

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan vital dalam memenuhi aktivitas sehari-hari bagi masyarakat, yang merupakan salah satu motor penggerak perekonomian masyarakat dalam rumah tangga, industri, dan komersil (Falqahiyah & Benyamin, 2021a). Listrik memengaruhi hajat banyak orang. Peningkatan akan kebutuhan listrik tersebut juga berdampak pada tingginya laju pertumbuhan emisi CO₂ apabila tidak diikuti dengan pemilihan jenis bahan bakar yang berkadar karbon rendah serta penggunaan teknologi yang efisien dan ramah lingkungan (Mazaya & Kurniawan, 2022).

Pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi di Indonesia mendorong peningkatan konsumsi listrik dari waktu ke waktu (Ma'arif, 2023). Perusahaan Listrik Negara (PLN) merupakan penyedia listrik utama bagi masyarakat Indonesia. Dengan asumsi pertumbuhan ekonomi sepanjang 2008-2027 sebesar 6,1% secara nasional dan jumlah rumah tangga yang akan dialiri listrik untuk periode 2008-2027 diperkirakan rata-rata tumbuh sebesar 1,3% secara nasional, maka diperkirakan pertumbuhan kebutuhan listrik sekitar 8,3% per tahun dan di luar Jawa-Bali sekitar 9,2% per tahun (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2008). Pertumbuhan kebutuhan listrik tersebut perlu diimbangi dengan penambahan kapasitas pembangkit hingga tahun 2027 sebesar 187.173 MW (PT PLN (Persero), 2018) .

PLN sebagai penyedia utama listrik, kondisinya sangat berpengaruh terhadap kemampuannya menyediakan listrik guna mendukung pertumbuhan ekonomi (Mazaya & Kurniawan, 2022). Tidak meningkatnya kapasitas listrik mengakibatkan terjadinya krisis pasokan listrik yang dalam jangka panjang dapat memperlambat pertumbuhan ekonomi Indonesia (Lestari et al., 2016). Krisis pasokan listrik menyebabkan pemutusan arus listrik bergilir di sebagian besar wilayah di Indonesia yang dapat menyebabkan terganggunya aktivitas perekonomian (Hutasuhut et al., 2022).

Salah satu tantangan utama dalam ketahanan energi nasional berasal dari ketergantungan yang tinggi pada sumber energi fosil seperti minyak bumi, batubara, dan gas untuk pembangkit listrik, yang pasokannya bersifat fluktuatif dan rentan terhadap perubahan harga global. Ketergantungan ini melemahkan ketahanan energi karena cadangan energi fosil bersifat terbatas dan tidak dapat diperbarui, serta membuat sistem kelistrikan rentan terhadap gejolak pasar energi internasional dan gangguan pasokan bahan bakar primer. Penelitian menunjukkan bahwa bauran energi primer Indonesia masih sangat didominasi oleh energi fosil, dengan kontribusi batubara, minyak, dan gas mencapai lebih dari 80% dari total produksi energi, yang berimplikasi langsung pada lemahnya

ketahanan energi nasional jika tidak didiversifikasi secara substansial (Syawal Sihite et al., 2025).

Untuk meningkatkan ketahanan energi dan mengurangi emisi, transisi ke sumber energi terbarukan yang lebih andal, diversifikasi bauran energi, serta peningkatan efisiensi sistem ketenagalistrikan menjadi langkah strategis yang harus dipercepat dalam kebijakan energi nasional (Hapsari, 2023). Upaya peralihan energi ini mulai dilakukan pemerintah dengan mengeluarkan Perpres No. 5 Tahun 2006 pasal 2 ayat (2) huruf b yang menyatakan bahwa salah satu tujuan Ketahanan Energi Nasional (KEN) adalah terwujudnya *energy mix* yang optimal pada tahun 2025 dengan perincian, minyak bumi menjadi kurang dari 20%, gas bumi menjadi lebih dari 30%, batubara menjadi lebih dari 33%, batubara yang dicairkan (*liquefied coal*) menjadi lebih dari 2% dan bahan bakar nabati (BBN), panas bumi dan energi baru terbarukan menjadi lebih dari 5%. Dari laporan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral di dalam *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2023*, data menunjukkan bahwa dalam kurun waktu 2004 – 2023 terjadi peningkatan, yaitu sebesar 100.097 GWh pada tahun 2004 menjadi 147.297 GWh pada tahun 2023. Jumlah permintaan terbesar pada sektor rumah tangga mencapai 41% dan sektor industri mencapai 35% pada tahun 2023 dari total permintaan listrik oleh semua pelanggan. Sebagian besar konsumsi energi listrik tersebut, lebih banyak digunakan untuk konsumsi akhir daripada untuk menciptakan nilai tambah ekonomi

Energi panas bumi yang merupakan salah satu energi alternatif, adalah energi yang ramah lingkungan karena unsur-unsur yang berasosiasi dengan energi panas tidak membawa dampak lingkungan atau berada dalam batas ketentuan yang berlaku (Lebbihiat et al., 2021). Panas bumi juga merupakan sumber energi panas dengan ciri terbarukan karena proses pembentukannya terus-menerus sepanjang masa selama kondisi lingkungannya dapat terjaga keseimbangannya (Guevara-Gómez et al., 2025).

Salah satu penelitian yang relevan mengenai pemanfaatan energi panas bumi dilakukan oleh Mazaya & Kurniawan (2022) menggunakan pendekatan paradigma *post-positivist* untuk mengkaji keterlibatan berbagai pemangku kepentingan dalam pengelolaan proyek PLTP Dieng. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bentuk *collaborative governance* di wilayah tersebut telah terbentuk dengan baik, namun masih terdapat beberapa kendala teknis yang berdampak pada efektivitas kerja sama antar-*stakeholder*. Kendala teknis tersebut memengaruhi dinamika koordinasi dan peran masing-masing aktor dalam pengembangan dan pengelolaan energi panas bumi, yang pada akhirnya turut menentukan keberhasilan proyek secara menyeluruh.

Studi lain yang turut membahas perbandingan kinerja termodinamika pada tiga konfigurasi pembangkit listrik tenaga panas bumi berbasis siklus *flash* dilakukan oleh Farsi & Rosen (2022). Analisis dilakukan menggunakan neraca energi dan neraca eksergi untuk setiap komponen sistem dengan kondisi sumber

panas bumi bersuhu 230 °C dan laju aliran massa fluida sebesar 230 kg/s. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *double-flash* menghasilkan daya listrik yang lebih tinggi dibandingkan dengan sistem *single-flash* akibat pemanfaatan energi fluida panas bumi yang lebih optimal melalui proses *flashing* dua tahap. Pada kondisi tekanan *flash* optimal, sistem *single-flash* menghasilkan daya sekitar 16 MW, sedangkan sistem *double-flash* mampu meningkatkan output daya hingga sekitar 19,5 MW. Konfigurasi *double-flash connected turbine* menunjukkan performa terbaik dengan daya listrik mencapai sekitar 20,6 MW. Selain itu, efisiensi eksergi sistem *double flash* dan *double flash connected turbine* juga lebih tinggi dibandingkan dengan *single-flash*, masing-masing sebesar sekitar 47,1 % dan 48,5 %, sementara *single-flash* hanya mencapai sekitar 44,2 %. Temuan ini mengindikasikan bahwa penerapan sistem *double flash* lebih unggul secara termodinamik dibandingkan *single-flash*, khususnya untuk perencanaan pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan kondisi reservoir bertemperatur menengah hingga tinggi.

Berdasarkan hasil survei yang dilakukan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) untuk menjajaki potensi energi panas bumi di Sulawesi Selatan, diperkirakan memiliki potensi panas bumi sebesar 468–469 MW (Indonesia, 2015), salah satunya adalah potensi energi panas bumi yang terdapat di Bittuang, Kabupaten Tana Toraja. Peran pemerintah juga berpengaruh terhadap perencanaan pembangkit energi listrik panas bumi di daerah Bittuang, sebagai sumber energi pembangkit listrik. Potensi energi panas bumi di daerah ini dimanfaatkan untuk sebuah PLTPanas Bumi sebagai sarana pembangkit tenaga listrik alternatif, daerah ini akan menjadi percontohan daerah yang mandiri dan pandai dalam memanfaatkan energi alternatif untuk kebutuhan listrik di wilayah daerah Bittuang. Oleh karena itu, pembangunan PLTPanas Bumi di daerah ini sebaiknya dipercepat. Akan tetapi, tidak semua rumah mendapatkan daya listrik sesuai kebutuhan. Daya listrik hanya 450 watt, sedangkan alat-alat elektronik warga mulai meningkat. Juga meningkatnya kebutuhan listrik di bangunan-bangunan umum.

Hasil survei juga menunjukkan wilayah prospek panas bumi di Kecamatan Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, mencakup area seluas 7 km² dengan indikasi sistem geotermal aktif yang dikontrol oleh struktur sesar dan keberadaan batuan alterasi hidrotermal. Manifestasi panas bumi berupa 9 titik mata air panas dengan temperatur permukaan 93°C dan indikasi reservoir bawah permukaan dengan temperatur diperkirakan melebihi 200°C, bahkan berdasarkan analisis *thermoluminescence* menunjukkan potensi suhu hingga 285–291°C. Meskipun laporan belum mencantumkan estimasi kapasitas daya secara kuantitatif, berdasarkan parameter geologi dan pengalaman pada lapangan serupa, potensi energi panas bumi di Bittuang diperkirakan dapat mencapai kisaran 10–50 MW, tergantung pada hasil eksplorasi lanjutan dan karakteristik reservoir aktual. Potensi ini menunjukkan bahwa Bittuang memiliki

prospek yang layak untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi (Badan Geologi, 2021).

Berdasarkan proyeksi kebutuhan listrik di Bittuang dengan data terbaru, jumlah penduduk Tana Toraja pada tahun 2023 adalah sebesar 287.000 jiwa. Sebanyak 5 persen dari penduduk tersebut atau 14.350 jiwa tinggal di Bittuang. Sementara itu, berdasarkan PLN Statistik 2023, konsumsi listrik per kapita di Indonesia adalah. Nilai tersebut digunakan karena belum terdapat data mengenai konsumsi listrik per kapita di Bittuang. Dengan demikian, dengan mengalikan jumlah penduduk Bittuang dan konsumsi listrik per kapita, didapatkan total kebutuhan listrik di Bittuang untuk tahun 2023 sebesar 16.823.550 kWh per tahun. Selain itu, estimasi daya maksimum (*load peak*) untuk Bittuang berkisar antara 2.000 hingga 2.500 kW, yang diperkirakan akan meningkat pada tahun 2030 menjadi 2.500 hingga 3.000 kW, mengingat pertumbuhan konsumsi listrik diproyeksikan sekitar 5% per tahun. Sumber data yang digunakan dalam perhitungan ini adalah Badan Pusat Statistik (BPS) Tana Toraja untuk data jumlah penduduk dan PLN Statistik 2023 untuk data konsumsi listrik per kapita. Proyeksi kebutuhan listrik ini penting untuk perencanaan pengembangan infrastruktur listrik yang dapat memenuhi kebutuhan masa depan. Sehingga dibutuhkan adanya penelitian untuk memodelkan PLTPanas Bumi di Bittuang menggunakan MATLAB, dan menganalisis, kemudian menghitung kelayakan teknis dari PLTPanas Bumi tersebut.

Berdasarkan uraian di atas, peneliti melakukan penelitian yang membantu dalam perhitungan dan prediksi daya listrik yang dapat dihasilkan oleh potensi energi panas bumi di daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja. Serta memberikan rekomendasi spesifikasi teknis untuk perencanaan pembangunan PLTPanas Bumi.

1.2 Energi Panas Bumi

Panas bumi (*Geothermal*) sebagaimana didefinisikan dalam Undang- Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang panas bumi, adalah sumber energi panas yang terkandung di dalam air panas, uap air, serta batuan bersama mineral ikutan dan gas lainnya yang secara genetis tidak dapat dipisahkan dalam suatu sistem Panas Bumi (Lestari et al., 2022). Menurut Himawan (2017), energi panas bumi atau *geothermal* berasal dari kata Yunani yang berarti *geo* adalah bumi dan *thermal* yang berarti panas (Prasetyo et al., 2024). Jadi, energi panas bumi berarti energi atau kekuatan yang diekstrak dari bawah bumi. Energi di dalam bumi terbentuk oleh peluruhan mineral dan hutan beberapa tahun yang lalu. Energi panas bumi disebut sumber energi terbarukan karena panas terus diproduksi di dalam bumi. Indonesia dikaruniai sumber panas bumi yang berlimpah karena banyaknya gunung berapi dari pulau-pulau besar yang ada, hanya pulau Kalimantan saja yang tidak mempunyai potensi panas bumi. Namun besarnya potensi yang dimiliki belum dapat dimanfaatkan secara optimal, dimana hanya 4-

5% dari total energi 29.544 MW yang telah digunakan. Hal ini tentu memiliki implikasi yang sangat serius untuk Indonesia ke depannya, dengan perkembangan teknologi dan industri yang pesat, kebutuhan akan energi pun berjalan beriringan dengan pertumbuhan permintaannya (T Listyani RA et al., 2017).

1.2.1 Proses Pembentukan Energi Panas Bumi

Menurut Mazaya & Kurniawan (2022), secara garis besar bumi ini terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu kulit bumi (*crust*), selubung bumi (*mantle*) yang diperkirakan mempunyai ketebalan sekitar 2.900 km, dan inti bumi (*core*) yang memiliki ketebalan sampai dengan sekitar 3.450 km (Mazaya & Kurniawan, 2022). Sebagai bagian terluar dari Bumi, kulit Bumi memiliki ketebalan yang bervariasi antara kulit Bumi yang berada di bawah suatu lautan dan kulit Bumi yang berada di permukaan. Ketebalan kulit bumi di bawah suatu daratan berkisar 35 km dan di bawah lautan hanya berkisar 5 km. Temperatur pada inti Bumi diperkirakan dapat mencapai sekitar 7.000 °F atau bahkan lebih.

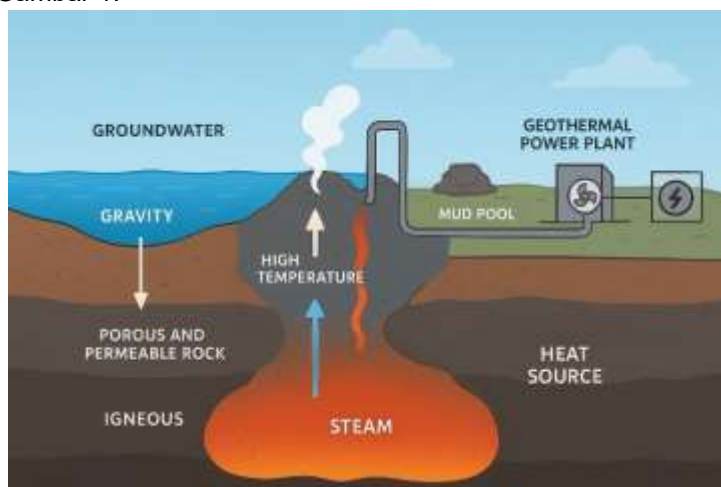
Energi panas bumi atau *geothermal* merupakan salah satu energi primer yang banyak terkandung dalam inti bumi. Energi dalam bentuk kalor alami ini telah lama tersimpan selama ribuan tahun dalam bentuk gunung berapi, aliran lava, sumber air panas, dan geyser. Energi ini terbentuk dari proses interaksi 3 lempengan aktif yang mengelilingi Indonesia, mulai dari pulau Sumatera, Jawa, hingga ke Sulawesi. Lempeng-lempeng tersebut merupakan bentangan batuan setebal 64-145 km yang mengapung di atas astenosfer. Semua lempengan yang ada ini bergerak secara perlahan dan terus-menerus. Di beberapa lokasi lempeng-lempeng ini bergerak memisah, sedangkan di lokasi yang berbeda lempeng ini bertemu atau berinteraksi. Interaksi berlangsung dalam bentuk tumbukan antarlempengan yang pada akhirnya menimbulkan zona penujaman (*subduksi*) pada kedalaman tertentu.

Sistem Panas Bumi yang ada di Indonesia umumnya merupakan sistem *hydrothermal* yang mempunyai temperatur tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$), hanya beberapa di antaranya yang mempunyai temperatur sedang ($150^{\circ} - 225^{\circ}\text{C}$) (Wardani et al., 2022). Pada dasarnya, sistem panas bumi jenis *hydrothermal* ini terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan secara konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan *igneous* (batuan vulkanik) yang terbentuk karena magma panas yang berada di dekat permukaan. Sedangkan proses perpindahan panas secara konveksi terjadi karena adanya kontak antara air dengan suatu sumber panas.

Air tanah yang dipengaruhi oleh gravitasi akan memiliki kecenderungan untuk selalu bergerak ke bawah, akan tetapi, dengan adanya kontak antara air dengan sumber panas, akan terjadi perpindahan kalor sehingga air memiliki temperatur yang lebih tinggi dan air akan menjadi lebih ringan ataupun berubah

dalam bentuk uap (*steam*) panas. Hal ini akan menyebabkan air dengan temperatur tinggi dan massa yang ringan akan bergerak ke atas melalui batuan berpori dan *permeable* di atas lapisan *igneous*, dan air dengan temperatur rendah dan massa yang berat akan bergerak ke bawah, sehingga terbentuklah sirkulasi air atau arus konveksi. Proses perpindahan kalor pada air ini terjadi melalui sebuah medium tempat terperangkapnya air tanah yang disebut *reservoir*.

Di dalam *reservoir*, air dan dalam bentuk *steam* beserta panasnya diperangkap oleh lapisan batuan padat. Namun, bagaimanapun, batuan padat ini tetap memiliki retakan yang pada akhirnya berfungsi sebagai katup pada sebuah broiler alami dengan ukuran yang sangat besar. Katup ini sering kali ditunjukkan dengan adanya manifestasi panas bumi di permukaan (*geothermal surface manifestation*), seperti kubangan lumpur panas (*mud pools*), mata air panas, *geyser* dan manifestasi panas bumi lainnya yang juga menunjukkan adanya suatu sistem *hydrothermal* di bawah permukaan bumi. Melalui sistem *hydrothermal* inilah dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi sebuah pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan membuat sumur yang mengalirkan *steam* dari *reservoir* menuju selang-selang yang mengarah ke turbin dengan tujuan memberikan gerakan putar pada turbin di mana gerak putar tersebut dihubungkan dengan generator hingga akhirnya dapat membangkitkan energi listrik. Sistem panas bumi yang tersedia di perut bumi memiliki besaran temperatur fluida yang berbeda-beda di setiap lokasi. Sistem panas bumi dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Panas Bumi (Hochstein, 1990)

1.2.2 Estimasi potensi cadangan panas bumi

Menurut Badan Standardisasi Nasional Indonesia (SNI, 2018), terdapat beberapa metode untuk mengestimasi potensi energi panas bumi, yaitu metode perbandingan, metode *volumetrik*, dan metode simulasi *reservoir*. Pada penelitian ini yang akan digunakan sebagai perhitungan cadangan adalah

metode *volumetrik*, yaitu metode untuk estimasi potensi sumber daya pada kelas sumber daya hipotesis, cadangan mungkin, dan cadangan terduga. Dalam metode ini, *reservoir* panas bumi dianggap sebagai satu bentuk geometri volume yang parameternya homogen, sehingga volume *reservoir* dapat dihitung dengan mengalikan luas prospek *reservoir* area dan ketebalannya. Perhitungan seberapa besar potensi sumber daya dan cadangan dilakukan dengan mengalikan volume dengan kandungan panas di dalam batuan dan *fluida reservoir*. Estimasi energi panas bumi dengan metode *volumetrik* dapat dilakukan melalui prosedur sebagai berikut:

$$H_{ei} = Ah [(1 - \varphi)\rho_r C_r T_i + \varphi(\rho_L U_L S_L + \rho_v U_v S_v)] \quad (1)$$

$$H_{ef} = Ah [(1 - \varphi)\rho_r C_r T_f + \varphi(\rho_L U_L S_L + \rho_v U_v S_v)] \quad (2)$$

$$H_{th} = H_{ei} - H_{ef} \quad (3)$$

$$R_f = (T_i - \frac{T_f}{T_i} - T_s \times 100\% \quad (4)$$

$$H_{re} = \frac{H_{de}}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000}$$

$$H_{re} = \frac{H_{de} \times \eta}{t \times 365 \times 24 \times 3600 \times 1000} \quad (6)$$

Keterangan :

- H_{ei} = kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan awal (kJ)
- H_{ef} = kandungan energi dalam batuan dan fluida pada keadaan akhir (kJ)
- H_{th} = energi panas bumi maksimum yang dapat dimanfaatkan (Kj)
- H_{de} = energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan (kJ)
- H_{re} = energi panas bumi maksimum yang dapat diambil ke permukaan selama periode tertentu (MWth)
- H_{el} = potensi listrik panas bumi (MWe)
- R_f = faktor perolehan (fraksi)
- t = lama waktu (umur) pembangkit listrik
- η = faktor konversi listrik (fraksi)

1.2.3 Keunggulan Energi Panas Bumi

Untuk pemenuhan kebutuhan energi primer, secara umum energi panas bumi bisa memberikan kontribusi yang baik bila dibandingkan dengan energi fosil lainnya. Lebih lanjut, menurut (Falqahiyah & Benyamin, 2021a) jika dilihat dari aspek teknik, ekonomi dan lingkungan, energi panas bumi mempunyai banyak keuntungan, di antaranya sebagai berikut:

- a. Energi panas bumi adalah energi terbarukan yang ramah lingkungan, tidak mengeluarkan polusi atau limbah.

- b. PLTP memerlukan lahan lebih sedikit dibandingkan dengan PLTU. Sebagai contoh, PLTP hanya memerlukan 3,2 ha per MW, sedangkan PLTU batubara membutuhkan 7,7 ha per MW.
- c. Pengembangan PLTP bisa dilakukan bertahap. Artinya, investasi PLTP bisa dilakukan pada skala 5-10 MW. Selanjutnya, sesuai dengan kebutuhan dan kemampuan finansial, potensi energi panas bumi di daerah tersebut akan dimanfaatkan hingga kapasitas maksimal.
- d. Energi panas bumi dapat diandalkan sebagai pemasok energi primer karena energi ini selalu tersedia, tidak bergantung pada musim dan siang atau malam hari.
- e. PLTP mengurangi biaya impor BBM yang selama ini digunakan untuk operasional PLTD.
- f. Pembangunan PLTP bisa menggairahkan kegiatan ekonomi lokal.
- g. PLTP tidak mengakibatkan terjadinya degradasi mutu lingkungan, dikarenakan dalam sebuah PLTP tidak ada penambangan yang dilakukan di permukaan, tidak ada tumpahan minyak, dan tidak ada penggenangan akibat dari proses yang dijalankan.

1.2.4 Teknologi Pada Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP)

Berdasarkan teknologi yang digunakan, menurut (Gunawan et al., 2021) terdapat 3 teknologi yang umum digunakan pada sebuah *geothermal power plant*, yaitu:

a. *Dry Steam Power Plants*

PLTP sistem *dry steam* mengambil sumber uap panas dari bawah permukaan. Sistem ini dipakai jika *fluida* yang dikeluarkan melalui sumur produksi berupa fasa uap. Uap tersebut langsung dimanfaatkan untuk memutar turbin dan kemudian akan memutar generator untuk menghasilkan energi listrik.

b. *Flash Steam Power Plants*

Dalam pembangkitan energi listrik dengan memanfaatkan sumber daya energi baru dan terbarukan, panas bumi atau *geothermal*, teknologi berikutnya yang biasa digunakan pada sebuah PLTP adalah teknologi *flash steam power plant*. Teknologi *flash steam power plant* memanfaatkan panas bumi yang berupa fluida, misalnya air panas alam (*hot spring*) dengan suhu di atas 175°C. Perbedaan teknologi *flash steam power plant* dengan *dry steam power plant* adalah pada teknologi *flash steam power plant*, fluida panas dialirkan ke dalam tangki *flash* yang memiliki tekanan lebih rendah sehingga terjadi uap panas secara cepat, sedangkan pada teknologi *dry steam power plant*, uap panas langsung dialirkan menuju turbin. Uap panas inilah yang kemudian dialirkan menuju turbin dan menggerakkannya sehingga mengaktifkan generator yang menghasilkan tenaga listrik. Serupa dengan teknologi *Dry Steam Power Plant*, sisa panas yang dihasilkan dari

proses pengaktifan tenaga listrik pada *Flash Steam Power Plant* akan dikembalikan menuju *reservoir* melalui *injection well*.

c. *Binary Cycle Power Plants*

Selain menggunakan kedua teknologi yang sudah dijelaskan sebelumnya, yaitu teknologi *dry steam power plant* dan *flash steam power plant*, terdapat juga teknologi ketiga yang digunakan PLTP untuk membangkitkan energi listrik, yaitu BCCP atau *Binary Cycle Power Plant*. Pada BCCP, air panas atau uap panas yang berasal dari sumur produksi (*production well*) tidak pernah menyentuh turbin. Air panas bumi digunakan untuk memanaskan apa yang disebut sebagai *working fluid* pada *heat exchanger*. *Working fluid* kemudian akan berubah menjadi panas dan menghasilkan uap berupa *flash*. Uap yang dihasilkan di *heat exchanger* tadi lalu dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan sumber daya listrik. Uap panas yang dihasilkan di *heat exchanger* inilah yang disebut sebagai *secondary (binary) fluid*. BCCP ini sebetulnya merupakan sistem tertutup sehingga tidak ada yang dilepaskan ke atmosfer

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik sumber panas bumi yang menjadi dasar perencanaan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Bittuang Tana Toraja?
2. Bagaimana kinerja teknis pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Bittuang Tana Toraja?
3. Bagaimana menentukan rekomendasi teknis PLTP di Bittuang Tana Toraja?

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan karakteristik sumber panas bumi yang menjadi dasar perencanaan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Bittuang Tana Toraja.
2. Menentukan kinerja teknis pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Bittuang Tana Toraja.
3. Memberikan rekomendasi teknis pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) di Bittuang Tana Toraja.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian ini, maka manfaat penelitian ini yaitu:

1. Manfaat Teoretis

Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi akademik dalam memahami perbedaan kinerja termodinamika dan efisiensi pemanfaatan energi pada kedua sistem tersebut serta memperkaya kajian ilmiah mengenai perencanaan pembangkit listrik tenaga panas bumi.

2. Manfaat Praktis

Secara praktis, penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi perencana, pengembang, dan pengambil kebijakan dalam menentukan konfigurasi sistem pembangkit listrik tenaga panas bumi yang paling sesuai dan layak diterapkan berdasarkan kondisi reservoir yang tersedia. Selain itu, hasil penelitian ini dapat membantu dalam pengambilan keputusan terkait pemilihan teknologi *single flash* atau *double flash* yang optimal dari sisi teknis.

1.6 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Study kelayakan perencanaan pembangkit energi listrik panas bumi di daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, khususnya aspek teknis.
2. Simulasi kelayakan aspek teknis perencanaan pembangkit energi listrik panas bumi yang memiliki pola operasi optimal menggunakan perangkat lunak MATLAB.

1.7 Penelitian Terdahulu

Terdapat penelitian terdahulu yang digunakan untuk membandingkan hasil penelitian. Perbandingan itu dilihat dari segi persamaan penelitian atau perbedaan yang ada pada penelitian tersebut. Penelitian terdahulu juga ditujukan untuk membantu menemukan inspirasi baru bagi penelitian selanjutnya. Di samping itu, membandingkannya dengan penelitian terdahulu dapat menunjukkan orisinalitas penelitian. Penelitian terdahulu yang dapat menjadi acuan penelitian ini dikemas dalam bentuk tabel dan deskripsi agar mempermudah perbandingan antara satu penelitian dengan penelitian lainnya.

Tabel 1. Penelitian Terdahulu

No	Judul	Penulis/Tahun	Metode	Hasil Penelitian
1	<i>Collaborative governance</i> pemanfaatan energi panas bumi	Athirah Mazaya, Teguh Kurniawan (2022)	Paradigma <i>post positivist</i>	<i>Collaborative governance</i> yang terjadi di lapangan panas bumi Dieng sudah terbentuk. Hanya saja ada sedikit

No	Judul	Penulis/Tahun	Metode	Hasil Penelitian
	sebagai sumber pembangkit listrik (Studi Kasus Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Dieng, Jawa Tengah)			kendala teknis yang harus diselesaikan. Namun, kendala teknis tersebut memengaruhi <i>collaborative governance</i> antar <i>stakeholder</i> yang terkait.
2	Analisis kelayakan proyek pembangkit listrik energi panas bumi Area "CFA"	Falqahiyah & Benyamin (2021)	Analisis cadangan panas bumi, analisis keekonomian, analisis sensitivitas	Potensi cadangan panas bumi pada area "CFA" memiliki cadangan terduga 475,119 MWe dengan kapasitas tersebut akan dapat dikembangkan proyek pembangkit listrik energi panas bumi dengan kapasitas 55 MWe. Hal-hal yang harus diperhitungkan dalam pelaksanaan pengembangan proyek <i>Drilling and Proven Resource, Production and Revenue, Investment, Operating Expenditure</i> , Pajak dan Depresiasi. Parameter keekonomian yang berpengaruh dalam penentuan investasi dan pelaksanaan proyek yang dihasilkan adalah NPV -97.546 USD, IRR 2%, <i>payback period</i> melewati masa kontrak proyek, dan <i>Profitability Index</i> 0,61 sedangkan yang menjadi parameter paling sensitif pada proyek ini adalah harga jual listrik. Hasil dari analisis kelayakan berdasarkan potensi cadangan dan parameter keekonomian di area penelitian dikatakan tidak layak untuk dikembangkan menjadi proyek pembangkit listrik energi panas bumi.
3	Studi prakiraan potensi pembangkit listrik panas bumi di	Handika Roberto Nainggolan, Eddy Warman (2016)	Pendekatan kuantitatif deskriptif	Potensi energi listrik yang dapat dibangkitkan adalah sebesar 54,6MWe. Sistem Pembangkit Listrik Panas

No	Judul	Penulis/Tahun	Metode	Hasil Penelitian
	pusuk buhit Kelurahan Siogungogung Kabupaten Samosir			Bumi yang cocok digunakan berdasarkan temperaturnya yaitu <i>Flushed Steam System</i> . Biaya Pokok Pembangkit an PLT P Pusuk Buhit 2 x 15MW untuk suku bunga 9% adalah 0,0784 US\$/kWh. Dari analisis perhitungan kelayakan investasi PLT P 2 x 15 MW, tampak bahwa kombinasi suku bunga, 6% dan 9%, dengan lama pengembalian modal 10,21 dan 13,70 tahun. Maka nilai <i>Payback Periodenya</i> lebih kecil dari umur investasi pembangkit , hal ini berarti investasi unt uk PLTP ini layak.
4	Pemanfaatan dan Arah Kebijakan Perencanaan Energi Panas Bumi di Indonesia Sebagai Keberlanjutan Maksimalisasi Energi Baru Terbarukan	Dindin Syarief Nurwahyudi, Udi Harmoko (2020)	Normatif Kuantitatif	Pemanfaatan panas bumi pada saat ini setara dengan pemakaian BBM domestik sebesar 32.000 BOE per hari (92.000 BOE per hari minyak mentah) atau sekitar 81.200 BOE per hari BBM domestik pada tahun 2025. Sementara itu, arah kebijakan energi diarahkan untuk ketenagalistrikan sesuai (PP No 79, 2014). Teknologi yang digunakan dalam pemanfaatan energi panas bumi pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi yaitu <i>dry steam</i> , <i>flash steam</i> dan <i>binary cycle</i> . Ketiga macam teknologi ini pada dasarnya digunakan pada kondisi yang berbeda-beda. Kebutuhan investasi untuk 1 MW mencapai kisaran US\$ 5 juta atau sedikit di bawah angka tersebut. Keuntungan investasi yang harus didapat pengembang setidaknya mampu mencapai 13 persen hingga 14 persen.
5	Analisis rekomendasi daerah PLTP (Pembangkit Listrik	Risa Bruri Utami, Bandi Sasmito, Nurhadi Bashit (2019)	<i>Analitycal Hierarchy Process</i> (AHP)	Penentuan area potensi panas bumi menggunakan metode AHP menghasilkan luasan untuk area tidak berpotensi sebesar 3.761,299 Ha, area kurang berpotensi sebesar

No	Judul	Penulis/Tahun	Metode	Hasil Penelitian
	Tenaga panas bumi) menggunakan sistem informasi geografis			4.608,671 Ha dan area sangat berpotensi sebesar 2.427,309 Ha, sedangkan uji signifikansi yang diperoleh dari metode ini yaitu sebesar 0,925
6	Analisis Energy Sistem Biner Pada Pembangkit Listrik Panas Bumi (PLTP) Bedugul	I.P Yajnartha, I G B Wijaya Kusuma, M Sucipta, Ni Made Dwidiani (2018)	Simulasi CFD dan CAD <i>drawing</i>	Daya pada PLTP yang menggunakan brine dapat membangkitkan daya sebesar 32,7 MW atau 7 kali lebih tinggi dibandingkan dengan PLTP dengan fluida kerja tanpa brine.
7	Analisis Kebijakan Investasi Pengelolaan Panas Bumi Dalam Konteks Otonomi Daerah di Sumatera Utara	Syariful Azmi (2020)	Penelitian deskriptif kualitatif	Pengelolaan panas bumi di Sumatera Utara sebagai energi alternatif membutuhkan dukungan fisik yaitu ketersediaan lahan untuk pengembangannya. Selain itu, dalam hal kebijakan dalam pengelolaan panas bumi peraturan daerah yang telah diterbitkan belum sepenuhnya dapat diimplementasikan, kewenangan pembangunan PLTP masih menjadi tanggungjawab Pemerintah Pusat sesuai dengan Peraturan Menteri Energi Dan Sumber Daya Mineral Nomor: 15 Tahun 2010 Tentang Daftar Proyek-Proyek Percepatan Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik Yang Menggunakan Energi Terbarukan, Batubara Dan Gas Serta Transmisi.
8	Analisis Performa Main Cooling Water Pump pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) PT.X	Komarudin, Andrian Saputro, Kuat Suparto (2021)	Pencatatan data harian pada pompa Main Cooling Water Pump	Hasil daya motor aktual pompa 1 dan 2 sebesar 705,119 01 kW, kemudian daya motor commissioning sebesar 748,29 kW, dan daya motor spesifikasi mempunyai hasil sebesar 900 kW. Untuk daya pompa aktual pada pompa 1 memiliki daya sebesar 542,410 kW, sedangkan pompa 2 sebesar 512,760 kW. Kemudian daya pompa commissioning sebesar 613,000 kW, dan

No	Judul	Penulis/Tahun	Metode	Hasil Penelitian
				daya pompa spesifikasi mempunyai hasil sebesar 630,000 kW. Dan untuk efisiensi aktual pada pompa 1 memiliki efisiensi sebesar 76,70%, sedangkan pompa 2 sebesar 72,50%. Kemudian efisiensi pompa <i>commissioning</i> sebesar 82,8%, dan efisiensi pompa spesifikasi mempunyai hasil sebesar 86%.
9.	<i>Thermal modeling and simulation of a single-flash geothermal power plant involving non-condensable gas: a case study of Kamojang geothermal field in Garut, West Java, Indonesia</i>	Sufyana et al., (2023)	<i>mass and energy balance</i>	Hasil simulasi menunjukkan bahwa keberadaan gas non-kondenser sangat mempengaruhi efisiensi termodinamik <i>plant</i> dengan menurunkan efisiensi turbin dan output daya total. Analisis ini menekankan pentingnya sistem penghilangan NCG untuk meningkatkan performa PLTP <i>single flash</i> , sehingga perencanaan harus berfokus pada desain komponen yang efisien untuk menangani NCG dalam fase perancangan.
10.	Analisis Termodinamika Dan Exergi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Sistem <i>Double flash</i> Yang Menggunakan Interstage Heating	Nur Hakim et al., (2020)	Analisis ekseri dan optimasi termodinamik dengan menggunakan <i>genetic algorithm</i> (GA) dan <i>Nelder–Mead simplex method</i>	Hasil penelitian menunjukkan bahwa melalui optimasi parameter operasi, efisiensi ekseri sistem dapat ditingkatkan secara signifikan dibanding desain konvensional <i>single flash</i> . Efisiensi ekseri awal sekitar 32,46% meningkat menjadi 39,21% melalui optimasi dengan GA, dan 36,16% dengan metode <i>Nelder–Mead</i> . Analisis juga mengidentifikasi kontribusi destruksi ekseri di setiap komponen, memberikan informasi penting untuk perencanaan teknis dan pengambilan keputusan desain dalam pengembangan PLTP <i>single-flash</i> .

Penelitian mengenai pemanfaatan energi panas bumi sebagai sumber pembangkit listrik telah banyak dilakukan di berbagai wilayah Indonesia dengan pendekatan yang beragam, mencakup aspek teknis, ekonomi, kebijakan, hingga

tata kelola. Mazaya dan Kurniawan (2022) menyoroti pentingnya *collaborative governance* dalam pengembangan PLTP, di mana meskipun kerangka kolaborasi antar pemangku kepentingan telah terbentuk, masih terdapat kendala teknis yang berdampak pada efektivitas dan keberlanjutan kerja sama tersebut. Dari perspektif teknis dan ekonomi, Falqahiyah dan Benyamin (2021) melakukan analisis kelayakan proyek PLTP di area “CFA” yang menunjukkan bahwa, meskipun potensi cadangan panas bumi cukup besar, proyek dinilai tidak layak secara ekonomi akibat nilai NPV yang negatif, IRR yang rendah, periode pengembalian modal yang melampaui masa kontrak proyek, serta tingginya sensitivitas terhadap harga jual listrik. Sebaliknya, Nainggolan dan Warman (2016) menunjukkan bahwa pengembangan PLTP di kawasan Pusuk Buhit layak secara finansial, dengan potensi energi listrik sebesar 54,6 MWe, biaya pokok pembangkitan yang kompetitif, serta nilai payback period yang berada di bawah umur investasi pembangkit.

Kajian lain menempatkan pengembangan panas bumi dalam kerangka kebijakan energi nasional. Nurwahyudi dan Harmoko (2020) menegaskan bahwa pemanfaatan energi panas bumi merupakan bagian strategis dalam ketahanan energi nasional, dengan dukungan kebijakan pemerintah serta penerapan berbagai teknologi pembangkitan seperti *dry steam*, *flash steam*, dan *binary cycle* sesuai karakteristik reservoir, meskipun kebutuhan investasi relatif tinggi, yakni sekitar USD 5 juta per MW dengan tingkat pengembalian ideal 13–14%. Dari sisi spasial dan perencanaan wilayah, Utami et al. (2019) menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berbasis sistem informasi geografis untuk mengidentifikasi area prioritas pengembangan PLTP, yang menghasilkan klasifikasi wilayah sangat berpotensi seluas 2.427,309 ha dengan tingkat signifikansi yang tinggi. Sementara itu, Yajnartha et al. (2018) melalui simulasi sistem biner pada PLTP Bedugul menunjukkan bahwa pemanfaatan *brine* sebagai fluida kerja mampu meningkatkan daya pembangkitan hingga 32,7 MW, menegaskan pentingnya pemilihan sistem konversi energi yang sesuai dengan kondisi reservoir.

Aspek kebijakan dan operasional juga menjadi perhatian dalam beberapa penelitian. Azmi (2020) menegaskan bahwa pengelolaan panas bumi di tingkat daerah masih menghadapi kendala implementasi regulasi, terutama terkait pembagian kewenangan antara pemerintah pusat dan daerah. Dari sisi operasional pembangkit yang telah beroperasi, Komarudin et al. (2021) menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara daya dan efisiensi aktual, *commissioning*, serta spesifikasi desain pada *Main Cooling Water Pump* yang berdampak langsung terhadap efisiensi sistem PLTP secara keseluruhan. Selain itu, studi teknis terkini oleh Sufyana et al. (2023) menekankan bahwa keberadaan gas non-kondenser pada PLTP sistem *single flash* dapat menurunkan efisiensi termodinamik dan output daya, sehingga aspek perancangan sistem penghilangan NCG menjadi krusial dalam tahap perencanaan. Di sisi lain, Hakim

et al. (2020) menunjukkan bahwa sistem *double flash* dengan interstage heating mampu meningkatkan efisiensi eksergi secara signifikan melalui optimasi parameter operasi, sehingga memberikan keunggulan dibandingkan dengan sistem *single flash* konvensional.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kajian kelayakan PLTP memerlukan pendekatan yang komprehensif, tidak hanya mencakup analisis potensi cadangan panas bumi, tetapi juga evaluasi teknis sistem pembangkitan, keekonomian investasi, serta dukungan kebijakan dan tata kelola. Namun demikian, penelitian yang secara khusus mengkaji kelayakan perencanaan PLTP di wilayah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja, dengan membandingkan *sistem single flash* dan *double flash* secara terintegrasi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki *state of the art* yang jelas, yaitu menyajikan analisis kelayakan teknis menggunakan *single flash* dan *double flash* sehingga diharapkan dapat menjadi rujukan bagi pengembangan PLTP di wilayah berpotensi tinggi namun belum tergarap secara optimal, khususnya di Sulawesi Selatan. Dari berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa kajian kelayakan PLTP tidak hanya membutuhkan analisis potensi cadangan panas bumi, tetapi juga perhitungan keekonomian, evaluasi kebijakan, hingga efisiensi teknis operasional.

BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Daerah Bittuang, Kabupaten Tana Toraja pengambilan data dilakukan pada bulan September 2024 hingga November 2024, sementara pengolahan dan analisis data dilakukan pada bulan Januari hingga Oktober 2025.



(a)



(b)

Gambar 2. Titik koordinat sumber mata air panas di daerah Bittuang; (a) Segmen 1 dan (b) Segmen 2

Lokasi ini berada di Kecamatan Bittuang, Lembang Balla, Kabupaten Tana Toraja, Sulawesi Selatan. Wilayah ini termasuk daerah pegunungan dengan kontur berbukit dan berhawa sejuk, yang dimanfaatkan masyarakat untuk pertanian, perkebunan, serta peternakan. Kondisi geografisnya ditandai dengan lahan yang relatif subur, adanya aliran sungai kecil, serta tutupan vegetasi hutan di bagian yang lebih tinggi. Selain potensi pertanian, kawasan ini juga termasuk dalam daerah indikasi panas bumi Bittuang yang memiliki nilai strategis untuk pengembangan energi terbarukan. Lokasi wilayah diberikan pada Gambar 2.

2.2 Alat dan Bahan

Pada penelitian ini alat dan bahan yang digunakan untuk melakukan analisa dan pengolahan data adalah sebagai berikut:

1. *Personal Computer Intel (R) Core(TM) i5-14400F*; 2,50 GHz
2. Aplikasi Aspen hsys
3. Penyimpanan Data praktis

2.3 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif yang dipakai untuk melakukan perhitungan teknis terkait kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) di daerah Bittuang Kabupaten Tana Toraja.

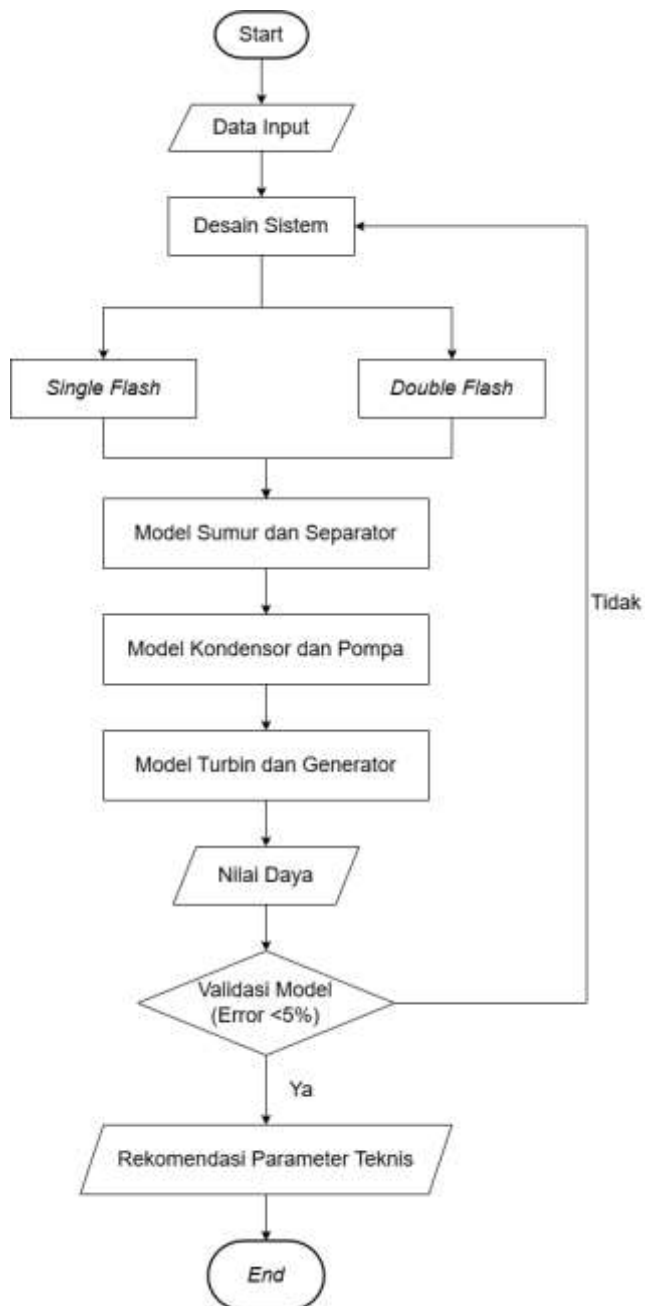
2.4 Sumber dan Jenis Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- **Data primer:** berupa hasil studi literatur lapangan (geologi, geofisika, geokimia) serta laporan survei potensi panas bumi yang diterbitkan oleh Badan Geologi dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM).
- **Data sekunder:** diperoleh dari jurnal ilmiah, buku referensi, dokumen pemerintah, laporan penelitian terdahulu, serta publikasi terkait energi panas bumi dan pembangunan PLTP di Indonesia.

2.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

2.6 Analisis Teknis

Analisis teknis dilakukan untuk menghitung potensi energi panas bumi yang tersedia di daerah penelitian. Perhitungan meliputi estimasi entalpi fluida, temperatur reservoir, kedalaman sumur, laju aliran massa uap, serta tekanan fluida. Selain itu, dilakukan simulasi sederhana pembangkitan listrik dengan memperhatikan efisiensi turbin dan generator. Output yang dianalisis berupa kapasitas daya mekanik turbin, daya listrik yang dihasilkan, serta potensi energi listrik terpasang.

Tabel 2. Sumber Daya Panas Bumi (Geothermal Reservoir)

Parameter	Nilai / Estimasi
Suhu reservoir	170°C – 198°C
Kedalaman sumur	±1.000 – 2.500 meter
Tekanan fluida bawah tanah	10 – 25 bar
Jenis fluida	Air panas bertekanan tinggi
Entalpi fluida	950 – 1.100 kJ/kg (<i>High enthalpy</i>)
Estimasi cadangan awal	Disesuaikan studi geologi lanjutan

Sumber: ESMAP (2020)

Tabel 2 menunjukkan bahwa lapangan panas bumi di Bittuang memiliki karakteristik yang sangat mendukung pembangkitan listrik skala menengah dengan suhu sekitar 170,4°C (Imran, 2024) dengan potensi ekspansi jangka panjang. Semua parameter berada dalam rentang yang sesuai untuk teknologi *flash steam*, menjadikannya kandidat ideal untuk pengembangan proyek geotermal tahap awal.

Untuk menghitung fraksi flaksing (x_{flash})

$$x_{flash} = \frac{h_{liquid} - h_f}{h_{fg}} \quad (10)$$

Keterangan :

- x_{flash} = fraksi uap (*steam quality*)
- h_{liquid} = entalpi cairan panas (kJ/kg)
- h_f = entalpi air jenuh cair (kJ/kg)
- h_{fg} = entalpi penguapan (kJ/kg)

Untuk mengetahui suhu keluaran

$$T_{out} = T_{sat} \quad (11)$$

Keterangan :

- T_{in} = temperatur keluar fluida (K),

T_{sat} = Temperatur saturasi fluida (K)

Laju aliran massa uap

$$\dot{m}_{uap} = \dot{m}_{water} \cdot x_{flash} \cdot \eta_{flash} \quad (12)$$

Keterangan :

$\dot{m}_{uap}$ = laju aliran massa uap (kg/s)

$\dot{m}_{water}$ = laju aliran massa fluida geotermal cair (kg/s)

x_{flash} = fraksi uap (*steam quality*)

η_{flash} = efisiensi proses *flash*

Tabel 3. Sumur Produksi & Injeksi

Komponen	Estimasi Jumlah / Nilai
Jumlah sumur produksi	2 – 3 sumur utama
Jumlah sumur injeksi	1 – 2 sumur
Debit fluida produksi	±200 ton/jam per sumur
Total kebutuhan fluida	1.000 – 1.200 ton/jam untuk 10 MW
Suhu fluida keluar sumur	220–250°C
Suhu fluida sebelum separator	± 215°C

Sumber: ESMAP (2020)

Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem produksi dan injeksi di proyek Bittuang sudah berada dalam parameter yang sangat layak secara teknis. Dengan 2–3 sumur produksi dan 1–2 sumur injeksi, serta debit fluida yang mencukupi, pembangkitan daya 10 MW bisa dicapai secara berkelanjutan.

Menentukan entalpi masuk h_{in}

$$h_{in} = c_p \cdot T_{in} \quad (13)$$

Keterangan :

h_{in} = entalpi masuk (kJ/kg)

c_p = kalor jenis fluida pada tekanan konstan (kJ/kg·K)

T_{in} = temperatur masuk fluida (K)

Adapun entropi masuk

$$s_{in} = c_p \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{ref}} \right) - R \ln \ln \left(\frac{T_{in}}{T_{ref}} \right) \quad (14)$$

Keterangan :

s_{in} = Entropi spesifik fluida pada kondisi masuk (kJ/kg·K)

c_p = kalor jenis fluida pada tekanan konstan (kJ/kg·K)

T_{in} = temperatur masuk fluida (K),

T_{ref} = emperatur referensi (K)
 R = Konstanta gas (kJ/kg·K)

Entalpi isentropic keluar $h_{out,s}$

$$h_{out,s} = c_p \times T_{sat} \quad (15)$$

Keterangan :

$h_{out,s}$ = Entalpi spesifik pada kondisi jenuh (kJ/kg)
 c_p = Kalor jenis fluida pada tekanan konstan (kJ/kg·K)
 T_{sat} = Temperatur saturasi fluida (K)

Entalpi actual keluar h_{out} diperoleh dengan mempertimbangkan efisiensi turbin menghasilkan daya mekanik

$$h_{out} = h_{in} - \eta \cdot (h_{in} - h_{out,s}) \quad (16)$$

Keterangan :

h_{out} = Entalpi keluaran aktual turbin (kJ/kg)
 h_{in} = Entalpi masukan (kJ/kg)
 η = Efisiensi isentropik turbin ($0 < \eta \leq 1$)
 $h_{out,s}$ = Entalpi spesifik pada kondisi jenuh (kJ/kg)

Daya keluaran turbin P_{out}

$$P_{out} = \dot{m} \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (17)$$

Keterangan :

P_{out} = Daya keluaran turbin (MW)
 $\dot{m}$ = Laju aliran massa fluida kerja (kg/s)
 h_{in} = Entalpi masukan (kJ/kg)
 h_{out} = Entalpi keluaran aktual turbin (kJ/kg)

Untuk menghitung daya listrik yang dihasilkan generator dari turbin, digunakan persamaan dasar konversi energi dengan mempertimbangkan efisiensi:

$$P_{listrik} = P_{mekanik} \times \eta \quad (18)$$

Keterangan :

$P_{listrik}$ = Daya listrik keluaran generator (MW)
 $P_{mekanik}$ = Daya mekanik yang dihasilkan turbin (MW)
 η = Efisiensi generator (0,9–0,98)