Keputusan WKP nomor 1551K/30/MEM/2011 tanggal 21 April 2011. Pengusahaan lapangan Danau Ranau telah masuk kedalam RUPTL 2019-2028 dengan target kapasitas yang dibangkitkan sebesar 40MW, COD tahun 2026 dan merupakan penugasan pemerintah ke PT PLN. Hasil kajian Geologi, Geokimia, dan Geofisika menyatakan sistem panas bumi Danau Ranau merupakan sistem dengan fluida reservoir dominasi air, dengan temperatur reservoir pada rentang 200-269°C (PLN, 2017). Tercatat status kegiatan pengusahaan pada lapangan ini telah selesai dilakukan kajian 3G (Geologi, Geokimia dan Geofisika) dan perhitungan potensi cadangan hipotesis sebesar 25 MW untuk *probability* 10% (Afiat, Idianto et al., 2020). Sebagaimana yang tercantum pada SNI 13-5012-1998, dalam tahapan pengembangan lapangan panas bumi setelah dilakukan kajian 3G, tahapan

selanjutnya adalah pemboran sumur eksplorasi. Pemboran sumur eksplorasi ini bertujuan untuk membuktikan dan memperkaya data pada kajian 3G yang telah dilakukan. Akan tetapi sebelum dilakukan pemboran sumur eksplorasi yang tentunya akan memakan biaya, perlu dilakukan pra kajian kelayakan (*pre-feasibility study*) yang menyatakan keberlanjutan tahapan pengembangan lapangan. Penelitian ini dilakukan untuk menentukan seberapa *feasible* lapangan panas bumi Danau Ranau dengan karakteristik *medium enthalpy* dikembangkan baik dari sisi pemanfaatan langsung maupun tidak langsung dengan melihat keberterimaan dari kajian teknis, finansial, lingkungan dan risiko, sehingga PT PLN sebagai pengembang dapat memutuskan apakah akan lanjut atau tidak melakukan tahapan pengembangan berikutnya yaitu pemboran sumur eksplorasi.

## **I.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah yang menjadi landasan dalam penelitian ini adalah dibutuhkannya pra kajian kelayakan yang meliputi kajian kelayakan teknis, keekonomian, lingkungan dan risiko untuk skema pengembangan lapangan panas bumi Danau Ranau sebagai tindak lanjut hasil kajian 3G yang telah dilakukan, sehingga dapat diputuskan apakah kegiatan pengembangan akan lanjut ke tahap berikutnya atau tidak.

## **I.3 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merumuskan pola pengusahaan langsung pada lapangan panas bumi dengan karakteristik *medium enthalpy* (studi kasus lapangan panas bumi Danau Ranau) dengan mempertimbangkan hasil *resource assessment*, kajian rona awal, keberterimaan analisa finansial dan risiko.
2. Merumuskan pola pengusahaan tidak langsung pada lapangan panas bumi dengan karakteristik *medium enthalpy* (studi kasus lapangan panas bumi Danau Ranau) dengan mempertimbangkan hasil *resource assessment*, kajian rona awal, pemilihan teknologi konversi, keberterimaan analisa finansial dan risiko

#### **I.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah

1. Pada penelitian ini tidak dilakukan lagi analisa data Geologi, Geokimia dan Geofisika.
2. Data studi sistem kelistrikan yang digunakan sesuai dengan pengembangan jaringan transmisi pada RUPTL 2019-2028.
3. Perancangan pengusahaan lapangan panas bumi indirect use menggunakan teknologi konversi *Sistem biner - Organic Rankine Cycle (ORC)*.
4. Penjadwalan pengusahaan lapangan panas bumi *indirect use* mengikuti tenggat waktu COD sesuai RUPTL 2019-2028.
5. Data informasi baseline kondisi lingkungan menggunakan data regional dengan rentang periode 5 tahun kebelakang.
6. Model analisa sensitivitas dibangun berdasarkan rangkuman faktor keberhasilan dan kegagalan pengusahaan lapangan panas bumi di Indonesia dan disesuaikan dengan level keberterimaan risiko dan konsekuensi proyek sesuai dengan regulasi PLN grup.
7. Asumsi kajian keekonomian yang digunakan mengacu pada data biaya eksploitasi lapangan panas bumi yang sudah ada, BPP regional, pola pendanaan proyek PLN Grup, dan rasio keuangan PLN Group.
8. Kajian dan Analisa Risiko pengusahaan lapangan panas bumi dilakukan berdasarkan perkalian kemungkinan risiko dan tingkat dampak atas risiko dengan nilai keberterimaan didasarkan kepada kemampuan dalam mengelola dan memitigas risiko pengusahaan.

#### **I.5 Metodologi Penelitian**

Dalam pelaksanaan penelitian ini, secara garis besar kegiatan meliputi tahapan sebagai berikut

1. Pengumpulan data 3G dan Rona Awal  
Tahapan ini merupakan tahapan persiapan dengan mengumpulkan semua informasi dan literatur yang berhubungan dengan lapangan terkait sebagai objek penelitian. Data yang dikumpulkan berdasarkan kajian tahapan eksplorasi pra

pemboran menurut SNI 13-5012-1998 adalah data geologi regional, geokimia, geofisika, dan dilengkapi dengan data kondisi wilayah sekitar lapangan yang diteliti seperti statistik jumlah dan pertumbuhan penduduk, statistik mata pencaharian penduduk, *trend* tingkat kemiskinan dan Pendidikan, akses, kondisi dan sarana transportasi, iklim dan cuaca, objek wisata, kondisi lahan, kondisi kelistrikan (sekarang dan proyeksi).

2. *Resource Assessment* dan Perhitungan potensi lapangan panas bumi

Tahapan ini mencakup mengintegrasikan hasil kajian geologi, geokimia dan geofisika sehingga didapat karakteristik lapangan panas bumi yang diteliti seperti jenis dan temperatur fluida, area prospek dan model konseptual. Selain itu pada tahapan ini dilakukan perhitungan potensi lapangan panas bumi sesuai SNI 6009 – 2017 dengan menggunakan metode *heat stored* Monte Carlo, sehingga didapat berapa besar energi yang dapat dihasilkan dalam kurun waktu masa pemanfaatan yang ditetapkan (yaitu 30 tahun).

3. Kajian pengusahaan lapangan: *direct use*

Pada tahapan ini akan dilakukan kajian peluang pemanfaatan langsung (*direct use*) yang disesuaikan dengan hasil analisa rona awal lingkungan sekitar panas bumi. Kajian pemanfaatan langsung akan dilakukan berdasarkan data kondisi wilayah sekitar lapangan yang diteliti baik dari sektor ekonomi kemasyarakatan yang berkembang, sektor pertanian, atau kebutuhan rumah tangga lainnya.

4. Kajian pengusahaan lapangan: *indirect use*

Tahapan ini merupakan tahapan lanjutan setelah hasil perhitungan potensi lapangan panas bumi didapatkan. Adapun prospek pemanfaatan langsung juga akan disesuaikan dengan hasil *resource assessment* yang dilakukan. Pada tahapan ini akan dirancang fasilitas produksi yang sesuai dari segi potensi cadangan yang dikandung maupun karakteristik dari reservoir pada lapangan yang diteliti.

5. Kajian Aspek dan Dampak Lingkungan

Tahapan ini meliputi pengumpulan data lingkungan lapangan penelitian, regulasi lingkungan hidup yang berlaku yang kemudian dikaji terkait peluang dampak lingkungan yang mungkin terjadi, sehingga diperoleh *environmental feasibility* pengusahaan panas bumi pada lapangan panas bumi Danau Ranau.

#### 6. Kajian Risiko Pengusahaan

Tahapan ini merupakan tahapan mengkaji risiko pengusahaan lapangan panas bumi, baik risiko teknis (operasional, pemilihan program *direct use*, pemilihan fasilitas produksi dan PLTP), risiko lingkungan, risiko dampak social sampai dengan risiko pendanaan proyek, yang kemudian dianalisa keberterimaan risiko berdasarkan kemungkinan terjadinya risiko, dampak risiko pada proyek pengusahaan ini, dan program mitigasi risiko.

#### 7. Kajian keekonomian proyek

Tahapan kajian keekonomian proyek meliputi pembuatan dan analisa kelayakan ekonomi pengembangan lapangan panas bumi baik *direct* maupun *indirect use*, melalui *financial modeling* yang akan menghitung proyeksi finansial baik dari struktur pendapatan maupun biaya (termasuk perhitungan pinjaman dan bunga pinjaman) sehingga didapat nilai keberterimaan rasio keekonomian seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate Return* (IRR) proyek, *Payback Period* dan *Return on Investment* (ROI).

#### 8. Analisa sensitivitas

Tahapan ini bertujuan menganalisa parameter parameter apa saja yang mempengaruhi keberterimaan risiko dan konsekuensi tahapan proyek dan dampaknya pada kajian keekonomian proyek. Pada tahapan ini akan mendetailkan faktor-faktor yang mempengaruhi tahapan proyek sesuai dengan skala kemungkinan terjadinya.

### **I.6 Hipotesis**

Pengusahaan lapangan panas bumi medium *enthalpy* dengan lapangan penelitian Danau Ranau mempunyai peluang pengusahaan baik *direct use* maupun *indirect use* dengan mempertimbangkan hasil *resource assessment* yang dilakukan, kajian lingkungan, kajian keekonomian dan kajian risiko. Pengusahaan lapangan panas bumi *direct use* dengan metode *cascade* yang dibuat dengan juga memperhatikan pendekatan pemberdayaan masyarakat sekitar dapat dilakukan pada berbagai sector. Sedangkan program pengusahaan *indirect use* yang dipilih adalah PLTP *sistem biner* atau *combine cycle (single flash – sistem biner)*.



## **Bab II Tinjauan Lapangan Penelitian**

Pada Bab ini akan menguraikan informasi tentang lapangan yang dipilih pada penelitian ini. Bab ini berisikan mulai dari informasi regional, rona awal yang berisikan informasi status lahan dan hutan, iklim, jumlah dan mata pencaharian penduduk sekitar, sarana jalan dan transportasi, komoditi local dan objek wisata. Selain itu bab II ini juga berisikan informasi kondisi kelistrikan regional, kajian geologi, kajian geokimia, dan kajian geofisika, model konseptual, dan potensi panas bumi.

### **II.1 Informasi Regional**

Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Danau Ranau ditetapkan melalui Surat Keputusan Menteri ESDM No. 1151 K/30/MEM/2011 tanggal 21 April 2011. Wilayah ini memiliki luas  $\pm$  8561 ha dengan potensi cadangan mungkin. Untuk mencapai lokasi WKP dapat dilakukan dengan menggunakan bus dari Jakarta – Merak – Bakauheni – Liwa. Dari Liwa ke lokasi penyelidikan ( $\pm$  38 km) dapat ditempuh dengan menggunakan kendaraan umum kurang lebih 2 jam perjalanan. Bandara terdekat adalah Bandara Banding Agung dengan jarak 15.29 km dari lokasi penelitian. Bandara lainnya adalah Bandar Udara Internasional Gatot Subroto dengan jarak 75.09 Km. Pelabuhan terdekat adalah Pelabuhan Bintuhan dengan jarak 59.96 Km dari lokasi WKP. WKP Danau Ranau yang termasuk dalam 2 (dua) wilayah administratif yaitu Kabupaten Lampung Barat di Provinsi Lampung dan Kabupaten Ogan Komering Ulu Selatan di Provinsi Sumatera Selatan.

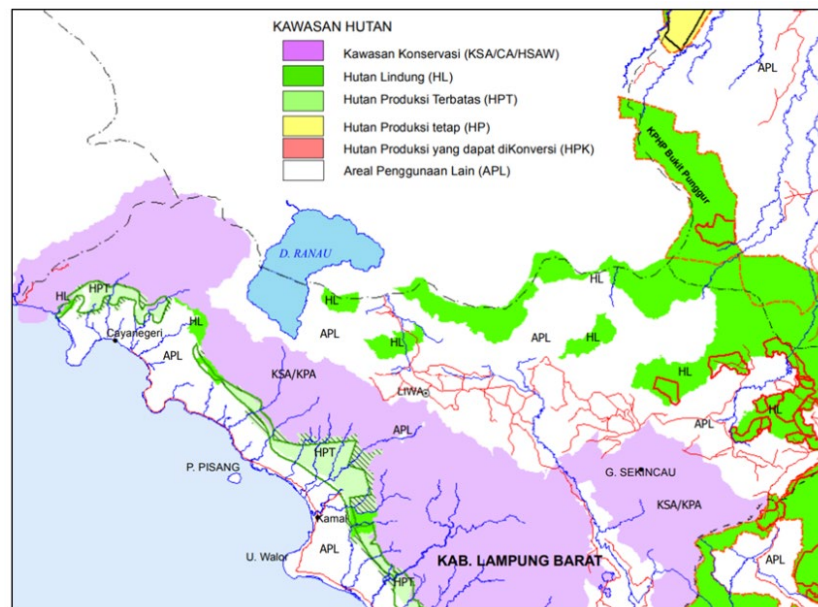
### **II.2 Rona Awal**

Kajian rona awal lingkungan di wilayah Danau Ranau diperlukan untuk memberikan gambaran mengenai kondisi geografis di wilayah tersebut yang akan berpengaruh terhadap rencana pengembangan lapangan panas bumi ke depannya di wilayah tersebut. Kajian lingkungan yang dilakukan mencakup aspek kondisi iklim, temperatur, curah hujan, kelembapan udara, dan aspek lingkungan lainnya. Selain sebagai informasi untuk program pengembangan ke depannya di wilayah tersebut, kajian aspek lingkungan juga dapat memberikan gambaran resiko lingkungan yang

dapat terjadi di wilayah tersebut seperti bencana alam dan lainnya sehingga dapat direncanakan mitigasi untuk potensi resiko bencana alam tersebut.

a. Status Lahan dan Hutan

Di dalam WKP Danau Ranau seperti terlihat pada Gambar II.1 terdapat hutan Lindung yang diperkirakan memiliki luas sekitar 20% dari luas keseluruhan WKP2. Adanya hutan lindung di dalam lokasi WKP menyebabkan kegiatan perusahaan Panas Bumi pada WKP Danau Ranau memerlukan Izin Pinjam Pakai Kawasan Hutan (IPPKH) kepada menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan. Adapun wilayah hutan lindung tersebut berada di bawah KPHL (Kesatuan Pengelolaan Hutan Lindung) Liwa II – Lampung Barat. Selain hutan lindung WKP Danau Ranau berupa perkebunan milik penduduk setempat dengan berbagai status kepemilikan.



Gambar II. 1 Status Lahan WKP Danau Ranau (Sumber: PT PLN,2017)

b. Iklim

Wilayah Danau Ranau merupakan daerah yang memiliki iklim tropis dan curah hujan baik sepanjang tahun. Daerah Danau Ranau memiliki ketinggian rata rata 900 mdpl dengan temperatur rata-rata di wilayah tersebut adalah 21°C dengan periode curah hujan tinggi pada bulan Desember sampai dengan April yaitu antara 295 sd 190 mm.

c. Jumlah Penduduk dan Mata Pencaharian Penduduk

Tercatat sesuai data BPS Kabupaten Lampung Barat Kecamatan Lumbok Seminung Tahun 2016 total jumlah penduduk berjumlah 6701 orang dengan komposisi 3744 berjenis kelamin laki laki dan 2957 berjenis kelamin wanita. Mayorita mata pencaharian bekerja pada sector pertanian khususnya kopi dan lada.

d. Sarana Jalan dan Transportasi

Menurut Badan Pusat Statistik OKU Selatan (2011), Kabupaten OKU Selatan merupakan kawasan yang tidak berbatasan langsung dengan laut, sehingga alat angkut dan sarana perhubungan adalah kendaraan darat terutama roda dua dan roda empat. Jaringan jalan dan jembatan di Kabupaten OKU Selatan meliputi jalan provinsi sepanjang 229,76 Km dan jalan kabupaten sepanjang 368,60 Km.

e. Komoditi Lokal

Selain Kopi, lada (*Piper Nigrum*) tumbuh subur di sekitar Ranau di Kabupaten Ogan Komering Ulu (OKU) Selatan. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS) Sumatera Selatan 2016, luas kebun lada di OKU Selatan mencapai 4.493 hektar, paling luas di Sumatera Selatan yang memiliki total luas kebun lada 11.643 hektar. Produksinya 3.763-ton atau 40 persen dari produksi lada Sumatera Selatan sebesar 9.218 ton. Umumnya, masyarakat menanam lada bukan sebagai tanaman utama atau monokultur, melainkan tanaman selingan di antara tanaman kopi. Lada OKU Selatan umumnya berasal dari perkebunan rakyat. Warga menanam lada secara turun-temurun dengan luas lahan berkisar 1-2 hektar. Mayoritas lada dari wilayah ini dikeringkan secara langsung dan dijual sebagai lada hitam. Sebagian kecil biji lada dipanen dalam kondisi matang, direndam untuk menghilangkan kulit luarnya, lalu dikeringkan dan dijual dalam bentuk lada putih. Lada biasanya mulai berbunga antara bulan Desember dan Januari. Setelah melalui masa pembuahan, panen dimulai pada bulan Juli sampai beberapa bulan kemudian. Lada dari OKU Selatan umumnya dijual kepada pengepul di Lampung, bukan di wilayah Sumatera Selatan sebab jarak dan waktu tempuh ke Lampung dinilai lebih dekat. Di sisi lain, akses jalan dari OKU Selatan ke Lampung jauh lebih baik sehingga menekan ongkos pengangkutan. Harga jual antara Lampung dan Palembang dinilai tidak jauh

beda. Kondisi ini pula yang membuat lada OKU Selatan kurang dikenal di provinsinya sendiri.

f. Objek Wisata

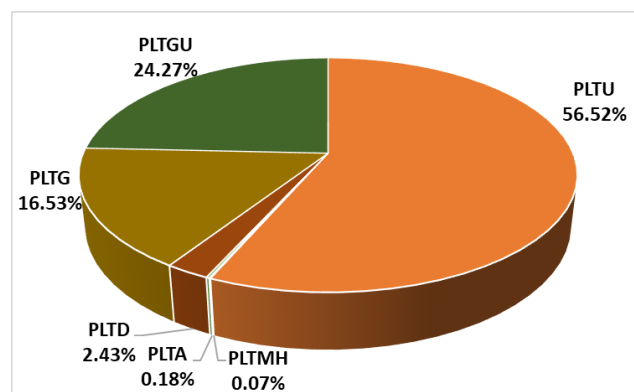
Di sekitar wilayah Danau terdapat objek wisata kolam pemandian air panas yang menunjukkan indikasi manifestasi panas bumi di wilayah tersebut. Kolam air panas ini berada tepat bersisian dengan Danau Ranau.



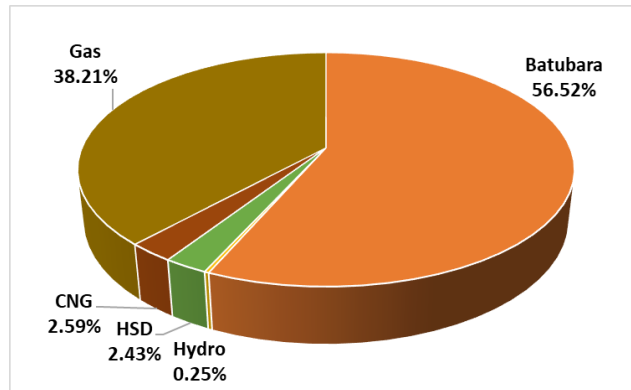
Gambar II. 2 Objek Wisata Kolam Air Panas Danau Ranau

### II.3 Kondisi Kelistrikan Regional

Saat ini beban puncak pada sistem kelistrikan di Provinsi Sumatera Selatan adalah 1006 MW di tahun 2018. Pada awal tahun 2019 total kapasitas terpasang pembangkit tenaga listrik di Provinsi Sumatera Selatan adalah sekitar 2,241 MW. Sumber energi listrik utama pada sistem kelistrikan di wilayah ini bersumber dari energi fosil dengan batubara yang mendominasi dengan porsi 56.52 %, diikuti gas 38.21%, CNG 2.59%, dan HSD 2.43%.

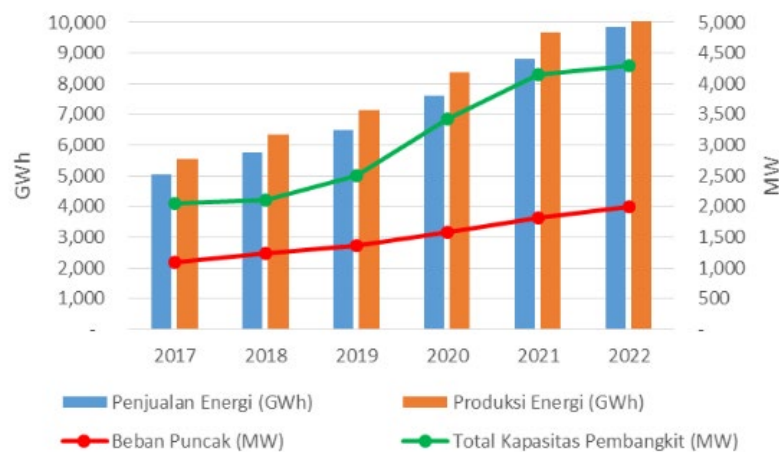


Gambar II. 3 Komposisi Sumber Daya Listrik (Sumber: PT PLN,2017)



Gambar II. 4 Komposisi Sumber Daya Listrik (Sumber: PT PLN,2017)

Penjualan energi listrik provinsi Sumatera Selatan dari tahun 2011-2016 tumbuh dengan rata-rata pertumbuhan 9% per tahun dengan beban puncak naik rata-rata 10.8% dari 257 MW pada 2011 menjadi 1006 MW pada 2016. Dengan proyeksi rata-rata pertumbuhan ekonomi 5.8% selama 10 tahun kedepan, maka proyeksi kebutuhan tenaga listrik di Provinsi Sumatera Selatan diproyeksikan akan tumbuh rata-rata sekitar 12.5% per tahun dalam periode 10 tahun.



Gambar II. 5 Penjualan Energi Listrik Provinsi Sumatera Selatan (Sumber: PT PLN,2017)

## II.4 Kajian Geologi

Sumber panas pada daerah Panas Bumi danau Ranau diduga berasal dari Gunung Ranau berumur Pleistosen, kemudian di bagian tenggara terbentuk Gunung Seminung yang merupakan post-caldera bertipe strato-vulkano. Produk Gunung Seminung seperti lava dan piroklastik mencerminkan bahwa pembentukan batuan

tersebut bersifat eksplosif dengan energi yang cukup tinggi. Magma naik ke permukaan diakibatkan oleh gaya endogen dari dalam. Sisa erupsi magma menjadi sumber panas yang memanasi fluida bawah permukaan.

Zona permeabel pada daerah Panas Bumi danau Ranau dikontrol oleh sistem sesar Sumatera yang merupakan sesar strike-slip dengan arah pergerakan dekstral yang berarah relatif barat-laut-tenggara. Adanya pemisahan segmen sesar oleh *step-over* dengan pola en-echelon, mengakibatkan terbentuk tegasan tarikan (*extension*) yang membentuk depresi vulkano-tektonik Danau Ranau. Pola-pola sesar yang terbentuk berarah Barat-laut-Tenggara, Utara Barat-laut – Selatan Tenggara dan Timurlaut-Baratdaya yang berasosiasi dengan arah sesar utama, sintetis, dan antitetik sesar dari sesar Sumatera atau yang lebih dikenal dengan sesar Semangko.

Batuan penyusun reservoir pada daerah Panas Bumi danau ranau diduga berada pada formasi Kikim dan formasi Hulusimpang. Formasi Kikim (Tpok) merupakan batuan vulkanik berumur tersier. Batuan tersebut tertindih tidak selaras oleh Formasi Hulu Simpang (Tomh) yang berumur Oligosen–Miosen. Formasi hulusimpang disusun oleh lava andesit dan basal, breksi gunungapi dan tuf yang bersisipan batupasir. Kekhasan formasi ini adalah sebagian batumannya telah berubah secara kloritisasi dan propilitisasi.

## **II.5 Kajian Geokimia**

Potensi Panas Bumi daerah Danau Ranau diindikasikan oleh kehadiran manifestasi permukaan berupa mata air panas. Kajian detail pada laporan ini dilakukan melalui 10 data manifestasi permukaan (*thermal spring*) yang terdiri dari: 4 (empat) *hot spring* (55-63°C), dan 6 (enam) *warm spring* (<50°C) yang tersebar pada lereng Gunung Ratu mengikuti patahan berarah NW-SE (Kotabatu *Fault*) dan NE-SW (Lombok *Fault*). Peyebaran *thermal spring* terbatas hanya pada dua area tersebut, sedangkan di bagian SE terdapat jejak proses hidrothermal berupa alterasi di permukaan (Argilik?) yang juga berasosiasi dengan fault berarah NW-SE. Endapan *travertine* juga dijumpai berasosiasi dengan kehadiran beberapa *thermal*

*spring*. Kualitas data manifestasi berdasarkan analisis *ion balance* tergolong sangat baik (excellent) dengan nilai IB <5%.

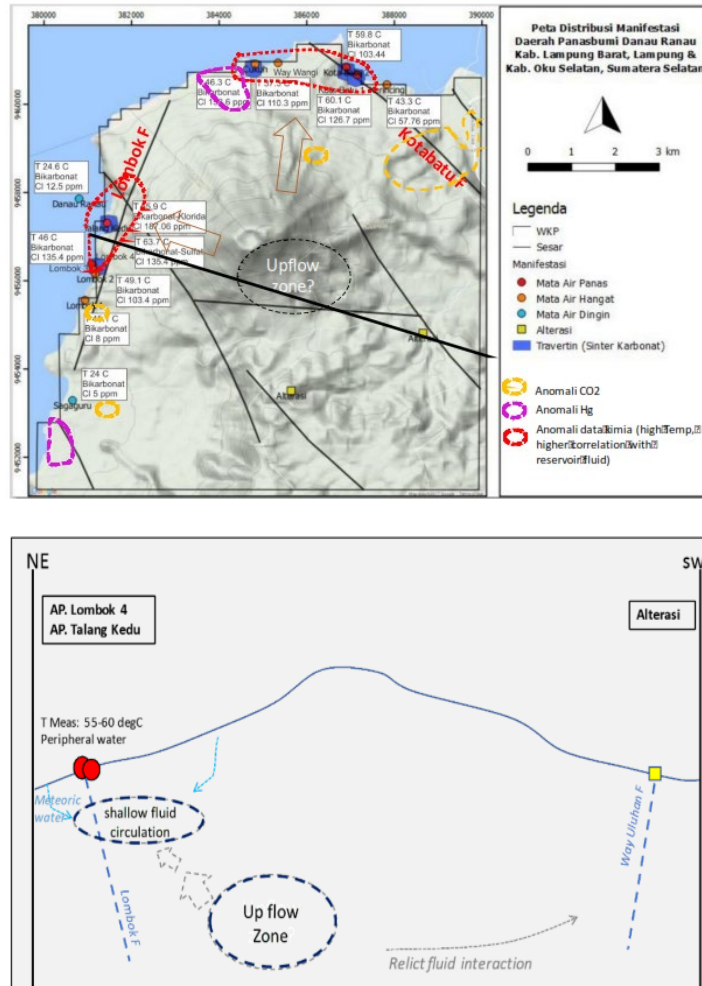
Hasil pengolahan data di atas terlihat bahwa semua manifestasi mata air di Danau Ranau hampir semua mata air memiliki tipe air Bikarbonat ( $\text{HCO}_3$ ). Kecuali Mata air Lumbok-4 tipe mata air dilute  $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$  dan Mata air Talang kedu dilute  $\text{HCO}_3\text{-Cl}$ . Berdasarkan kesamaan lokasi hasil plotting berdasarkan pada kandungan Cl-Li-B semua mata air mencirikan berada di lingkungan yang sama, mencirikan semua mata air panas di daerah Ranau dan sekitarnya berada di lingkungan batuan vulkanik.

Berdasarkan semua metoda yang digunakan (ternary diagram: major anion, Cl-Li-B, Na-K-Mg), fluida asal berupa fluida meteorik dengan sumber asal fluida yang sama. Tipe fluida adalah neutral bicarbonate, sehingga tidak ada indikasi fluida reservoir yang sudah cukup setimbang (neutral-Chloride-mature fluid) yang bisa langsung digunakan sebagai pendekatan kondisi reservoir. Selanjutnya intepretasi model geokimia hanya bisa dilakukan secara optimal dengan data yang ada. Data isotop stabil hanya didapat dari 3 sample yang merefleksikan komponen dominan fluida asal meteorik.

Hasil perhitungan geothermometer dari mata air Lumbok-4 dengan tipe air dilute Sulfida-bikarbonat digunakan merepresentasikan temperatur reservoir. Temperatur reservoir hasil dari metode geothermometer menunjukkan interval 200-269°C. Zona permeabel diindikasikan dari anomali kandungan unsur Hg dan  $\text{CO}_2$  menunjukkan anomali atau menunjukan nilai diatas rata-rata berada di daerah Lumbok, Heni Arong, Talang Gedung, Talang Wai Wangi dan Kota Batu, atau sekitar kemunculan manifestasi.

Model konseptual dibuat berdasarkan *overlay* dari penyebaran anomali beberapa parameter kimia yang bertujuan untuk melihat karakteristik reservoir, serta hidrologi dari fluida Panas Bumi. Dengan keterbatasan penyebaran manifestasi permukaan, hipotesa geokimia mengindikasikan adanya interaksi batuan dengan

fluida panas yang lebih intensif pada lokasi mata air panas Lombok 4, Cukuh, Wai Wangi, dan Talang Kedu atau merepresentasikan arah *outflow* yang utama dengan temperatur kesetimbangan terakhir sebagai indikasi *shallow reservoir* atau *shallow fluid circulation* sekitar 160°C (berdasarkan geothermometer silica). Sedangkan temperatur yang lebih tinggi sebagai zona reservoir dalam (*upflow*) tidak dapat dilakukan karena tidak terdapat fluida yang representative.



Gambar II. 6 Model Konseptual Kajian Geokimia (Sumber: PT PLN, 2017)

## II.6 Kajian Geofisika

Zona permeabel dengan melihat data Anomali Bouguer sisa memperlihatkan struktur yang agak kompleks, dimana pola konturnya mempunyai nilai positif dan nilai negatif serta membentuk kelompok-kelompok tersendiri, hal ini diperkirakan secara dominan diakibatkan oleh struktur lokal. Bagian barat mempunyai struktur mempunyai arah timurlaut-baratdaya, dan baratlaut-tenggara. Di bagian timurlaut



dan timur terdapat struktur mempunyai arah baratlaut–tenggara. Struktur lainnya yang muncul terdapat di sebelah tengah mengarah ke arah barat-timur, dan di bagian selatan dengan arah baratlaut – tenggara. Anomali magnet total di daerah penyelidikan secara umum menunjukkan lineasi berarah baratlaut- tenggara dengan harga anomali tinggi meliputi bagian-bagian utara, timurlaut, tenggara, selatan, barat dan baratlaut. Anomali rendah dan sangat rendah terdapat dibagian timur, selatan barat dan baratlaut. Sebaran tahanan jenis rendah dari hasil survey geolistrik ( $< 20$  Ohm-m) terlihat dibagian utara daerah penelitian sampai ke puncak G. Seminung. Tahanan jenis rendah ini diinterpretasikan sebagai batuan yang telah mengalami ubahan dan berfungsi sebagai lapisan penudung pada sistem Panas Bumi di daerah ini. Lapisan ini terdapat pada kedalaman antara 200–500 meter dengan ketebalan antara 500–1000 meter. Sedangkan dari hasil survey magnetotellurik Tahanan jenis rendah terdapat dibagian utara mengarah ke arah barat dan timurlaut daerah penelitian, dengan ketebalan bervariasi antara 500–1500 meter. Nilai Resistivitas rendah diduga merupakan batuan terubahkan sebagai lapisan penudung.

## **II.7 Model Konseptual**

### **a. Sistem Panas Bumi**

Sistem Panas Bumi Danau Ranau berada di high terrain, diduga merupakan suatu post caldera akibat depresi vulkano-tektonik yang dikontrol oleh sistem sesar sumatera. Jenis sesar strike-slip dengan arah pergerakan dekstral, serta ada pemisahan segmen sesar oleh step-over dengan pola en-echelon yang mengakibatkan terbentuk tegasan tarikan (*extension*) yang membentuk penipisan yang menjadi pengontrol terbentuknya gunungapi. Berdasarkan klasifikasi temperaturnya sistem Panas Bumi ini bertipe entalpi sedang apabila dilihat dari hasil perhitungan geothermometer yaitu pada temperatur 200-220°C dengan sistem satu fasa air.

### **b. Sumber Panas (*Heat Source*)**

Sumber panas diduga berasal dari Gunung Seminung, berdasarkan anomali Bouguer residual dengan nilai -12 mgal sampai -16 mgal dan juga adanya anomali magnet positif. Sumber panas daerah ini diperkirakan berasal dari sisa

magma pembentuk batuan vulkanik Seminung. Kerucut Gunung Seminung merupakan kerucut termuda, dilihat berdasarkan tingkat erosi relief yang relatif lebih muda dibandingkan daerah lainnya. Gunung Seminung merupakan post-caldera yang bertipe strato vulkano yang terdiri dari perselingan antara lava dan piroklastik, hal ini mencerminkan bahwa pembentukan batuan tersebut bersifat eksplosif dengan energi yang cukup tinggi.

c. Batuan Reservoir dan Batuan Penudung

Top Reservoir pada sistem Panas Bumi Danau Ranau diduga pada kedalaman antara 1000-1500 meter, dengan ketebalan berkisar antara 1000-2000 meter. Zona reservoir diduga pada Formasi Hulusimpang sampai Formasi Kikim. Batuan penudung (cap rock) pada daerah Panas Bumi Danau Ranau diduga merupakan batuan ubahan tipe agrilik, hal ini ditunjukkan adanya nilai tahanan jenis rendah  $<20$  m pada kedalaman 500-1000 m, dengan ketebalan diperkirakan berkisar 500-1000 m. Diperkirakan batuan penudung ini terdapat pada Satuan Lava dan Tuf Vulkanik Tua yang dibandingkan dengan Formasi Hulusimpang yang tersusun oleh lava dan tuf.

d. Daerah Resapan (*Recharge*) dan Pelepasan (*Discharge*)

Zona resapan (*recharge area*) tersebar pada area seluas 54.25 km<sup>2</sup> terutama di perbukitan terjal di sekeliling Gunung Seminung, dan di sekitar perbukitan Sulung di selatan serta Gunung Kukusan bagian timur laut daerah penyelidikan. Luas zona resapan hujan ini  $\pm 45\%$  dari daerah penelitian yang mempunyai luas 131.5 km<sup>2</sup>. Curah hujan daerah sekitar manifestasi adalah sekitar 59 - 1.630 mm per tahun. Daerah penyelidikan secara hidrologi berada di sekitar DAS Wai Selabung dan Danau Ranau. Air meteorik tersebut mengalir melalui satuan Qjs dan Qapr yang berlitologikan tuf yang relatif permeabel dan muncul ke permukaan sebagai mata air dingin Saguru. Zona pelepasan (*Discharge*) meliputi daerah pedataran. Memiliki luas areal sekitar 55 % daerah penyelidikan pada elevasi  $< 500$  m dpl. Daerah limpasan sungai merupakan bagian dari daerah lepasan dimana merupakan akumulasi aliran run off dari air permukaan yang tidak teresap di daerah resapan dan mengalir mengisi lembah – lembah membentuk aliran sungai.

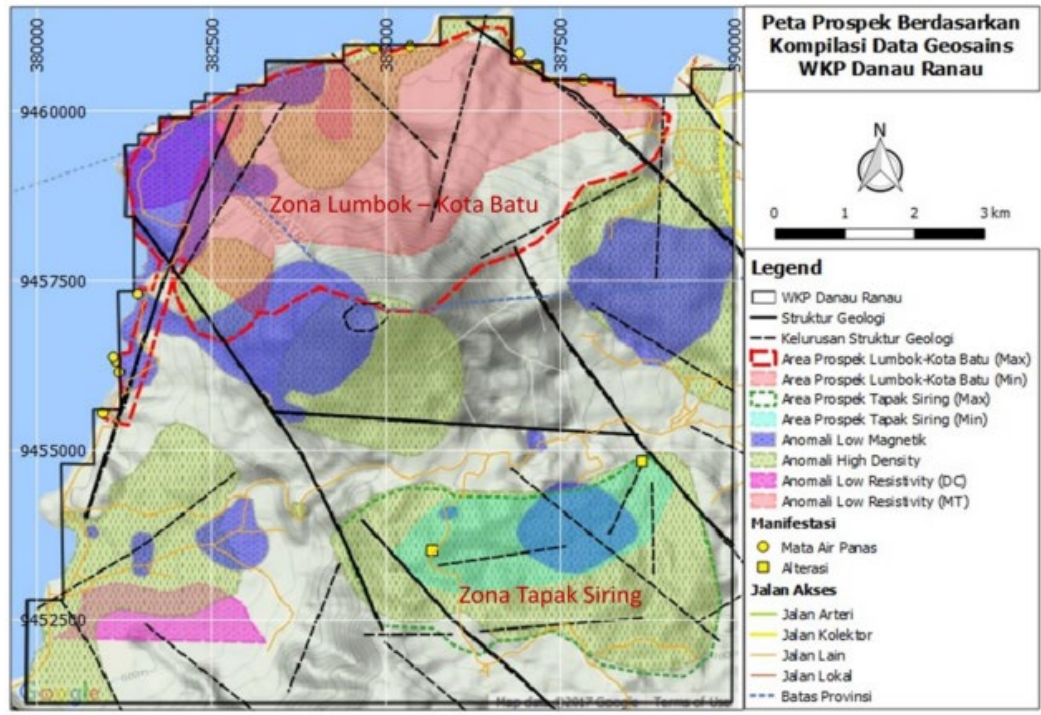
e. Daerah *Upflow* dan *Outflow*

Daerah *upflow* sistem Panas Bumi Danau Ranau diperkirakan terdapat pada sekitar Gunung Seminung. Daerah *outflow* terdapat pada daerah timurlaut tempat keluarnya manifestasi didaerah Cukuh, Way Wangi, Kota Baru dan Kerincing.

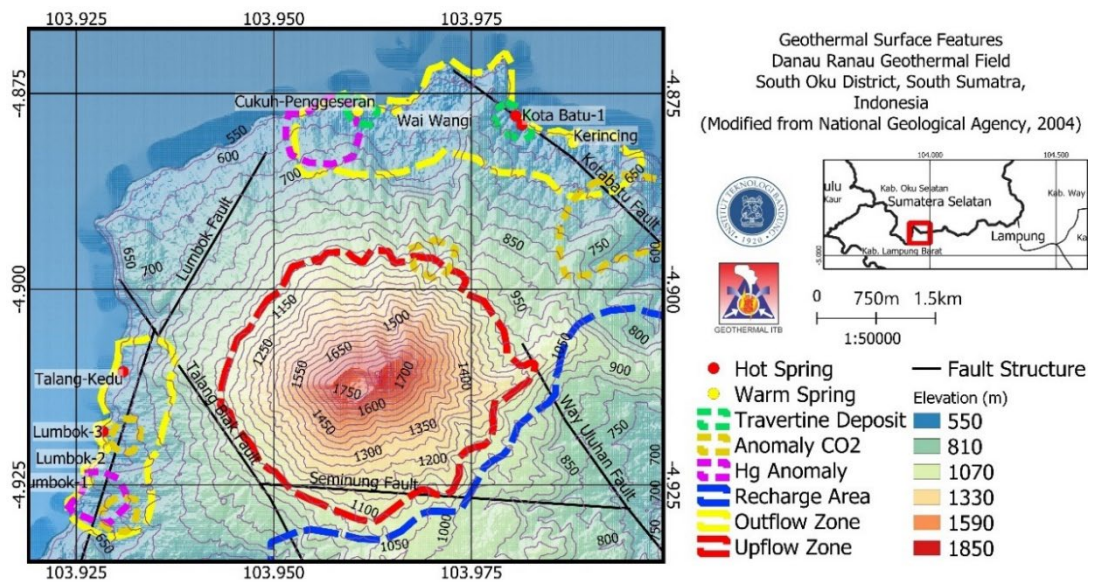
f. Daerah Prospek

Delineasi daerah prospek menggunakan hasil analisis data struktur geologi, manifestasi, *resistivity* sangat rendah-sedang (MT), anomali magnet yang sangat rendah-rendah, dan anomali bouguer residual rendah- sedang, terdapat pada daerah Barat, Baratlaut, Utara, Timurlaut, dan Tenggara Gunung Seminung. Zona prospek 1 (Blok Lombok – Kota Batu) memiliki luas prospek  $\pm 22.8 \text{ km}^2$ , dengan luas daerah prospek menjadi prioritas utama  $\pm 13.74 \text{ km}^2$ .

Zona prospek 2 (Blok Tapak Siring) terletak di bagian tenggara Gn. Seminung memiliki luas prospek  $\pm 12.27 \text{ km}^2$ , dengan luas daerah prospek menjadi prioritas utama  $\pm 4.67 \text{ km}^2$ . Zona prospek ini masih bersifat Spekulatif, kurangnya data menjadi kendala dalam menginterpretasi zona prospek ini. Dugaan awal zona ini merupakan sistem panas bumi tersembunyi yang hanya ditandai dengan kehadiran batuan teralterasi di sebelah barat dan timur zona prospek ini. Sedangkan dari data Gravity, ditemukan anomali tinggi yang diduga merupakan intrusi batuan yang dapat menjadi sumber panas di zona prospek ini.

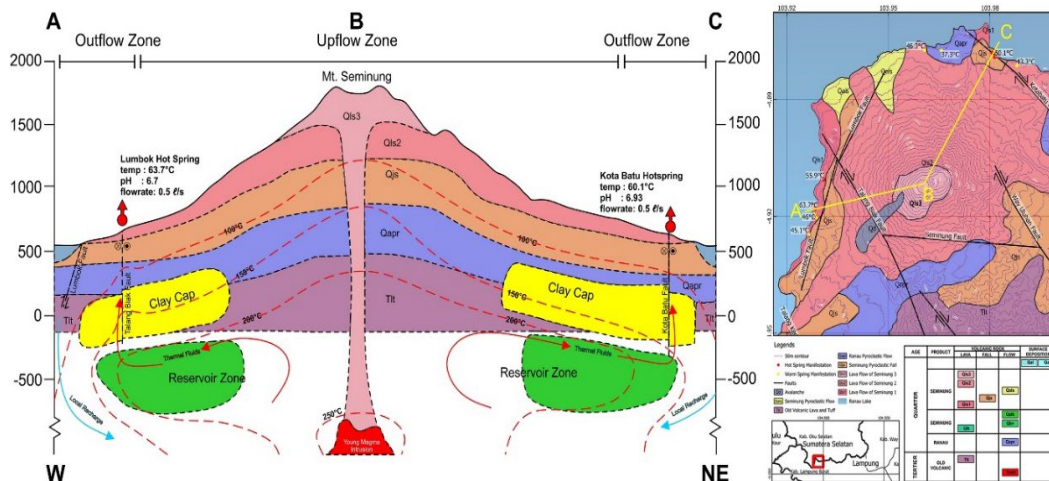


Gambar II. 7 Daerah Prospek Danau Ranau (Sumber: PT PLN,2017)



Gambar II. 8 Fitur Geothermal Danau Ranau dan Sebaran Manifestasi

(Sumber: Afiat, Idianto et al., 2020)



Gambar II. 9 Model konseptual Danau Ranau (Sumber: Afiat, Idianto et al., 2020)

## II.8 Potensi Panas Bumi

Estimasi sumber daya di lapangan panas bumi Danau Ranau menggunakan prinsip kandungan panas (*heat stored*). Ada dua metode termasuk pendekatan deterministik dan probabilistik. Pendekatan deterministik menggunakan metode volumetrik dan pendekatan probabilistik menggunakan simulasi Monte Carlo. Metode volumetrik membutuhkan beberapa parameter termasuk area, kedalaman, porositas, kepadatan batuan, kapasitas batuan panas, saturasi air awal dan akhir, suhu awal dan akhir, recovery faktor, faktor konversi, dan waktu proyek. Parameter diperoleh dari model konseptual, karakterisasi reservoir, dan asumsi umum. Simulasi Monte Carlo adalah perhitungan iterasi dari model probabilistik yang mensimulasikan sifat fisik dalam nilai distribusi untuk memperkirakan sumber daya panas bumi dengan prinsip penyimpanan panas. Estimasi nilai minimal, maksimal, dan kemungkinan besar di setiap parameter sumber daya panas bumi perlu ditentukan sebelumnya.

Area terbukti di lapangan panas bumi Danau Ranau dibatasi oleh manifestasi permukaan dan distribusi panas (200 - 220°C) berdasarkan hasil simulasi. Area kemungkinan diperoleh dari karakterisasi reservoir berdasarkan distribusi manifestasi permukaan dan distribusi suhu minimum (200°C) berdasarkan simulasi. Ketebalan reservoir diperoleh dari profil suhu tinggi. Dari profil suhu tinggi, ketebalannya dari -500 mdpl hingga -1400 mdpl. Ketebalan reservoir sekitar 900 meter. Porositas batuan diperoleh sekitar 0,08 hingga 0,1. Faktor pemulihan

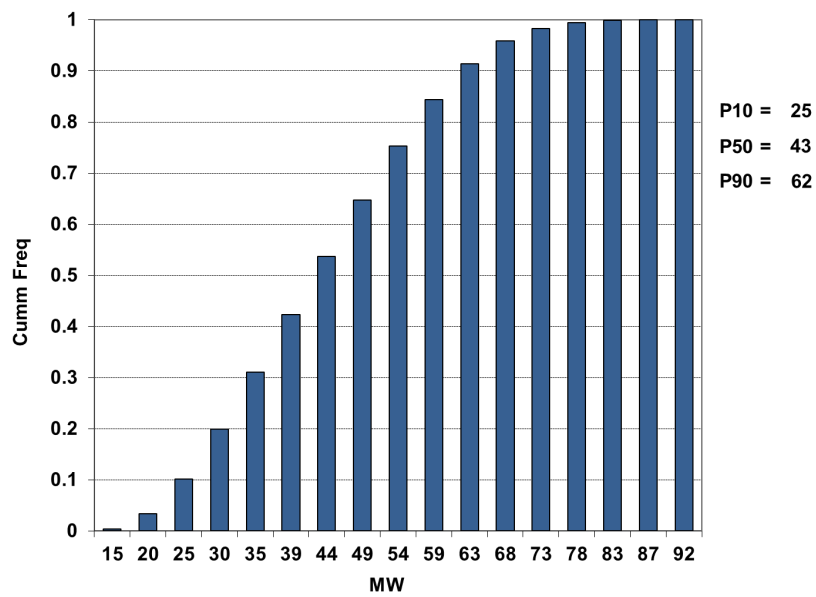
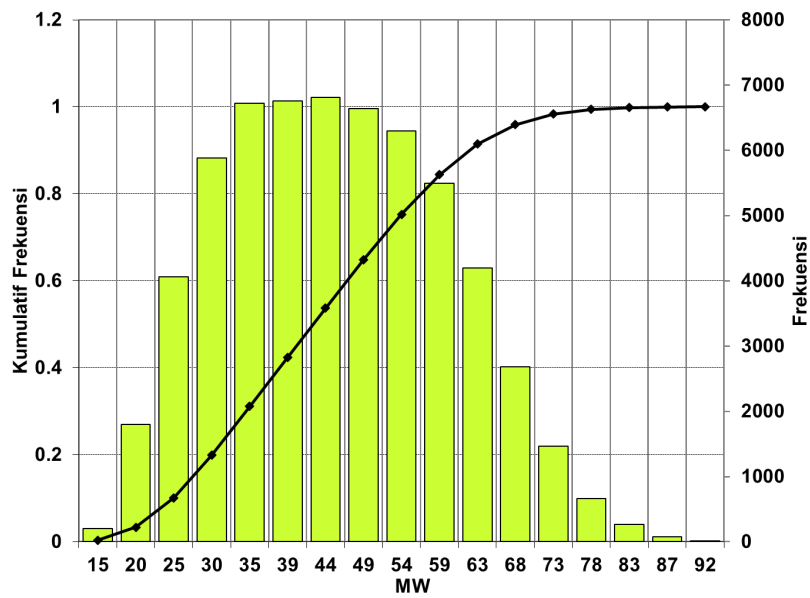
diperoleh dari korelasi antara faktor pemulihan dan porositas, nilainya sekitar 0,2 hingga 0,25. Waktu proyek lapangan panas bumi Danau Ranau diasumsikan sekitar 30 tahun. Detail tentang parameter yang dimasukkan ke simulasi Monte Carlo seperti yang terlihat pada Tabel II.1

Model numerik berdasarkan simulasi Monte Carlo, menggunakan 60.000 angka acak, ditentukan oleh jenis peringkat tingkat kepercayaan (P10, P50, dan P90). Tingkat kepercayaan tertinggi masing-masing dari P10, P50, dan P90. Nilai parameter input untuk simulasi Monte Carlo ditunjukkan pada Tabel 3. Nilai P10 adalah 25 MW, P50 adalah 43 MW, dan P90 adalah 62 MW, disajikan juga dalam Gambar II.10. Berdasarkan perhitungan simulasi Monte Carlo, potensi panas bumi dari lapangan panas bumi Danau Ranau lebih rendah dari 25 MW untuk tingkat kepercayaan tertinggi.

Tabel II. 1 Parameter Input Simulasi Monte Carlo

Parameter	Min	Max	Most	Notes
Area (km <sup>2</sup> )	14	17	15	Area with temperatures of 200-220°C
Thickness (m)	700	900	-	Layers with temperatures of 200-220°C
Rock Density (kg/cu-m)	2500	2600	-	Layers with temperatures of 200-220°C
Porosity (fraction)	0.08	0.1	-	Layers with temperatures of 200-220°C
Rock Heat Capacity (kJ/(kg.°C))	1		-	Layers with temperatures of 200-220°C
Life Time (years)	30		-	Common assumption
Recovery Faktor (fraction)	0.2	0.25	-	Sarmiento (2013)
Electricity Efficiency (fraction)	0.09	0.1	-	Sarmiento (2013)

Ti (°C)	200	220	-	Temperatur distribution based from numerical model.
Tf (°C)	120	180	-	Sarmiento (2013)
Water Saturation Initial (fraction)	1		-	SNI 13-6482-2000
Water Saturation Final (fraction)	0.8	0.9	-	Acuna (2008), Reyes (2003)



Gambar II. 10 Distribusi Hasil Simulasi Monte Carlo

## Bab III Tinjauan Pustaka

Pada bab ini akan diuraikan hasil studi literatur yang telah dilakukan oleh peneliti meliputi tinjauan pustaka terkait lapangan panas bumi dengan karakteristik medium enthalpy, pengusahaan panas bumi langsung (*Direct Use*), dan pengusahaan panas bumi tidak langsung (*Indirect Use*).

### III.1 Lapangan Panas Bumi: *Medium Enthalpy*

Sumber daya panas bumi merupakan sumber daya yang langsung berhubungan dengan sumber panas endogen bumi, dengan total aliran panas yang keluar dari dalam bumi sekitar 30 sd 42 TW (Pandeli et al., 2013). Sumber daya panas bumi dapat diklasifikasikan sebagai sistem konvektif (hidrotermal), sistem konduktif dan akuifer dalam (Rubio-Maya et al., 2015). Dalam hal ini, untuk sistem hidrotermal dan sesuai dengan suhu, dimungkinkan untuk membedakan antara sumber daya entalpi tinggi (*high enthalpy*), sedang (*medium enthalpy*) dan rendah (*low enthalpy*). Sumber daya panas bumi yang termasuk dalam kategori sumber daya entalpi tinggi (*high enthalpy*), ketika fluida panas bumi berada di tekanan dan suhu tinggi, yaitu di atas 225 °C (Hochstein, 2000). Ketika fluida panas bumi berada pada suhu antara 125 °C hingga 225 °C, dikenal sebagai sumber entalpi sedang (Hochstein, 2000). Sumber daya entalpi rendah adalah ketika suhu cairan panas bumi di bawah 125 °C (Hochstein, 2000). Panas diambil dari reservoir panas bumi dengan produksi cairan reservoir. Pada permukaan panas ini dapat digunakan dalam berbagai jenis skema pemanfaatan, tergantung pada konten panas per satuan massa (entalpi) dan tekanan cairan. Sumber daya panas bumi dari entalpi tinggi telah digunakan untuk menghasilkan listrik di dunia sejak tahun 1904, tetapi sayangnya eksploitasi telah berfokus hampir seluruhnya pada jenis sumber daya ini, dan proporsi eksploitasi yang kurang terhadap sumber daya dari entalpi menengah dan rendah, hal ini dapat dikarenakan akibat keterbatasan teknologi (Rubio-Maya et al., 2015).

Semua sistem *medium enthalpy* ditandai oleh beberapa konveksi alami, reservoir sepenuhnya berisi air panas (*hot water*). Berdasarkan pada struktur permeabilitas



reservoir, sistem ini mentransfer sejumlah besar panas ke permukaan dan natural losses berada pada kisaran 3 hingga 30 MW. Reservoir yang memindahkan panas dengan laju diatas 10 MW, seringkali berkaitan dengan kedalaman titik didih yang dangkal sehingga mengeluarkan air panas pada permukaan. Pada kasus lapangan dengan zona fraktur permeabel ditutupi oleh sedimen yang mengandung lapisan dengan permeabilitas rendah atau zona fraktur terjadi di medan yang lebih curam, fluida panas sering kali keluar melalui lapisan permeabel dangkal pada struktur horizontal dan membentuk aliran lateral yang tersembunyi. Air panas dapat dihasilkan dari aliran jalur outflow ini sebagai "reservoir sekunder" jika reservoir primer (zona fraktur) tidak dapat diakses. Beberapa klasifikasi sistem panas bumi medium enthalpy adalah Sistem Zona Patahan *Narrow Fracture Zone Reservoir*, Sistem Zona Patahan dengan Temperatur Tinggi pada *Sweep Base*, Sistem Zona Patahan *Wide Fracture Zone*, Sistem Temperatur Sedang, Sistem Zona *Fracture Wide* pada *Steep Terrain* dan *Outflows* dari Sistem Temperatur Tinggi dan Sedang (Hochstein, 2000).

### **III.2 Pengusahaan Panas Bumi Langsung (Direct Use)**

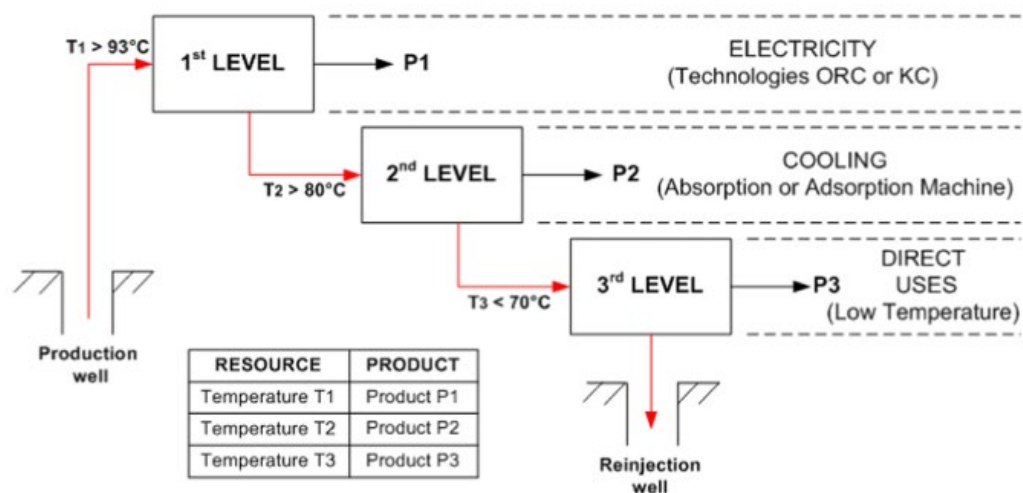
Pemanfaatan langsung energi panas bumi merupakan cara tertua dan paling serbaguna untuk memanfaatkan energi panas bumi dari entalpi menengah dan rendah. Tren penggunaan langsung saat ini terutama untuk sistem pemanas yang bekerja secara langsung atau melalui pompa panas, akuakultur, mengeringkan tanaman, menanam tanaman dan sayuran di rumah kaca, proses industri kertas dan semen, pemrosesan makanan, pembuatan bir, pewarnaan kain, pencairan salju, pendinginan ruang dan balneologi. Penting untuk disebutkan bahwa dalam beberapa kasus potensi sumber daya entalpi menengah dan rendah belum digunakan untuk pembangkit listrik karena biaya awal yang tinggi dan ketersediaan teknologi yang terbatas.

Salah satu usaha mengoptimalkan pemanfaatan energi panas bumi secara langsung adalah penggunaan sistem kaskade. Sistem kaskade merupakan integrasi sistem pemanfaatan pada aplikasi yang bertingkat dari aplikasi yang membutuhkan temperatur tinggi sampai dengan aplikasi yang dengan kebutuhan temperatur kerja

yang rendah. Pemilihan sistem kaskade ditujukan untuk meningkatkan pemanfaatan energi yang lebih efektif.

### III.2.1 Definisi dan Keuntungan Sistem Kaskade

Pemanfaatan kaskade energi panas bumi sebagaimana yang terlihat pada Gambar II.1 adalah pengaturan berurutan dalam penggunaan energi pada tingkat panas yang berbeda guna mendapatkan beberapa produk. Implementasi kaskade bisa jadi merupakan metode dalam mengoptimalkan penggunaan energi secara rasional, untuk memaksimalkan pemanfaatan sumber daya panas bumi dari entalpi menengah dan rendah, untuk mengurangi konsumsi energi primer yang diperoleh dari bahan bakar fosil dan untuk mengurangi biaya dan gas berbahaya emisi ke atmosfer. Pemanfaatan kaskade sumber daya panas bumi memungkinkan memperoleh beberapa produk dari satu sumber daya tunggal atau menyambung ke sumber terbarukan lainnya, sehingga memiliki pemanfaatan dan penghematan energi yang lebih baik, dan menghindari konsumsi berlebihan sumber daya tak terbarukan. Pemanfaatan kaskade berhubungan dengan kasus tertentu dari sistem energi terintegrasi, juga dikenal sebagai sistem poligenerasi, yang berfokus pada prinsip penggunaan satu atau lebih sumber daya energi untuk menyediakan berbagai produk lebih efisien daripada sistem konvensional.



Gambar III. 1 Diagram Konsep Pemanfaatan Kaskade Energi Panas Bumi

### III.2.2 Karakteristik Sistem Kaskade

Terdapat beberapa metode memanfaatkan energi panas bumi secara kaskade, tetapi secara umum, sistem kaskade dengan produksi listrik dan penggunaan termal dan sistem kaskade yang hanya terdiri dari penggunaan termal adalah dua metode utama yang sering diimplementasikan. Sistem kaskade dengan produksi listrik cocok ketika sumber daya panas bumi memiliki suhu lebih dari 90°C, dengan lebih banyak peluang untuk mengintegrasikan berbagai tingkat termal seiring kenaikan suhu. Sistem kaskade dengan hanya penggunaan termal sesuai untuk sumber daya panas bumi dengan suhu di bawah 90°C. Namun, ini bukan batasan karena dimungkinkan untuk hibridisasi sistem dengan sumber terbarukan lainnya, energi surya, meningkatkan panas geotermal hingga mencapai persyaratan untuk menghasilkan listrik. Semua kasus yang dijelaskan dalam ulasan ini menggunakan sumber daya panas bumi dengan suhu berkisar antara 65,5 -162°C, dengan pengecualian dari Islandia dan Selandia Baru yang melaporkan suhu 240 - 380°C yang khas dari sumber daya entalpi tinggi. Fakta ini menegaskan bahwa pemanfaatan kaskade paling tepat untuk mempromosikan pemanfaatan berkelanjutan dari sumber daya panas bumi entalpi rendah hingga menengah.

Beberapa contoh penerapan kaskade di seluruh dunia adalah sebagai berikut

- a. **Afrika:** Kisaran suhu yang cocok untuk penggunaan langsung *cascading* adalah 89°C pada suhu kepala sumur dan outlet untuk level terakhir dari kaskade 50°C. Namun, konsep kaskade dapat diperpanjang yang terdiri dari produksi listrik, ketika sumber daya panas bumi memiliki 120°C. Standar kehidupan masyarakat pedesaan yang terletak di dekat zona panas bumi dapat ditingkatkan secara substansial dengan mempertimbangkan pengembangan artisanal dan industri untuk membentuk konsep baru yang dikenal sebagai Desa Geothermal. Kondisi iklim sangat memengaruhi beberapa penggunaan seperti pemanasan ruang, tidak dilaporkan
- b. **Amerika:** Sebagian besar sistem yang dilaporkan telah memasukkan produksi listrik di tingkat pertama kaskade, dengan pengecualian Meksiko dan Klamath Falls (Oregon, AS) yang melaporkan bahwa sumur dangkal dengan suhu kurang dari 98°C sesuai untuk pertanian dan penggunaan langsung budidaya dalam tingkat termal yang berbeda. Namun, jika suhu berkisar antara 90°C dan 150°C

siklus biner atau siklus rankine organik dapat diintegrasikan meningkatkan tingkat kaskade. Dalam hal ini, sumur tua atau sumur eksplorasi yang sudah dibor yang tidak cocok untuk pembangkit listrik dapat dioperasikan mengurangi biaya modal. Dalam beberapa kasus, penggunaan akhir atau produk dalam sistem kaskade dikondisikan oleh zona iklim. Itu adalah kasus mata air panas Chena, di mana dimungkinkan menghasilkan es dengan menggunakan mesin penyerapan dan bagian dari panas yang ditolak digunakan sebagai tingkat kedua untuk rumah kaca. Kinerja sistem ini meningkat secara substansial karena air pendingin untuk penyerap dan kondensor dari mesin penyerapan diambil dari sungai yang suhunya hampir konstan dengan 4°C.

- c. **Asia:** Sistem yang dideskripsikan untuk wilayah ini menggunakan sumber daya panas bumi entalpi sedang dengan suhu serendah 83°C, cocok untuk produksi listrik di tingkat pertama kaskade. Suhu fluida panas bumi untuk sistem kaskade di Asia berkisar antara 83°C dan 140°C. Menurut penelitian yang berkaitan dengan China, dimungkinkan menggunakan sumur minyak sebagai sumur panas bumi yang memasok panas untuk pembangkit kaskade yang berinteraksi dengan proses minyak dan mengganti boiler minyak. Di sisi lain, suhu lingkungan adalah faktor kunci dalam kinerja pembangkit kaskade, seperti dalam kasus Thailand di mana output daya di musim panas berkurang hingga 50% peningkatan panas yang ditolak untuk tingkat kedua. Keuntungan utama dari energi panas bumi yang mengalir dalam semua kasus yang dijelaskan untuk Asia adalah ekonomi dan lingkungan.
- d. **Europe:** Karena karakteristik geografis dan iklimnya, Eropa tidak diragukan lagi memiliki variasi aplikasi terluas untuk penggunaan kaskade energi panas bumi menengah dan rendah entalpi. Penggunaan langsung utama yang diimplementasikan dalam sistem kaskade Eropa adalah memanaskan jaringan, rumah kaca dan balneologi, karena kebutuhan khusus benua tersebut. Saat ini, pemanasan distrik panas bumi memiliki pangsa sekitar 58% dari total solusi kaskade Eropa. Negara-negara yang menunjukkan penggunaan kaskade terbesar adalah Islandia, Austria, Yunani dan Rumania. Perlu dicatat bahwa penerapan teknologi ini memberikan penggunaan energi dengan kualitas yang lebih baik di mitra dengan biaya investasi yang lebih tinggi. Fitur lain untuk

benua ini adalah pengembangan teknologi canggih dan penelitian berkelanjutan yang memungkinkan penerapan sistem kaskade untuk sektor perumahan, industri, pemerintah dan layanan publik serta pertanian. Standar hidup juga memungkinkan lebih fokus pada kegiatan rekreasi dan rekreasi yang diintegrasikan dengan penggunaan kaskade lain

- e. **Oceania:** Untuk wilayah ini dilaporkan pemanfaatan kaskade sumber daya panas bumi entalpi tinggi. Dalam hal ini dimungkinkan untuk menghasilkan listrik tidak hanya pada tingkat pertama kaskade tetapi juga pada tingkat menengah yang berinteraksi dengan proses pulp dan kertas pada tingkat termal yang berbeda serta pengeringan produk kayu. Sistem ini menunjukkan bahwa penggunaan kaskade dapat sesuai untuk industri dengan jumlah uap dan air panas yang tinggi dan permintaan listrik yang rendah.

### **III.2.3 Pemanfaatan Integrasi dan Sistem Hibrid**

Pemanfaatan kaskade ini telah menginisiasi penerapan konsep baru untuk penggunaan integral dari sumber daya panas bumi, seperti dalam kasus apa yang disebut Desa Panas Bumi, yang bertujuan untuk mengembangkan pemukiman manusia sedekat mungkin ke tempat di mana sumber daya panas bumi ditemukan. Desa Panas Bumi disajikan bersifat mandiri dari sudut pandang energi, selain menghasilkan berbagai kegiatan ekonomi di sekitar penggunaan energi panas bumi dan mempromosikan pembangunan ekonomi dan sosial masyarakat. Konsep terkait lainnya adalah penciptaan layanan multi-pusat termasuk gym, kolam spa dan spa, termasuk rumah kaca dan kegiatan akuakultur. Dalam multicenters ini, dimungkinkan untuk menggabungkan penggunaan sumber-sumber terbarukan lainnya, seperti energi matahari baik termal maupun fotovoltaik.

### **III.2.4 Kelebihan dan Kekurangan Sistem Kaskade**

Secara umum, dapat dinyatakan bahwa kasus-kasus yang disajikan memiliki titik konvergensi manfaat yang diperoleh dari bentuk pemanfaatan sumber daya panas bumi ini. Manfaat utama yang dapat digarisbawahi adalah peningkatan profitabilitas fasilitas, pemanfaatan maksimal sumber daya panas bumi dari entalpi menengah dan rendah, pengembangan masyarakat lokal dan kota, serta manfaat

sosial dan lingkungan. Selain itu, dimungkinkan juga untuk menggunakan berbagai teknologi dan proses yang diaktifkan secara termal, yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan masing-masing kasus tertentu. Penting untuk disebutkan bahwa dalam beberapa kasus, potensi entalpi menengah dan rendah belum digunakan untuk pembangkit listrik karena biaya awal yang tinggi dan ketersediaan teknologi yang terbatas, hanya menggunakan energi panas bumi untuk aplikasi penggunaan langsung. Di sisi lain, kondisi iklim sangat mempengaruhi beberapa penggunaan panas bumi seperti pemanasan ruang atau pemanasan distrik. Standar hidup juga merupakan faktor penting karena penggunaan rekreasi paling tepat untuk negara maju.

### **III.3 Pengusahaan Panas Bumi Tidak Langsung (*In-direct Use*)**

Pada suatu lapangan panas bumi, energi yang tersedia di dalam reservoir panas bumi merupakan energi panas yang terkandung dalam fluida panas bumi. Pembangkit listrik tenaga panas bumi merupakan suatu teknologi yang digunakan untuk mengkonversi energi panas dari fluida panas bumi menjadi energi listrik. Pemilihan teknologi pembangkit yang tepat harus dilakukan sehingga sumber daya yang tersedia dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Pembangkit listrik tenaga panas bumi terbagi dalam dua kategori utama yaitu *steam cycle power plant* dan *binary cycle power plant* (Einar Tjörvi Eliasson, 2011). *Steam cycle power plant* digunakan untuk mengkonversi energi panas dalam fluida panas bumi menjadi energi listrik. Sistem ini menggunakan uap hasil pemisahan di separator atau memanfaatkan fluida uap secara langsung dari sumbernya apabila fluida keluaran sumur panas bumi merupakan uap. Jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi lainnya adalah *binary cycle*. Pembangkit ini tidak seperti pembangkit listrik yang telah dijelaskan sebelumnya, sistem binary tidak memanfaatkan fluida panas bumi secara langsung tetapi fluida panas bumi digunakan untuk menguapkan fluida sekunder di dalam sistem pembangkit dengan menggunakan *heat exchanger*. Uap fluida sekunder yang kemudian menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik.

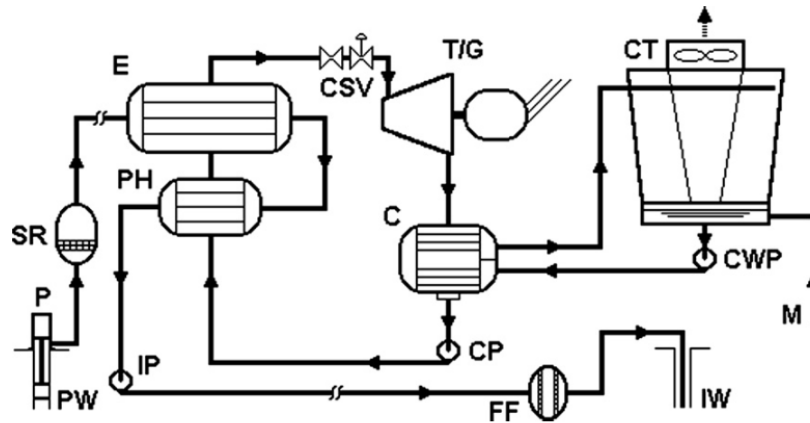
Pemilihan desain sistem pembangkit panas bumi yang diterapkan pada suatu lapangan panas bumi saat ini dapat dilihat juga dari temperatur sumber panas yang dimiliki oleh suatu lapangan panas bumi. Sistem dasar yang digunakan dalam desain pembangkit listrik tenaga panas bumi terbagi dalam tiga jenis yaitu (Eliasson dkk., 2011)

- a. *Flashed steam/dry steam condensing system*, sistem ini dapat digunakan apabila temperatur dari sumber panas bumi berkisar 230-320°C.
- b. *Flashed steam back pressure system*, sistem ini dapat digunakan apabila temperatur dari sumber panas bumi berkisar 200-320°C.
- c. *Binary or twin-fluid system* (Kalina atau *Organic Rankine cycle*), sistem ini dapat digunakan apabila temperatur dari sumber panas bumi 120-190°C.

### III.3.1 Sistem Biner

Sistem biner merupakan jenis pembangkit yang berbeda dengan jenis-jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi pada umumnya. Jenis pembangkit ini tidak memanfaatkan fluida panas bumi secara langsung untuk menghasilkan listrik. Pada pembangkit ini, energi panas yang terkandung dalam fluida panas bumi digunakan untuk memanaskan fluida sekunder atau yang umum disebut dengan fluida kerja dengan titik didih yang lebih rendah jika dibandingkan dengan air. Fluida kerja dipanaskan hingga berubah menjadi fasa uap dengan menggunakan *Heat exchanger*. Uap yang terbentuk dari fluida kerja tersebut yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik.

Terdapat dua jenis sistem biner yang umum digunakan dalam sistem panas bumi yaitu *Organic Rankine Cycle* (ORC) dan *Kalina Cycle*. Sistem biner pada umumnya digunakan untuk memanfaatkan sumber daya panas bumi dengan yang memiliki entalpi rendah-menengah atau digunakan sebagai *bottoming unit* untuk memanfaatkan panas yang terkandung di dalam *brine* setelah keluar dari separator. Penggunaan sistem biner sebagai *bottoming unit* dari suatu pembangkit dapat meningkatkan daya yang dihasilkan oleh sistem sehingga fluida panas bumi dapat dimanfaatkan secara efektif dan efisien. Skematik diagram untuk *binary cycle power plant* dapat dilihat pada Gambar III.2 berikut ini.



Gambar III. 2 Skema diagram pembangkit listrik sistem siklus biner  
(Sumber: DiPippo, 2015)

Dalam pemanfaatannya, sistem ini memiliki tingkat efisiensi dari sistem yang rendah namun memiliki kelebihan yaitu tidak adanya fluida panas bumi yang hilang selama proses. Fluida panas bumi yang telah digunakan untuk proses kemudian akan diinjeksikan kembali kedalam reservoir untuk mempertahankan keberlangsungan dari sistem panas bumi itu sendiri. Kelebihan lain dari sistem ini adalah tidak ada fluida yang terbang ke lingkungan sehingga sistem ini memungkinkan untuk tidak adanya dampak buruk ke lingkungan.

#### a. Komponen Sistem

Dalam sistem ORC sederhana, dibutuhkan komponen penyusun suatu sistem untuk mendukung proses konversi energi. Komponen-komponen tersebut adalah sebagai berikut (Fuad, 2015):

- 1) **Turbin** yang berfungsi untuk mengubah energi panas dari fluida kerja ke energi mekanik pada shaft turbin.
- 2) **Generator** yang berfungsi untuk mengubah energi mekanik dari shaft turbin menjadi energi listrik.
- 3) **Kondenser** yang berfungsi untuk mendinginkan fluida kerja yang keluar dari turbin dan mengubah fluida kerja ke dalam kondisi cair jenuh.
- 4) **Pompa** yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida kerja. Pada sistem ORC sederhana, tekanan fluida kerja ditingkatkan menjadi sebesar nilai tekanan masuk turbin.

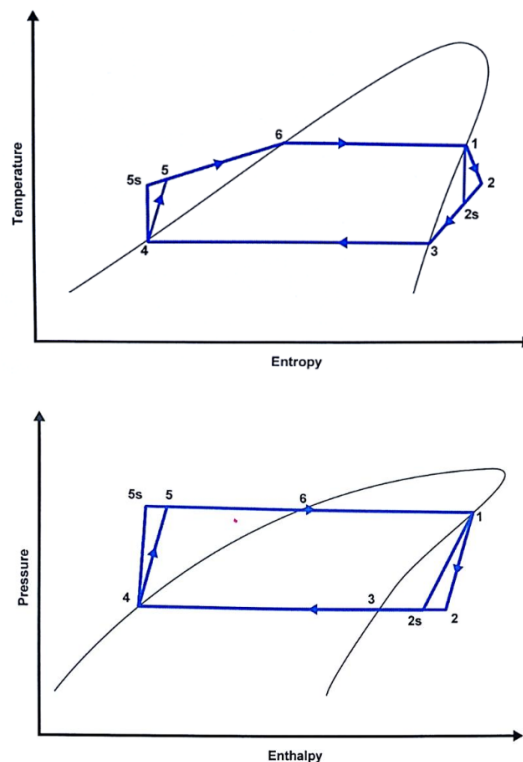


5) *Heat exchanger* yang berfungsi untuk mentransfer panas dari *brine* ke fluida kerja. Dalam sistem ORC sederhana terdapat dua unit *heat exchanger* yaitu:

- i) *Pre-heater* yang berfungsi untuk meningkatkan temperatur fluida dan mengubah fasa fluida menjadi cair jenuh.
- ii) *Evaporator* yang berfungsi untuk menguapkan fluida kerja yang akan digunakan untuk menggerakkan turbin.

b. Analisis Termodinamika Sistem

Suatu sistem pembangkit dapat dianalisa dengan mempelajari proses termodinamika yang umumnya digambarkan dengan diagram temperatur-entropi atau T-s dan tekanan-entalpi atau P-h. Diagram T-s proses termodinamika sistem ORC sederhana dan diagram p-h proses termodinamika sistem ORC sederhana ditunjukkan pada Gambar III.3 berikut ini.



Gambar III. 3 Diagram T-s dan Diagram P-h sistem ORC sederhana  
(Sumber: Fuad, 2015)

Dapat dilihat pada diagram P-h yang tersaji dalam Gambar III. 3, sistem ORC bekerja pada dua nilai tekanan. Untuk mencapai kondisi pemanfaatan optimum,

salah satu parameter penting dalam mendesain sistem ORC adalah tekanan kerja fluida. Secara matematis, nilai tekanan kerja dalam sistem ORC dapat ditulis menjadi:

$$P_1 = P_5 = P_{5s} = P_6 = P_{high}$$

$$P_2 = P_{2s} = P_3 = P_4 = P_{low}$$

Di sisi lain, hubungan antar kondisi juga dapat ditinjau dengan melihat diagram T-s seperti yang tersaji dalam Gambar III.3. Pada saat fluida berada pada kondisi jenuh, fluida kerja tidak mengalami perubahan temperatur seperti yang dituliskan berikut ini:

$$T_1 = T_6$$

$$T_3 = T_4$$

Perhitungan dan analisa matematis untuk setiap komponen sistem ORC akan dijelaskan pada pembahasan berikut ini. Perhitungan didasarkan pada pembahasan sistem ORC dalam buku Ronald DiPippo (DiPippo, 2008).

### **Analisis Turbin**

Turbin merupakan perangkat utama dalam proses pembangkitan listrik dengan menggunakan sistem ORC. Perhitungan di turbin dikaitkan dengan besar energi yang akan dibangkitkan oleh sistem. Daya yang dihasilkan dari proses ekspansi fluida kerja di dalam turbin dengan asumsi perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan, proses tunak (*steady state*), dan adiabatik adalah

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) \quad (III.1)$$

Dimana  $\dot{W}_t$  adalah besar energi listrik yang dibangkitkan oleh sistem (kJ/s),  $\dot{m}_{wf}$  adalah laju alir massa fluida kerja (kg/s),  $h_1$  adalah entalpi fluida kerja masuk turbin (kJ/kg), dan  $h_2$  adalah entalpi fluida kerja keluar turbin.

Untuk menentukan kondisi keluaran turbin, langkah pertama yang harus lakukan adalah menentukan kondisi ideal fluida kerja ketika keluar dari turbin. Suatu proses dikatakan ideal jika proses terjadi secara reversible. Jika proses terjadi secara reversible maka nilai entropi sepanjang proses tidak berubah. Kondisi tersebut dikenal sebagai isentropik dan sering diberi label 2s. Berdasarkan kondisi tersebut, nilai parameter untuk kondisi 2s dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_{2s} = P_{low}$$

$$s_{2s} = s_1$$

Proses yang terjadi di dalam turbin tidak selalu berada pada kondisi ideal. Untuk menunjukkan ketidaksempurnaan proses, diperkenalkan parameter efisiensi turbin.

$$\begin{aligned} \dot{W}_t &= \eta_t \cdot \dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_{2s}) \\ &= \dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_2) \\ h_2 &= h_1 + \eta_t (h_1 - h_{2s}) \end{aligned} \quad (III.2)$$

### Analisis Kondensor

Kondenser merupakan komponen pembangkit yang berfungsi untuk mendinginkan fluida kerja keluaran turbin dan mengubahnya menjadi fasa cair. Terdapat dua jenis pendingin berdasarkan jenis fluida pendinginnya yaitu (Berutu, 2013):

- Sistem pendinginan basah, dimana fluida kerja dikondensasikan dengan air pendingin.
- Sistem pendinginan kering, dimana fluida kerja dikondensasikan dengan bantuan udara dari lingkungan sehingga panas dari fluida kerja akan terbang langsung ke udara. Pada sistem ini, tidak dibutuhkan air pendingin tetapi memerlukan luas permukaan perpindahan panas yang besar dan beban listrik untuk kipas pendingin.

Jumlah panas yang harus dibuang dari fluida kerja ke media pendingin ( $Q_{cs}$ ) yang merupakan air atau udara dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut ini

$$\dot{Q}_{cs} = \dot{m}_{wf} \cdot (h_2 - h_4) \quad (III.3)$$

Dari hukum kekekalan massa diperoleh persamaan:

$$\dot{m}_{cw} \cdot (h_y - h_x) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_2 - h_4) \quad (III.4)$$

Atau

$$\dot{m}_{cw} \cdot \bar{c} \cdot (T_y - T_x) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_2 - h_4) \quad (III.5)$$

Qcs menyatakan besar kalor yang dibuang di kondensor (kJ/s),  $\dot{m}_{wf}$  adalah laju alir massa fluida kerja (kg/s),  $h_2$  adalah entalpi fluida kerja masuk condenser (kJ/kg),  $h_4$  adalah entalpi fluida kerja keluar kondensor (kJ/kg),  $\dot{m}_{cw}$  adalah laju alir massa fluida pendingin (kg/s),  $h_x$  entalpi fluida pendingin keluar kondensor (kJ/kg),  $h_y$  adalah entalpi fluida pendingin masuk kondensor (kJ/kg),  $T_y$  adalah temperatur fluida pendingin keluar kondenser (°C),  $T_x$  adalah temperatur fluida pendingin masuk kondensor (°C), dan  $\bar{c}$  adalah panas spesifik fluida pendingin (kJ/kg.K). Nilai  $\bar{c}$  fluida pendingin akan dianggap konstan karena rentang temperatur yang kecil antara kondisi masuk dan keluar.

### Analisis Pompa

Pompa berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida kerja hingga dapat memenuhi tekanan fluida kerja masuk turbin. Pompa memerlukan kerja dari luar agar dapat bekerja. Besar kerja yang dibutuhkan oleh pompa ( $W_p$ ) adalah

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf} \cdot (h_5 - h_4) \quad (\text{III.6})$$

Dimana  $W_p$  adalah esar energi yang diperlukan pompa (kJ/s),  $\dot{m}_{wf}$  laju alir massa fluida kerja (kg/s),  $h_5$  adalah entalpi fluida kerja masuk pompa (kJ/kg), dan  $h_4$  adalah entalpi fluida kerja keluar pompa (kJ/kg).

Ketidaktepurnaan kerja pada pompa meningkatkan jumlah kerja luar yang diperlukan. Untuk merepresentasikan hal ini, diperkenalkan faktor efisiensi pompa. Faktor ini diaplikasikan pada kondisi keluaran pompa yang ideal (5s). Parameter pada kondisi ini adalah:

$$P_{5s} = P_{high}$$

$$s_{5s} = s_4$$

Dengan menggunakan faktor ini, kondisi keluar pompa dapat diperkirakan

$$\dot{W}_p = \frac{1}{\eta_p} \cdot \dot{m}_{wf} \cdot (h_{5s} - h_4)$$

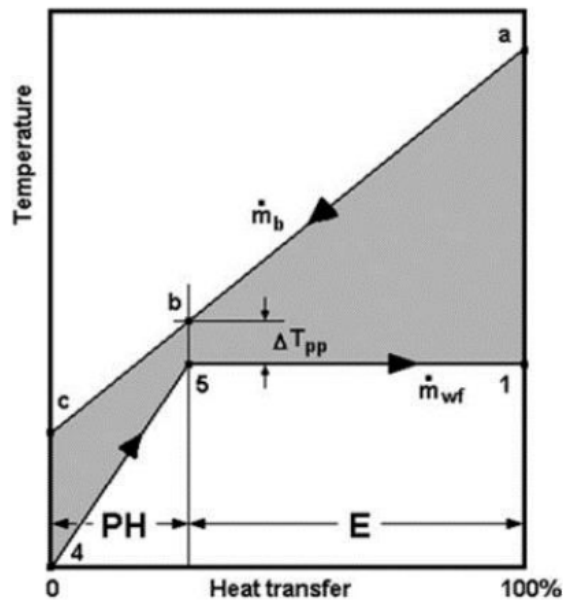
$$= \dot{m}_{wf} \cdot (h_5 - h_4)$$

$$h_5 = h_4 + \frac{1}{\eta_p} (h_{5s} - h_4) \quad (\text{III.7})$$

### Analisis *Heat Exchanger*

*Heat exchanger* adalah komponen pembangkit yang digunakan untuk mentransfer panas dari *brine* ke fluida kerja untuk digunakan dalam sistem. Desain *heat exchanger* yang baik perlu dilakukan sehingga tidak terjadi penurunan temperatur yang drastis pada *heat exchanger*. Dalam aplikasi untuk industri panas bumi, sistem ORC menggunakan dua unit *Heat exchanger* yaitu *pre-heater* dan evaporator.

Hubungan antara kedua *heat exchanger* dengan *brine* digambarkan pada Gambar III.4. Pada gambar tersebut tersaji persentase transfer panas yang terjadi yaitu pada sumbu-x dan temperatur fluida yang tersaji pada sumbu y. Dalam proses desain *Heat exchanger*, terdapat faktor penting yang perlu diperhatikan yaitu perbedaan temperatur antara kondisi b dari *brine* yaitu kondisi *brine* setelah meninggalkan evaporator dan kondisi 6 dari fluida kerja yang merupakan kondisi fluida kerja setelah meninggalkan *pre-heater* menuju ke evaporator. Perbedaan temperatur ini dikenal dengan istilah *pinch-point* atau perbedaan temperatur ( $\Delta T_{pp}$ , selanjutnya akan disebut sebagai *pinch-point*).



Gambar III. 4 Temperatur-heat transfer diagram untuk *pre-heater* dan evaporator  
(Sumber: DiPippo, 2015).

Jika meninjau kembali Gambar III.4 dapat dilihat bahwa temperatur keluar *brine* dapat diatur dengan mengubah nilai *pinch-point*. Apabila nilai *pinch-point*

diperbesar akan terjadi peningkatan pada temperatur keluaran *brine* dan menurunkan panas spesifik yang di transfer dari *brine* ke fluida kerja. Hal tersebut menjelaskan bahwa untuk memperoleh jumlah panas yang sama maka diperlukan jumlah *brine* yang lebih banyak. Hal sebaliknya terjadi apabila nilai *pinch-point* diperkecil.

Terdapat beberapa asumsi yang digunakan dalam perhitungan dan analisis *heat exchanger*. Asumsi-asumsi tersebut adalah (Fuad, 2015):

- Heat exchanger* berada pada sistem tertutup. Hal ini berarti bahwa tidak ada panas yang terlepas ke lingkungan.
- Heat exchanger* berada pada kondisi steady state.
- Perubahan energi potensial, kinetik, dan friksi dapat diabaikan.

Sehingga persamaan kekekalan energi untuk *heat exchanger* adalah

$$\dot{m}_b \cdot (h_a - h_c) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_5) \quad (\text{III.8})$$

Dimana  $\dot{m}_b$  adalah laju alir massa *brine* (kg/s),  $h_a$  adalah entalpi *brine* masuk *Heat exchanger* (kJ/kg),  $h_c$  adalah entalpi *brine* keluar *Heat exchanger* (kJ/kg),  $\dot{m}_{wf}$  adalah laju alir massa fluida kerja (kg/s),  $h_5$  adalah entalpi fluida kerja masuk *Heat exchanger* (kJ/kg), dan  $h_1$  adalah entalpi fluida kerja keluar *Heat exchanger* (kJ/kg). Jika *brine* memiliki gas dan padatan terlarut yang rendah, persamaan kiri dapat digantikan dengan perkalian panas jenis rata-rata atau  $\bar{c}$  dan perbedaan temperatur yang dapat dituliskan demikian

$$\dot{m}_b \cdot \bar{c}_b \cdot (T_a - T_c) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_5) \quad (\text{III.9})$$

Dalam proses desain *Heat exchanger*, hal pertama yang dilakukan adalah penentuan laju alir fluida kerja. Perhitungan laju alir fluida kerja dapat dilakukan dengan meninjau seberapa besar daya yang ingin dihasilkan oleh sistem. Nilai tersebut dinotasikan sebagai  $W_{net}$ . Dari hubungan  $W_{net}$  dengan nilai kerja dari tiap komponen sistem ORC, jumlah fluida kerja yang diperlukan dapat ditentukan.

$$\begin{aligned} \dot{W}_{net} &= \dot{W}_t - \dot{W}_p \\ &= \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) - \dot{m}_{wf}(h_5 - h_4) \end{aligned}$$

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{W}_{net}}{(h_1 - h_2) - (h_5 - h_4)} \quad (\text{III.10})$$

Untuk mengetahui berapa laju alir *brine* yang dibutuhkan, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan III.9 dan didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_5)}{\bar{c}_b \cdot (T_a - T_c)} \quad (\text{III.11})$$

Setelah laju alir *brine* diketahui, temperatur keluar *brine* dapat ditentukan dengan meninjau sistem *Heat exchanger* secara keseluruhan yang dituliskan pada persamaan III.9

$$T_c = T_a - \frac{\dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_5)}{\dot{m}_{wf} - \bar{c}_b} \quad (\text{III.12})$$

Apabila kedua penukar kalor yang dalam hal ini adalah pre-heater dan evaporator ditinjau secara terpisah, maka persamaan untuk masing-masing komponen adalah sebagai berikut:

$$\text{Pre - heater: } \dot{m}_b \cdot \bar{c}_b (T_b - T_c) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_6 - h_5) \quad (\text{III.13})$$

$$\text{Evaporator: } \dot{m}_b \cdot \bar{c}_b (T_a - T_b) = \dot{m}_{wf} \cdot (h_1 - h_6) \quad (\text{III.14})$$

Luas permukaan perpindahan panas di evaporator antara kedua fluida ( $A_E$ ) dapat ditentukan dari hubungan perpindahan panas dasar

$$\dot{Q}_E = \bar{U} \cdot A_E \cdot LMTD_E \quad (\text{III.15})$$

Dimana

$\dot{Q}_E = \text{Energi pada evaporator}$

$\bar{U} = \text{koefisien perpindahan panas total}$

$LMTD = \text{Log - mean - temperature difference}$

LMTD atau Log-mean-temperatur difference diperoleh dari persamaan berikut ini

$$LMTD_E = \frac{(T_a - T_1) - (T_b - T_6)}{\ln \left[ \frac{(T_a - T_1)}{(T_b - T_6)} \right]} \quad (\text{III.16})$$

Dan laju perpindahan panas evaporasi adalah

$$\dot{Q}_E = \dot{m}_b \cdot \bar{c}_b \cdot (T_a - T_b) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_6) \quad (\text{III.17})$$

Persamaan untuk pre-heater juga diperoleh dengan cara yang sama yaitu

$$\dot{Q}_{PH} = \bar{U} \cdot A_E \cdot LMTD_{PH} \quad (\text{III.18})$$

LMTD atau *Log-mean-temperatur difference* diperoleh dari persamaan berikut ini:

$$LMTD_{PH} = \frac{(T_b - T_6) - (T_c - T_4)}{\ln \left[ \frac{(T_b - T_5)}{(T_c - T_4)} \right]} \quad (\text{III.19})$$

Dan laju perpindahan panas pre-heater adalah

$$\dot{Q}_{PH} = \dot{m}_b \cdot \bar{c}_b \cdot (T_b - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_6 - h_5) \quad (\text{III.20})$$



## **Bab IV Metodologi Penelitian**

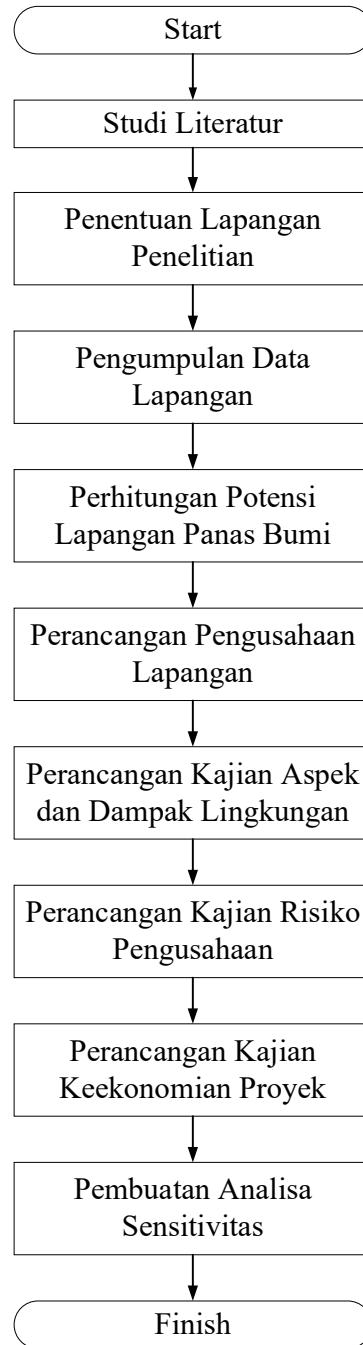
Pada bab ini akan diuraikan rangkaian tahapan pada penelitian dengan judul Pre-Feasibility Studi Untuk Medium Entalpi, dengan studi kasus pada Lapangan Panas Bumi Danau Ranau. Pada penelitian ini, peneliti melalui berbagai tahapan mulai dari studi literature, menentukan lapangan penelitian, mengumpulkan data lapangan seperti data geologi, geokimia, geofisika dan rona awal lapangan serta analisa integrasi 3G lapangan, merancang model perusahaan lapangan baik perusahaan langsung (*direct use*) maupun tidak langsung (*indirect use*), melakukan kajian aspek dan dampak lingkungan, melakukan analisa sensitivitas, melakukan kajian keekonomian proyek sampai dengan melakukan kajian risiko perusahaan pada lapangan penelitian. Adapun rangkaian tahapan pada penelitian ini sesuai dengan *flowchart* pada Gambar IV.1

### **IV.1 Studi Literatur**

Tahapan studi literatur yang dilakukan peneliti meliputi pengumpulan informasi dan kajian terkait informasi umum sebaran energi panas bumi di Indonesia, kebutuhan pengusahaannya sampai dengan informasi khusus terkait lapangan panas bumi medium enthalpy di Indonesia dan peluang pengembangannya. Selain itu peneliti juga melakukan studi literatur terkait contoh perusahaan lapangan panas bumi dengan karakteristik *medium to low enthalpy* di dunia dengan tujuan mengambil *lesson learned* dan menjadikan inputan dalam perancangan perusahaan di lapangan penelitian. Selain itu, peneliti juga melakukan studi literatur terkait model perusahaan langsung dan tidak langsung pada lapangan dengan karakteristik *medium enthalpy*.

### **IV.2 Penentuan Lapangan Penelitian**

Setelah melakukan *lesson learned*, tahapan berikutnya adalah menentukan lapangan penelitian dengan karakteristik *medium enthalpy* dan mengumpulkan data pendukung seperti rona awal dan data geologi, geokimia dan geofisika. Lapangan yang dipilih adalah lapangan panas bumi Danau Ranau sebagaimana yang telah dibahas pada Bab II Kajian Lapangan Penelitian.



Gambar IV. 1 Flow Chart Metodologi Penelitian

### IV.3 Pengumpulan Data Lapangan

Pada tahapan ini, peneliti melakukan pengumpulan data lapangan penelitian yang meliputi data rona awal dan data geologi, geokimia, dan data geofisika. Sebagaimana yang telah peneliti sampaikan pada Bab 1.4 Batasan Masalah, peneliti tidak melakukan analisa kajian geologi, geokimia dan geofisika dalam memprediksi

sistem panas bumi yang terdapat di lapangan Danau Ranau baik meliputi jenis dan temperatur fluida geothermal, area prospek dan model konseptual. Seluruh data dan analisa kajian rona awal, geologi, geokimia dan geofisika pada penelitian ini merupakan data sekunder yang didapat dari berbagai sumber baik laporan, jurnal maupun *paper*. Adapun data rona awal yang dikumpulkan merupakan data kondisi wilayah sekitar lapangan penelitian meliputi data iklim dan cuaca, curah hujan, statistic jumlah dan pertumbuhan penduduk, statistic mata pencaharian penduduk, trend tingkat kemiskinan dan Pendidikan, akses, kondisi dan sarana transportasi, objek wisata, kondisi lahan, komoditi, dan kondisi serta proyeksi kelistrikan.

#### **IV.4 Perhitungan Potensi Lapangan Panas Bumi**

Perhitungan potensi lapangan panas bumi sesuai SNI 6009 – 2017 dengan menggunakan metode *heat stored* dengan simulasi Monte Carlo, sehingga didapat beberapa besar energi yang dapat dihasilkan dalam kurun waktu masa pemanfaatan yang ditetapkan yaitu 30 tahun. Oleh karena lapangan penelitian merupakan lapangan yang belum mempunyai sumur eksplorasi, maka berbagai parameter yang digunakan dalam perhitungan potensi diambil dari hasil resource assessment dari kajian integrasi data geologi, geokimia, dan geofisika pada tahapan sebelumnya.

#### **IV.5 Perancangan Pengusahaan Lapangan**

Tahapan perancangan pengusahaan lapangan dilakukan setelah peneliti mempunyai wawasan mengenai model pengusahaan lapangan yang optimum serta didukung informasi dan kajian mengenai karakteristik sistem panas bumi pada lapangan penelitian serta informasi terkait kondisi wilayah sekitar. Setelah melalui tahapan studi literatur sampai dengan tahapan perhitungan potensi, peneliti memutuskan untuk merancang model pengusahaan bertingkat atau yang dikenal dengan sebutan model kaskade. Model kaskade ini memungkinkan pemanfaatan fluida panas bumi seoptimal mungkin yaitu dengan membuat leveling pemanfaatan sebagaimana yang telah dibahas pada bab III sub bab 3.2. Level I pada model kaskade yang dirancang ditujukan untuk *electricity* dengan pengaplikasian sistem biner – ORC. *Brine* keluaran dari ORC akan dijadikan fluida inputan pemanfaatan langsung pada level berikutnya. Rancangan pemanfaatan langsung akan didekatkan dengan perhitungan

temperatur *brine* keluaran dari ORC dengan linal diagram, serta dicocokkan dengan rona awal, terutama terkait komoditi utama dan objek wisata yang dapat dikembangkan di wilayah lapangan penelitian.

#### **IV.6 Perancangan Kajian Aspek dan Dampak Lingkungan**

Pada tahapan ini peneliti melakukan kajian aspek dan dampak lingkungan terhadap model pengusahaan yang dirancang. Dilakukannya kajian aspek dan dampak lingkungan ini adalah sebagai bentuk tanggung jawab dalam upaya pengelolaan dan pemanfaatan lingkungan. Kajian aspek dan dampak lingkungan pada penelitian ini meliputi membuat deskripsi rinci rona lingkungan hidup awal, merancang prakiraan dampak penting, mengevaluasi secara holistic terhadap dampak lingkungan, sampai dengan membuat rencana pengelolaan dan pemantauan lingkungan hidup.

#### **IV.7 Perancangan Kajian Risiko Pengusahaan**

Kajian risiko dilakukan dengan memetakan semua kemungkinan risiko yang terjadi selama masa pengusahaan lapangan. Risiko tersebut dipetakan mulai dari tahapan persiapan, pembangunan sampai dengan pengoperasian selama masa proyek. Setiap risiko kemudian dinilai keberterimaannya, dilihat dari perkalian skala dampak dan kemungkinan terjadi yang kemudian diplot pada matriks risiko. Secara umum pengelompokan risiko dibagi menjadi 4 yaitu risiko rendah, moderat, tinggi dan ekstrim, yang mana hanya risiko rendah dan moderat yang akan diterima. Penilaian skala dampak dan kemungkinan terjadi juga memperhitungkan existing control yang telah dimiliki. Jika ternyata risiko tersebut tidak diterima, peneliti akan merumuskan mitigasi yang dapat dilakukan.

#### **IV.8 Perancangan Kajian Keekonomian Proyek**

Kajian keekonomian proyek dilakukan untuk mengukur keberterimaan proyek dari sisi finansial. Pada kajian keekonomian, peneliti akan membuat model finansial yang menghitung proyeksi finansial terdiri dari struktur pendapatan, kebutuhan anggaran dan model peminjaman dana pengembangan. Struktur pendapatan akan dihitung dari perkalian tarif yang berlaku dan energi yang dihasilkan selama masa proyek. Sedangkan di sisi kebutuhan anggaran, peneliti menguraikan kebutuhan

anggaran mulai dari tahap persiapan dokumen proyek, eksplorasi, pengeboran, pembangunan infrastruktur, sampai dengan pengoperasian selama masa proyek. Perhitungan model pinjaman akan disesuaikan dengan mekanisme pengembangan panas bumi dari PT PLN (persero), mengingat lapangan penelitian yang digunakan adalah lapangan milik PT PLN (persero). Hasil dari kajian keekonomian proyek adalah nilai profitabilitas proyek di sisi PLN, yang diwakili dengan nilai *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate Return* (IRR), *Payback Period*, dan *Return on Investment* (ROI).

#### **IV.9 Pembuatan Analisa Sensitivitas**

Peneliti menyadari bahwa dalam manajemen proyek, bisa saja ada banyak kemungkinan yang mungkin terjadi. Sehingga pada penelitian ini, dibuatlah analisa sensitivitas untuk mengetahui akibat dari perubahan parameter parameter penting terhadap kinerja sistem. Dengan melakukan analisis sensitivitas maka akibat yang mungkin terjadi dari perubahan perubahan tersebut dapat diketahui dan diantisipasi sebelumnya. Pemilihan parameter yang akan disimulasikan pada tahap ini dipetakan dari hal hal yang sangat mempengaruhi keberhasilan proyek mulai dari sisi operasional sampai dengan sisi finansial.

## DAFTAR PUSTAKA

- Afiat, Idianto, O., Rera, G. F., Wardoyo, G. K., and Pratama, H. B. (2020): Updated Conceptual Model and Resource Assessment using Numerical Reservoir Simulation of Danau Ranau Geothermal Field , Indonesia.
- DiPippo, R. (2015): *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact: Fourth Edition, Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact: Fourth Edition*, 1–762. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02885-7>
- Hochstein, M. P. (2000): Classification and Assessment of Geothermal Resources, *World Renewable Energy Congress VI*, (May), 326–329. <https://doi.org/10.1016/b978-008043865-8/50063-5>
- Pandeli, E., Gabbani, G., Valentini, S., Margottini, C., and Naso, V. (2013): Medium-enthalpy geothermal energy systems: New opportunities of renewable energy in China, *International Conference on Power Engineering 2013, ICOPE 2013*, **13**.
- Rubio-Maya, C., Ambríz Díaz, V. M., Pastor Martínez, E., and Belman-Flores, J. M. (2015): Cascade utilization of low and medium enthalpy geothermal resources - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **52**, 689–716. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.162>
- Sveinbjörnsson, B. M. (2016): Medium Enthalpy Geothermal Systems in Iceland - Thermal and Electric Potential, 126.