

**ANALISIS KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS
BUMI (PLTP) JABOI KOTA SABANG MENGGUNAKAN *SOFTWARE*
*RETSCREEN***

TUGAS AKHIR

Diajukan Oleh:

MALYAN FADHIL

NIM. 190702039

**Mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh**



**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN FAKULTAS SAINS DAN
TEKNOLOGI UNIVERSITAS ISLAM NEGERI AR-RANIRY
DARUSSALAM - BANDA ACEH**

2026 M/1447 H

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

ANALISIS KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI (PLTP) JABOI KOTA SABANG DENGAN MENGUNAKAN *SOFTWARE RETSCREEN*

TUGAS AKHIR

Diajukan Kepada Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri (UIN) Ar-Raniry Banda Aceh
Sebagai Salah Satu Beban Studi Memperoleh Gelar Sarjana (S1)
dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Oleh:

MALYAN FADHIL

NIM. 190702039

**Mahasiswa Fakultas Sains dan Teknologi
Program Studi Teknik Lingkungan**

Disetujui untuk Dimunaqasyahkan Oleh:

Pembimbing I,



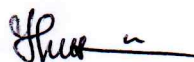
Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D
NIDN. 2010108103

Pembimbing II,



Ir. Muhammad Haikal, S.T., MSc.
NUPTK 4557773674130302

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Lingkungan



Husnawati Yahya, S.Si., M.Sc.
NIDN. 2009118301

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

ANALISIS KELAYAKAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI (PLTP) JABOI KOTA SABANG MENGGUNAKAN SOFTWARE RETSCREEN

TUGAS AKHIR

Telah Diuji Oleh Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir
Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh dan Dinyatakan Lulus
Serta Diterima Sebagai Salah Satu Beban Studi Program Sarjana (S-1)
Dalam Ilmu Teknik Lingkungan

Pada Hari/Tanggal: Jumat/ 06 Juni 2026
Jumat/19 Dzulhijjah 1447
di Darussalam, Banda Aceh
Panitia Ujian Munaqasyah Tugas Akhir:

Ketua,



Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D
NIDN. 2010108103

Sekretaris,



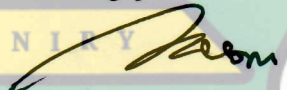
Ir. Muhammad Haikal, S.T., MSc.
NUPTK 4557773674130302

Penguji I,



Dr. Eng Nur Aida, M.Si
NIDN. 2016067801

Penguji II,



Dr. Hendri Ahamdian, S.Si., M.I.M
NIDN. 2004018303

Mengetahui:

Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Ar-Raniry Banda Aceh,



Prof. Dr. Ir. Muhammad Dirhamsyah, M.T., IPU
NIDN. 1962100219881111001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Nama : Malyan Fadhil
Nim : 190702039
Program Studi : Teknik Lingkungan
Fakultas : Sains dan Teknologi UIN Ar-raniry Banda Aceh
Judul Tugas Akhir : Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi Kota Sabang Menggunakan *Software Retscreen*

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini, saya:

1. Mengerjakan karya ini sendiri dan sanggup bertanggung jawab atas hasil karyanya.
2. Karya tulis ini adalah original dan belum pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik apa pun, baik di Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh maupun di perguruan tinggi lainnya.
3. Karya tulis ini adalah hasil dari gagasan, pemikiran, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan orang lain, kecuali bimbingan dari dosen pembimbing.
4. Tidak menjiplak naskah karya orang lain;
5. Tidak mengcopi karya orang lain tanpa menyebutkan sumbernya atau tanpa mendapatkan izin dari pemilik karya; dan.
6. Tidak memanipulasi dan memalsukan data.

Jika suatu saat ada pihak lain yang mengajukan tuntutan terhadap karya saya dan setelah dibuktikan secara dapat dipercaya serta terbukti bahwa saya benar-benar melanggar pernyataan ini, maka saya siap menerima sanksi sesuai dengan aturan yang berlaku di Fakultas Sains dan Teknologi UIN Ar-Raniry Banda Aceh.

Banda Aceh, 18 Mei 2026

Yang menyatakan,



Malyan Fadhil

ABSTRAK

Nama : Malyan Fadhil
NIM : 190702039
Program Studi : Teknik Lingkungan
Judul : Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi Kota Sabang Dengan Menggunakan *Software RETScreen Expert*
Tanggal Sidang : 05-06-2026
Jumlah Halaman : 84
Pembimbing I : Suardi Nur, S.T., M.Sc., ph.D.
Pembimbing II : Ir. Muhammad Haikal S.T., M.Sc
Kata Kunci : *Geothermal Energy, Geothermal Power Plant, RETScreen Expert*, kelayakan teknis ekonomi, emisi gas rumah kaca

Peningkatan kebutuhan energi listrik dan tuntutan pengurangan emisi gas rumah kaca mendorong untuk pengembangan energi baru terbarukan, salah satunya yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP). Penelitian ini bertujuan menganalisis kelayakan pembangunan PLTP Jaboi berkapasitas 5 MW menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* dari aspek teknis, finansial, dan lingkungan. Sistem yang dikaji memiliki tingkat ketersediaan 90%. Hasil analisis menunjukkan bahwa PLTP mampu menghasilkan energi listrik bersih sebesar 39.288 MWh per tahun. Aspek ekonomi, pembangunan PLTP membutuhkan investasi awal sebesar 24,93 juta USD dengan biaya operasi dan pemeliharaan tahunan sebesar 807 ribu USD, Pendapatan tahunan dari penjualan listrik diperkirakan mencapai 3.928.787 USD, sehingga menghasilkan arus kas bersih positif dengan periode pengembalian modal (*payback period*) sekitar 7–8 tahun. Aspek lingkungan, implementasi PLTP memberikan dampak positif melalui pengurangan emisi gas rumah kaca secara signifikan. Emisi pada kondisi baseline sebesar 31.876,8 tCO₂/tahun menurun menjadi 2.231,4 tCO₂/tahun pada kondisi proyek, sehingga terjadi pengurangan emisi sekitar 93%. Pembangunan PLTP Jaboi dinilai layak dikembangkan karena mampu menyediakan energi listrik yang stabil, menguntungkan secara ekonomi, serta mendukung upaya mitigasi perubahan iklim.

ABSTRACT

Name : Malyan Fadhil
Student ID : 190702039
Study Program : Environmental Engineering
Title : Feasibility Analysis of the Jaboi Geothermal Power Plant (GPP) in Sabang City Using RETScreen Expert
Date of Session : 05-06-2026
Total Pages : 84
Supervisor I : Suardi Nur, S.T., M.Sc., ph.D.
Supervisor II : Ir. Muhammad Haikal S.T., M.Sc
Keywords : Geothermal Energy, Geothermal Power Plant, RETScreen Expert, techno-economic feasibility, greenhouse gas emissions

The increasing demand for electrical energy and the need to reduce greenhouse gas emissions have encouraged the development of renewable energy sources, one of which is geothermal power generation. This study aims to analyze the feasibility of developing the 5 MW Jaboi Geothermal Power Plant (GPP) using the RETScreen Expert software from technical, financial, and environmental perspectives. The system analyzed has an availability factor of 90% and operational characteristics suitable for base-load power generation. The results indicate that the geothermal power plant is capable of generating 39,288 MWh of net electrical energy annually. From an economic perspective, the project requires an initial investment of USD 24.93 million with annual operation and maintenance costs of approximately USD 807 thousand. From an environmental perspective, the implementation of the geothermal power plant provides significant benefits through substantial reductions in greenhouse gas emissions. Emissions under the baseline condition of 31,876.8 tCO₂/year decrease to 2,231.4 tCO₂/year under the project condition, resulting in an emission reduction of approximately 93%. Overall, the development of the Jaboi Geothermal Power Plant is considered feasible from technical, economic, and environmental aspects. The project is capable of providing stable and sustainable electricity generation while also contributing significantly to climate change mitigation efforts.

KATA PENGANTAR

Saya mengucapkan puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat-Nya yang memungkinkan saya menyelesaikan penyusunan tugas akhir ini. Tugas akhir yang saya ajukan adalah “Analisis Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi Kota Sabang Menggunakan *Software REETScreen Expert*”. Tugas Akhir ini diserahkan untuk memenuhi persyaratan kelulusan dan mendapatkan gelar sarjana di bidang Ilmu Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh. Tak dapat dipungkiri bahwa penyelesaian Tugas Akhir ini memerlukan kerja keras. Namun, karya ini tak akan terwujud tanpa dukungan dan bantuan dari orang-orang terdekat yang saya hormati. Oleh karena itu, saya menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ibu Husnawati Yahya, M.Sc., M.Si., sebagai Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
2. Bapak Aulia Rohendi, S.T., M.Sc., sebagai Sekretaris Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh.
3. Ibu Dr. Eng. Nur Aida, M.Si., sebagai Dosen Pembimbing Akademik penulis, yang telah memberikan dukungan dan arahan selama masa perkuliahan.
4. Bapak Suardi Nur, S.T., M.Sc., Ph.D., sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah banyak memberikan panduan dan bimbingan dalam penulisan tugas akhir ini.
5. Bapak Ir. Muhammad Haikal S.T., M.Sc sebagai Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah banyak memberikan panduan dan bimbingan dalam penulisan tugas akhir ini.
6. Seluruh Dosen Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh yang telah mendidik dan membagikan pengetahuan selama masa kuliah, serta semua staf yang selalu mendukung dan membantu dalam menangani administrasi selama proses penelitian ini.
7. Teman-teman Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Ar-Raniry Banda Aceh angkatan 2019, yang juga memberikan

dukungan, masukan, dan saran berharga sehingga saya bisa menyelesaikan tugas akhir ini.

Semoga semua kebaikan dan bantuan mereka mendapat berkah dari Allah SWT. Pada akhirnya, saya menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan pengetahuan saya. Oleh karena itu, dengan rendah hati, saya mengharapkan saran dan kritik konstruktif dari semua pihak untuk menyempurnakan tugas akhir ini.

Banda Aceh, 18 Mei 2026

Penulis

Malyan Fadhil



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN TUGAS AKHIR.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan masalah	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 Energi dan Sumber Daya Energi	6
2.1.1 Energi Listrik.....	6
2.1.2 Jenis-Jenis Energi	7
2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tingkat Kebutuhan Energi Listrik	9
2.2 Energi Panas Bumi	10
2.2.2 Siklus Termodinamika	15
2.2.3 Siklus Single Flash Steam	16
2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi.....	20
2.2.5 Potensi Sumber Daya Energi Primer Panas Bumi.....	21
2.2.6 Eksplorasi Sumber Panas Bumi Jaboi.....	22
2.3 Rencana Pengembangan PLTP Jaboi	24
2.4 Emisi Gas Rumah Kaca.....	24
2.4.1 Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Energi Listrik	27

2.4.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi	28
2.5 Analisis kelayakan.....	30
2.6 Rencana Pembangkit Listrik Yang Akan Dibangun di Aceh	32
2.6.1 Potensi PLTP di Provinsi Aceh.....	33
2.7 <i>Software RETScreen</i>	33
2.7.1 Pengenalan <i>RETScreen</i>	33
2.7.2 Bagian-Bagian <i>RETScreen</i>	34
2.7.3 Penggunaan <i>RETScreen</i>	35
2.8 Penelitian Terdahulu	38
BAB III METODE PENELITIAN	42
3.1 Jenis Penelitian	42
3.2 Lokasi Penelitian	42
3.3 Alat dan bahan.....	43
3.4 Pengumpulan data	43
3.4.1 Data Primer.....	44
3.4.2 Data Sekunder.....	44
3.5 tahapan Penelitian	44
3.5.1 Studi Literaatur	44
3.5.2 Pengumpulan Data.....	46
3.6 Pengolahan dan Analisis Data.....	46
3.6.1 Menentukan Parameter Dasar	46
3.7 Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Jaboi.....	46
3.8 Analisis Hasil	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	48
4.1 Input Parameter	48
4.2 Hasil Pemodelan Energi	49
4.3 Hasil Pemodelan Biaya	52
4.3.1 Biaya Investasi Awal (<i>Initial Capital Cost</i>).....	53
4.4 Hasil Pemodelan Finansial	55
4.4.1 Parameter Input dan Biaya Investasi.....	55
4.5 Hasil Pemodelan Emisi	57

4.5.1 Interpretasi Visual Grafik	59
BAB V PENUTUP	61
5.1 Kesimpulan.....	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN.....	66



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Potensi dan Implementasi Pengembangan EBT (EBTKE, 2019).....	9
Gambar 2.2 Sketsa Sistem Panas Bumi.....	10
Gambar 2.3 Proses Pemanfaatan Panas Bumi Untuk Pembangkit Listrik.....	11
Gambar 2.4 Sistem panas bumi (Dickson dan Fanelli, 2004).....	14
Gambar 2.5 Siklus Single Flash Steam.....	16
Gambar 2.6 energi pada menara pendingin (cooling tower).....	20
Gambar 2.7 Pembangkit Listrik tenaga panas bumi (Nenny Miryani,2009.....	20
Gambar 2.8 Sebaran Potensi Panas Bumi di Indonesia (KESDM, 2017).....	21
Gambar 2.9 Konsumsi Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik.....	27
Gambar 2.10 Tampilan awal RETScreen.....	33
Gambar 2.11 Tampilan Lokasi.....	34
Gambar 2.12 Tampilan Menu Fasilitas.....	35
Gambar 2.13 Tampilan Menu Energi.....	35
Gambar 2.14 Tampilan Menu Biaya.....	36
Gambar 2.15 Tampilan Menu Analisa Emisi.....	36
Gambar 3.1 Peta Lokasi.....	42
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	45
Gambar 4.1 Data RETScreen.....	50
Gambar 4.2 Parameter Biaya.....	53
Gambar 4.3 parameter Finansial.....	55
Gambar 4.4 Arus Kas.....	56
Gambar 4.5 Parameter Emisi.....	59

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Pembangkit Listrik Yang Direncanakan Hingga 2030.....	31
Tabel 2.2 Potensi PLTP Provinsi Aceh.....	32
Tabel 2.3 Penelitian Terdahulu.....	38
Tabel 3.1 Spesifikasi Alat Penelitian.....	43
Tabel 4.1 Input parameter.....	49



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Indonesia adalah negara yang kaya akan sumber daya alam terbarukan, dan energi telah menjadi kebutuhan pokok masyarakat di seluruh dunia, termasuk di Indonesia. Seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk di Indonesia dan dunia, penggunaan energi diperkirakan akan terus meningkat di masa depan. Sementara itu, ketersediaan energi fosil yang tidak dapat diperbaharui semakin menipis, sedangkan konsumsinya terus naik. Jika situasi ini berlanjut, kemungkinan besar akan terjadi krisis energi di kemudian hari. Oleh sebab itu, Pemerintah Indonesia mendorong program eksplorasi (geologi, geokimia, dan geofisika) dan eksploitasi (Pengeboran Sumur Produksi, Pembangunan Fasilitas Produksi, Operasi dan Pemeliharaan, dan Pengelolaan Lingkungan) energi alternatif sebagai substitusi energi berbasis fosil. Salah satu alternatif tersebut adalah energi panas bumi (geothermal), yang berasal dari aktivitas vulkanik akibat proses magmatik di dalam bumi (Isa & Suhud, 2019).

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006, kebijakan energi nasional ditujukan untuk menjamin keamanan pasokan energi domestik dengan prioritas utama pada energi baru terbarukan menjelang tahun 2025. Kontribusi energi panas bumi akan diperkirakan akan melebihi 5 persen dari keseluruhan pasokan energi primer nasional (WWF, 2013). Dengan disahkannya Undang-Undang Nomor 21 Tahun 2014 tentang panas bumi, diharapkan akan ada percepatan dalam peningkatan kapasitas pengembangan energi panas bumi. Dalam konteks ini, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) diberi wewenang serta tanggung jawab sepenuhnya untuk mencapai target tersebut. Potensi panas bumi sebagian besar terkait dengan area hutan.

Indonesia memiliki banyak sumber daya panas bumi yang sangat melimpah, menjadikannya salah satu negara dengan cadangan panas bumi terbesar di dunia. Pulau Sumatra adalah salah satu daerah di Indonesia yang

memiliki kemampuan memproduksi energi panas bumi terbesar, yaitu sebesar 12.760 MW menurut Royana tahun 2013. Hal ini menunjukkan bahwa Pulau Sumatra memiliki potensi sumber panas bumi yang cukup besar dan sangat menjanjikan untuk dikembangkan termasuk di Provinsi Aceh. Salah satu parameter penting dalam mengevaluasi potensi panas bumi adalah suhu fluida di dalam reservoir, di mana sampel air panas bisa digunakan untuk memperkirakan suhu reservoir tersebut (Aribowo, 2011; Riogilang, 2013). Aceh memiliki beberapa sumber energi panas bumi yang sedang dikembangkan, seperti di daerah Jaboi Sabang dan Seulawah Agam yang terletak di Kabupaten Aceh Besar (Isa & Suhud, 2019)

Saat ini kota Sabang sudah memiliki 2 sumber daya dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) yang terletak di Aneuk Laot dan Cot Abeuk, yang dapat menghasilkan total kapasitas daya sebesar 7,7 MW dan beban puncak untuk kebutuhan listrik di Sabang saat ini adalah 5,16 MW dan masih memiliki cadangan sekitar 2,5 MW. Biaya produksi dari PLTD di Kota Sabang adalah sekitar Rp 3.064 per kWh jauh lebih mahal daripada harga jual kepada masyarakat yaitu Rp 1.444,70 per kWh. Namun, harga yang diterapkan kepada masyarakat yang jauh lebih rendah dari biaya produksi yang hampir 2 kali lipat harga jual, yang berarti PLN mengalami kerugian operasional per unit listrik yang dijual, kondisi ini mendorong transisi ke energi terbarukan, seperti energi panas bumi atau panel surya, yang biaya produksinya lebih rendah dalam jangka panjang.

Kebutuhan listrik di Sabang seiring pertumbuhan ekonomi, penduduk dan peningkatan pariwisata akan semakin bertambah juga, terutama kota Sabang adalah salah satu potensi besar dalam sektor pariwisata. PLTD saat ini memiliki kapasitas listrik yang cukup, namun potensi peningkatan kebutuhan listrik di masa depan perlu diantisipasi dari sekarang dengan menyiapkan cadangan listrik dan sumber energi terbarukan seperti energi panas bumi. Dari sektor lingkungan, PLTD dapat menghasilkan banyak CO₂ dan NO_x dari pembakaran bahan bakar diesel, PLTD menghasilkan emisi gas rumah kaca dan polusi udara yang dapat memberi dampak bagi lingkungan dan manusia.

Jadi, untuk dapat mengurangi potensi gas rumah kaca dan juga untuk melindungi lingkungan dari bahaya, kita perlu mengalihkan atau mengganti sumber energi listrik lain yang alternatif dan ramah lingkungan, salah satunya adalah energi terbarukan seperti energi panas bumi.

PLTP menggunakan sumber energi alami yang tersedia di lokasi, jadi tidak memerlukan biaya bahan bakar yang signifikan seperti PLTD. Biaya utamanya lebih terfokus pada biaya investasi awal yang besar, serta biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) yang relatif rendah dan stabil. Harga produksi rata-rata untuk PLTP bervariasi tergantung pada faktor seperti lokasi, skala proyek, biaya eksplorasi, dan teknologi yang digunakan. Berdasarkan data terbaru hingga 2023, biaya operasi listrik rata-rata dari PLTP adalah Rp 107,15/kWh, sementara harga jual rata-rata (*Levelized Cost of Energy* atau LCOE) berkisar antara sekitar 0,12-0,13 USD/kWh.

PLTP secara signifikan juga dapat mengurangi emisi gas rumah kaca karena tidak menggunakan bahan bakar fosil. Namun PLTP juga dapat menghasilkan Hydrogen Sulfida (H_2S) yang memiliki dampak yang realtif lebih kecil untuk lingkungan, namun masih bisa diatasi dengan teknologi yang tepat seperti sistem *scrubbing* yang menggunakan larutan amina atau alkali untuk menyerap H_2S dari gas buang. Gas yang bersih kemudian dilepaskan ke atmosfer, efektivitasnya mencapai 95-99%, dan limbahnya (seperti sulfat) dapat diinjeksikan kembali ke reservoir. Dengan adanya PLTP yang ramah lingkungan, maka dapat membantu masyarakat kota Sabang baik dari sektor ekonomi, pariwisata maupun lingkungan yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca. Salah satu wilayah kota Sabang yang memiliki potensi sumber daya energi panas bumi yang cukup besar adalah Jaboi.

Berdasarkan studi terbaru, sumber daya panas bumi Jaboi dapat menghasilkan listrik hingga 40 MW. Namun, lokasi sumber listrik yang terisolasi dengan permintaan listrik yang terbatas menjadi kendala pengembangannya. Oleh karena itu, analisis kelayakan terhadap potensi pembangunan PLTP di Jaboi Kota Sabang adalah hal yang sangat penting untuk dilakukan. PLTP di Jaboi diharapkan dapat memberikan kontribusi yang

signifikan terhadap penyediaan energi bersih dan terbarukan di Aceh khususnya sabang dan juga dapat disuplai ke kota banda aceh juga.

Analisis kelayakan dari segi teknis, ekonomis, dan lingkungan merupakan langkah awal yang diperlukan untuk memahami potensi dan tantangan dalam pengembangan PLTP tersebut. Dalam penelitian ini, akan digunakan *Software RETScreen* untuk melakukan analisis kelayakan teknis dan ekonomis, yang merupakan *software* yang sudah banyak digunakan dalam penilaian proyek energi baru terbarukan. *Software RETScreen* dapat memodelkan dan menghitung berbagai parameter yang diperlukan untuk evaluasi proyek energi terbarukan termasuk PLTP, sehingga nanti dapat memberikan gambaran yang lebih objektif dan akurat mengenai kelayakan proyek tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana kelayakan teknis dan ekonomis dari pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi di Kota Sabang?
2. Berapa potensi pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari PLTP di Jaboi Kota Sabang?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi di Kota Sabang.
2. Memperkirakan potensi pengurangan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari Pembangunan PLTP di Jaboi Kota sabang.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini akan Memberikan informasi teknis dan ekonomis untuk pengembangan PLTP yang berkontribusi dalam pengambilan kebijakan pembangunan energi terbarukan di Kota Sabang.

2. Penelitian dapat menjadi tambahan informasi untuk mengetahui potensi pengurangan emisi gas rumah kaca dari pembangunan PLTP Jaboi di kota Sabang.

1.5 Batasan masalah

Batasan masalah dari penelitian ini hanya membahas mengenai:

1. Peneliti fokus pada kajian kelayakan teknis dan ekonomis potensi energi panas bumi di Jaboi Kota Sabang menggunakan software *RETScreen expert*.
2. Memperkirakan pengurangan emisi gas rumah kaca dari pembangunan PLTP menggunakan software *RETScreen* berdasarkan faktor emisi yang tersedia dalam software *RETScreen* yang dihitung menggunakan pendekatan Tier-2 IPCC.



BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Energi dan Sumber Daya Energi

Energi dapat diartikan sebagai kemampuan untuk melakukan kerja atau kegiatan, misalnya seperti sinar matahari (Yulianto, 2020). Energi selalu bersumber dari sumber energi yang merupakan sesuatu yang mampu menghasilkan energi, baik secara langsung maupun melalui proses transformasi atau konversi hingga menjadi energi. Sebagian besar sumber energi ini berasal dari sumber daya alam, seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi.

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi, energi adalah kemampuan untuk melakukan pekerjaan, yang bisa berupa panas, cahaya, mekanik, kimia, atau elektromagnetik. Menurut undang-undang tersebut, sumber energi adalah segala sesuatu yang bisa menghasilkan energi, baik secara langsung atau melalui cara mengubah atau mengubah bentuknya. Selain itu, undang-undang ini juga menjelaskan bahwa sumber daya energi adalah sumber daya yang bisa digunakan, baik sebagai bahan untuk menghasilkan energi maupun sebagai energi itu sendiri. Pemanfaatan sumber daya energi dapat dilakukan melalui transformasi dan konversi energi. Metode yang paling aman, mudah, dan ekonomis untuk melakukan hal ini adalah dengan mengalirkan energi dalam bentuk energi listrik. Dalam produksi energi listrik, sumber daya energi primer yang diperlukan dapat berupa minyak, gas alam, batu bara, serta sumber energi terbarukan seperti matahari, air, biomassa, dan angin.

2.1.1 Energi Listrik

Energi listrik adalah jenis energi yang berkaitan dengan arus dan penumpukan elektron. Energi ini diukur dalam satuan daya dan durasi penggunaannya, seperti watt-jam, kilowatt-jam, dan megawatt-jam. Proses transisi energi listrik terjadi melalui aliran elektron, yang biasanya mengalir melalui konduktor dari berbagai jenis tertentu. Energi listrik dapat disimpan sebagai energi elektrostatis melalui akumulasi muatan elektron pada plat kapasitor (Rahmawati et al., 2020). Energi listrik dihasilkan dari transformasi dan konversi

berbagai sumber daya energi. Berdasarkan ketersediaannya, sumber daya energi dapat dibagi menjadi dua kategori: energi terbarukan yang jumlahnya tidak terbatas, seperti energi air, biogas, dan matahari, serta energi tidak terbarukan yang jumlahnya terbatas, seperti batu bara dan minyak bumi.

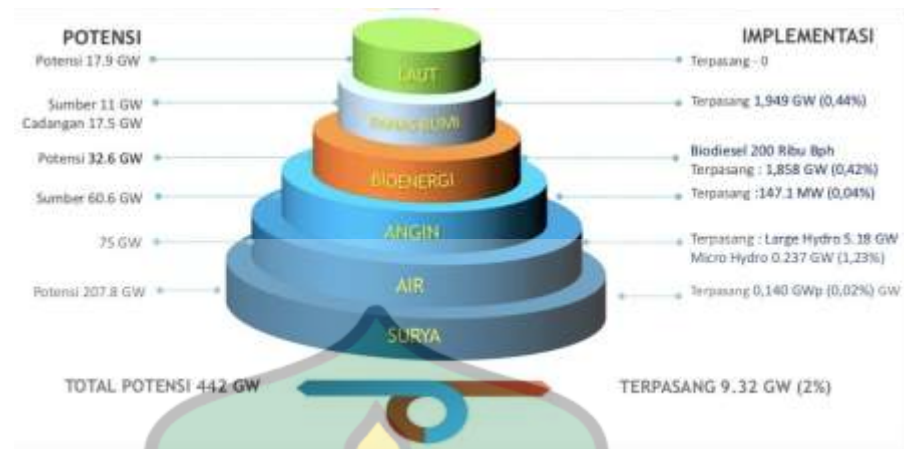
2.1.2 Jenis-Jenis Energi

Pembangkit listrik adalah fasilitas atau sistem yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit listrik dapat menggunakan sumber daya energi yang dapat diperbaharui dan tidak dapat diperbaharui. Tujuan utama dari pembangkit listrik adalah mengubah energi dari sumber daya energi menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk keperluan rumah tangga, industri, komersial dan lainnya. Berikut adalah beberapa jenis beberapa jenis pembangkit listrik:

1. PLTP adalah salah satu macam energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk menjadi sumber penggunaan energi yang sangat besar. Di tengah rencana beralih ke energi terbarukan, banyak orang tidak menyadari bahwa Indonesia memiliki potensi energi geotermal terbesar di dunia. Hingga kini, potensi tersebut belum dimanfaatkan secara maksimal. Indonesia memiliki cadangan energi fosil seperti minyak, gas, dan batu bara, serta juga memiliki cadangan energi nonfosil seperti energi geotermal, air, angin, dan matahari. Penggunaan bahan bakar fosil berdampak negatif pada lingkungan dan menyebabkan persediaannya semakin berkurang. Ketergantungan pada energi fosil perlu dikurangi dengan menggantinya menggunakan energi terbarukan yang punya cadangan banyak, seperti geotermal (Daud & Gaffar, 2019).
2. PLTA merupakan sumber daya energi yang dipakai adalah tenaga air. Tidak semua kondisi air bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya penghasil listrik, kondisi air yang ideal adalah dimana aliran air memiliki kapasitas aliran serta ketinggian tertentu dari instalasi pembangkit listrik. Semakin besar kapasitas aliran dan ketinggian dari instalasi pembangkit listrik maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan. *Hydropower* merupakan energi yang didapat dari air yang mengalir. Pada air terdapat energi potensial, yang selanjutnya aliran

air akan jatuh menuju turbin sehingga menjadi energi kinetik. Pemanfaatan aliran air secara terus-menerus digunakan sebagai penggerak turbin, sehingga energi kinetik dikonversikan menjadi energi listrik akibat dari serangkaian proses yang terjadi (Harahap, 2019).

3. PLTU adalah bentuk energi yang berasal dari uap. Uap tersebut dihasilkan melalui proses mengubah energi primer menjadi panas, lalu panas itu berpindah ke air dalam pipa ketel, sehingga air berubah menjadi uap panas yang disimpan dalam drum. Uap panas dari drum ketel diarahkan ke turbin uap, di turbin uap ini energi panas diubah menjadi energi gerak yang membuat generator berputar, lalu dari energi gerak turbin uap itu, generator mengubahnya lagi menjadi energi listrik (Lewerissa, 2018) .
4. Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG), sumber daya energi yang digunakan adalah diesel, gas cair (LPG) atau biogas. Mekanisme pembangkit listrik tenaga mesin gas sama seperti pembangkit lainnya, sumber daya energi yang digunakan mulanya akan dirubah menjadi energi mekanis melalui proses pembakaran, kemudian energi panas yang dihasilkan diubah melalui proses pada mesin gas untuk menjadi energi mekanik, mesin gas tersebut biasanya memiliki turbin untuk menggerakkan rotor yang terhubung dengan generator. Kemudian energi mekanis dirubah menjadi energi listrik oleh generator (Fitria dkk., 2021).
5. PLTS merupakan sumber daya energi yang digunakan adalah cahaya matahari atau panas matahari. Mekanisme dari pembangkit listrik tenaga surya tidak terlalu kompleks dari pembangkit lainnya. Panas matahari akan di serap oleh photovoltaic dan solar thermal tergantung tipe PLTS yang dipakai. Sistem photovoltaic mampu mengonversi energi surya secara langsung menjadi energi listrik. Sementara itu, PLTS berbasis solar thermal bekerja dengan memanfaatkan panas matahari untuk memanaskan fluida hingga menghasilkan uap, yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin dalam proses pembangkitan energi listrik



Gambar 2.1 Potensi dan Implementasi Pengembangan EBT (EBTKE, 2019)

2.1.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Tingkat Kebutuhan Energi Listrik

Setiap tahun, penggunaan energi listrik cenderung meningkat. Hal ini disebabkan oleh berbagai aktivitas yang perlu dipenuhi oleh masyarakat. Beberapa faktor yang memengaruhi tingkat kebutuhan energi listrik antara lain:

1. Faktor Ekonomi

Pertumbuhan Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) berpengaruh terhadap kebutuhan energi listrik di suatu negara. PDRB biasanya dibagi menjadi beberapa sektor, yaitu sektor komersial (bisnis), sektor industri, dan sektor publik. Aktivitas ekonomi di sektor komersial mencakup listrik, gas, air bersih, konstruksi, perdagangan, transportasi, dan komunikasi.

2. Faktor Pertumbuhan Penduduk

Pertumbuhan jumlah penduduk juga berkontribusi signifikan terhadap kebutuhan energi listrik, selain faktor ekonomi. Setiap tahun, jumlah penduduk meningkat dibandingkan tahun sebelumnya, yang disebabkan oleh tingginya angka kelahiran dibandingkan angka kematian. Dengan demikian, kebutuhan energi listrik akan meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi.

3. Faktor Perencanaan Pembangunan Daerah

Proses pembangunan daerah dipengaruhi oleh kondisi perekonomian setempat. Dalam hal ini, faktor ekonomi berperan baik secara langsung maupun tidak

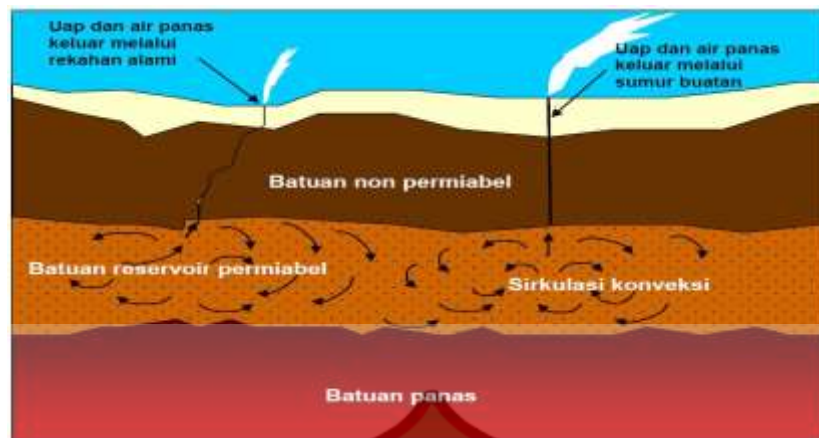
langsung mengenai kebutuhan energi listrik seiring dengan berlangsungnya pembangunan di suatu daerah.

4. Faktor Lainnya

Selain ketiga faktor yang telah disebutkan, ada faktor lain yang memengaruhi tingkat kebutuhan energi listrik, seperti luas bangunan konsumen, tingkat pekerjaan, jumlah anggota keluarga, dan sebagainya. Namun, faktor-faktor ini lebih berpengaruh dalam kajian yang lebih spesifik pada masing-masing sektor tarif dan tidak dalam skala besar (makro).

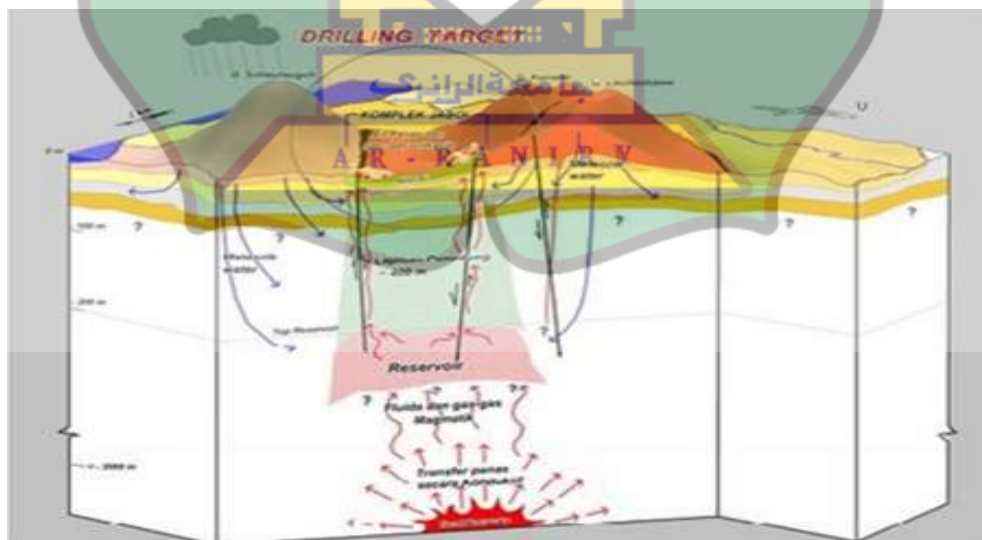
2.2 Energi Panas Bumi

Energi panas bumi adalah panas yang tersimpan dalam bumi yang membentuk metode panas bumi. Adanya zona subduksi lempeng Eurasia dan IndoAustralia menyebabkan terbentuknya sumber panas di bawah permukaan di pulau Sumatera. Proses ini membuat Sumatera memiliki cadangan potensi energi panas bumi 9.561 MWe. Energi panas bumi adalah energi yang diekstraksi dari panas yang tersimpan di dalam bumi. Energi panas bumi ini berasal dari aktivitas tektonik di dalam bumi yang terjadi sejak planet ini diciptakan. Panas ini juga berasal dari panas matahari yang diserap oleh permukaan bumi. Energi ini telah dipergunakan untuk memanaskan (ruangan ketika musim dingin, atau air) sejak peradaban Romawi, namun sekarang lebih populer untuk menghasilkan energi listrik. Energi panas bumi cukup ekonomis dan ramah lingkungan, namun terbatas hanya pada dekat area perbatasan lapisan tektonik. Pembangkit listrik tenaga panas bumi hanya dapat dibangun di sekitar lempeng tektonik di mana temperatur tinggi dari sumber panas bumi tersedia di dekat permukaan. Pengembangan dan penyempurnaan dalam teknologi pengeboran dan ekstraksi telah memperluas jangkauan pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi dari lempeng tektonik terdekat.



Gambar 2.2 Sketsa Sistem Panas Bumi

Energi geotermal mengalir terus menerus dari dalam bumi ke permukaan, seperti yang terlihat pada Gambar 2. 2, dan bisa muncul sebagai gunung berapi, mata air panas, dan geyser. Untuk memanfaatkannya, perlu dilakukan penambangan yang melibatkan eksplorasi (geologi, geokimia, dan geofisika) dan eksploitasi (Pengeboran sumur produksi, Pembangunan dan pengoperasian PLTP, Pemeliharaan reservoir serta Produksi listrik) untuk memindahkan energi panas itu ke permukaan melalui sumur produksi atau pengembangan. Energi yang telah diangkat ke permukaan kemudian diolah di pembangkit listrik, dan uap panasnya dikembalikan melalui sumur injeksi. Proses pemanfaatan ini terlihat pada Gambar 2. 3.



Gambar 2.3. Proses Pemanfaatan Panas Bumi Untuk Pembangkit Listrik (Nur et al., 2022)

Pemanfaatan energi panas bumi cukup ramah lingkungan karena unsur-unsur yang terkait dengan energi panas tidak menyebabkan dampak lingkungan atau berada dalam batas aturan yang berlaku. Panas bumi merupakan sumber energi panas yang bersifat terbarukan karena proses pembentukannya berlangsung terus-menerus selama kondisi lingkungannya dapat terjaga keseimbangannya.

Berdasarkan kriteria geologi, geofisika, hidrologi, dan teknik, sistem panas bumi dapat dikategorikan menjadi sistem vulkanik, sedimen, geopresur, dan batuan kering panas atau sistem panas bumi yang ditingkatkan (EGS). Sementara itu, Hochstein dan Browne mengklasifikasikan sistem panas bumi berdasarkan sifat perpindahan kalornya menjadi sistem hidrotermal, vulkanik, dan vulkanik-hidrotermal. Sistem hidrotermal merupakan sistem dimana perpindahan kalor dari suatu sumber permukaan dilakukan secara konveksi yang melibatkan fluida meteorik dengan atau tanpa jejak fluida magmatik. Sebaliknya, pada sistem vulkanik perpindahan kalor ke permukaan dilakukan secara konveksi yang melibatkan fluida magmatik dari ruang magma. Sistem gabungan vulkanik-hidrotermal merupakan sistem dimana fluida magmatik yang naik bercampur dengan fluida meteorik. (Nur et al., 2022) Temperatur reservoir pada sistem ini diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Entalpi tinggi (suhu reservoir lebih dari 100°C dan 225°C)
2. Entalpi sedang (suhu reservoir antar 125°C dan 225°C)
3. Entalpi rendah (suhu reservoir lebih rendah dari 125°C)

Salah satu pilihan teknologi untuk menggunakan energi geotermal dalam pembangkitan listrik adalah sistem pusat listrik siklus biner, yang sangat cocok untuk sumur geotermal dengan entalpi rendah. Teknologi ini memiliki dua siklus utama, yaitu siklus fluida geotermal dan siklus fluida organik, serta siklus fluida pendingin air. Fluida yang dipakai untuk menggerakkan turbin adalah propana (Tompodung & Pangow, 2009).

a. Sistem *Dry Steam* PLTP

sistem dry steam mengambil sumber uap panas dari bawah tanah. Sistem ini digunakan jika fluida yang keluar dari sumur produksi berupa fasa uap. Uap

tersebut digunakan langsung untuk menggerakkan turbin, yang kemudian mengubah energi geotermal menjadi energi kinetik untuk menjalankan generator dan menghasilkan energi listrik. Persyaratan untuk sistem Dry Steam meliputi suhu yang cukup tinggi ($>230^{\circ}\text{C}$), kedalaman yang tidak terlalu dalam dari permukaan bumi (maksimal 2500 meter), serta fluida yang tidak bersifat korosif (Ahluriza & Harmoko, 2021)

- b. Sistem Binary adalah salah satu pilihan teknologi untuk mengembangkan energi geotermal dalam menghasilkan listrik, terutama untuk sumur geotermal yang memiliki entalpi rendah. Teknologi ini melibatkan dua siklus utama, yaitu siklus fluida geotermal dan siklus fluida organik, serta siklus fluida pendingin air (Tompodung & Pangow, 2009). Pada dasarnya, cairan panas bumi yang dipakai untuk pembangkit listrik memiliki suhu sekitar 200°C ; namun, cairan panas bumi dengan suhu sedang (100°C – 200°C) dapat dimanfaatkan dengan cara memanaskan fluida organik yang memiliki titik didih rendah, sehingga uapnya dapat digunakan untuk menggerakkan turbin (Hasbullah, 2009).
- c. PLTP sistem Flash Steam adalah jenis PLTP yang paling sering digunakan. Pembangkit ini memakai reservoir geotermal yang mengandung air dengan suhu di atas 182°C . Air panas itu dipindahkan ke permukaan melalui pipa sumur produksi dengan tekanan alaminya; saat mengalir ke atas, tekanannya menurun sehingga sebagian air berubah menjadi uap. Uap ini kemudian dipisahkan dari air dan dialirkan untuk menggerakkan turbin. Sisa air dan uap yang telah menjadi cair kembali kemudian disuntikkan kembali ke reservoir melalui sumur injeksi, yang membuat sumber energi ini tetap berkelanjutan dan terbarukan.

PLTP Jaboi Sabang memiliki jenis *flash steam* yaitu memanfaatkan uap air yang mencapai permukaan dan tekanan diturunkan, sebagian air akan berubah menjadi uap dengan cepat (*flash*), kemudian digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan listrik.

1. Pengambilan Fluida Geothermal: air panas yang bertekanan tinggi dipompa dari dalam bumi melalui sumur bor ke permukaan.

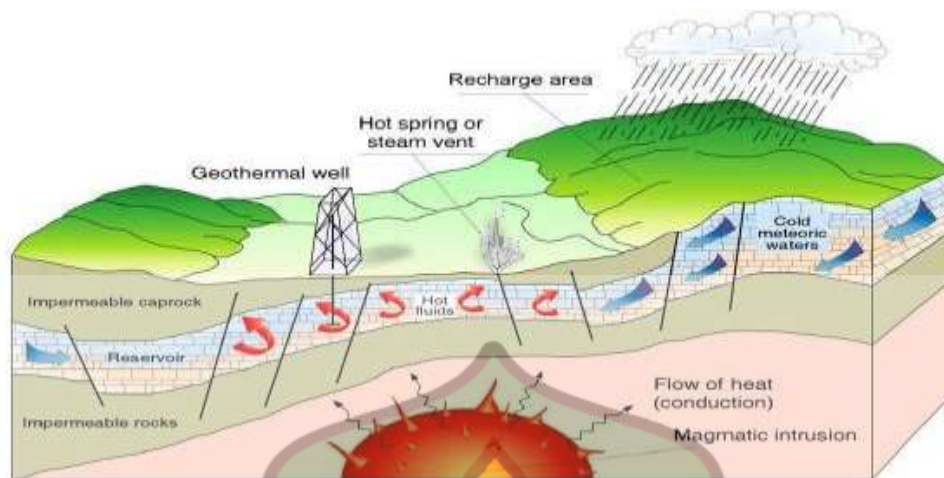
2. Penurunan Tekanan: di permukaan, fluida panas bumi dialirkan ke tangki bertekanan rendah. Penurunan tekanan ini menyebabkan sebagian air panas menjadi uap.
3. Pemisahan Uap: uap yang dihasilkan dipisahkan dari air panas. Pemisahan ini penting untuk memastikan uap yang bersih dan kering dapat digunakan untuk menggerakkan turbin.
4. Penggerak Turbin: uap bertekanan tinggi kemudian diarahkan untuk memutar turbin yang terhubung ke generator. Putaran inilah yang menghasilkan energi listrik.
5. Kondensasi dan Resirkulasi: setelah memutar turbin, uap didinginkan dan dikondensasi kembali menjadi air. Air ini kemudian dipompa kembali ke reservoir geothermal untuk dipanaskan kembali dan digunakan lagi membentuk siklus tertutup.

Jenis-jenis PLTP *Flash Steam*:

- **Single-flash:** Menggunakan satu proses flashing untuk menghasilkan uap.
- **Double-flash:** Menggunakan dua proses flashing (pada tekanan berbeda) untuk menghasilkan

2.2.1 Sistem panas Bumi

Sistem panas bumi adalah istilah yang menjelaskan adanya siklus dari panas bumi yang terbentuk akibat pergerakan panas dari sumber panas ke sekitar sumber panas tersebut melalui konduksi dan konveksi. Perpindahan melalui konduksi berlangsung dengan bantuan media yaitu batuan, sedangkan pergerakan panas melalui konveksi terjadi saat air menyentuh suatu sumber panas. Klasifikasi sistem panas bumi menurut Hochstein, 1990 terdiri dari sistem panas bumi suhu rendah ($<125^{\circ}\text{C}$), sistem panas bumi suhu sedang ($125^{\circ}\text{C} - 225^{\circ}\text{C}$), dan sistem panas bumi suhu tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$). Sementara itu, berdasarkan jenis fluida produksi dan jenis kandungan fluida utama, dapat dibedakan menjadi dua sistem yaitu sistem satu fase yang sebagian besar berisi air dengan suhu kisaran $90^{\circ}\text{C} - 180^{\circ}\text{C}$ (tidak ada pendidihan bahkan selama eksploitasi) dan sistem dua fase yang terdiri dari sistem dominasi uap dan sistem dominasi air.



Gambar 2.4 Sistem panas bumi (Dickson & Fanelli, 2004)

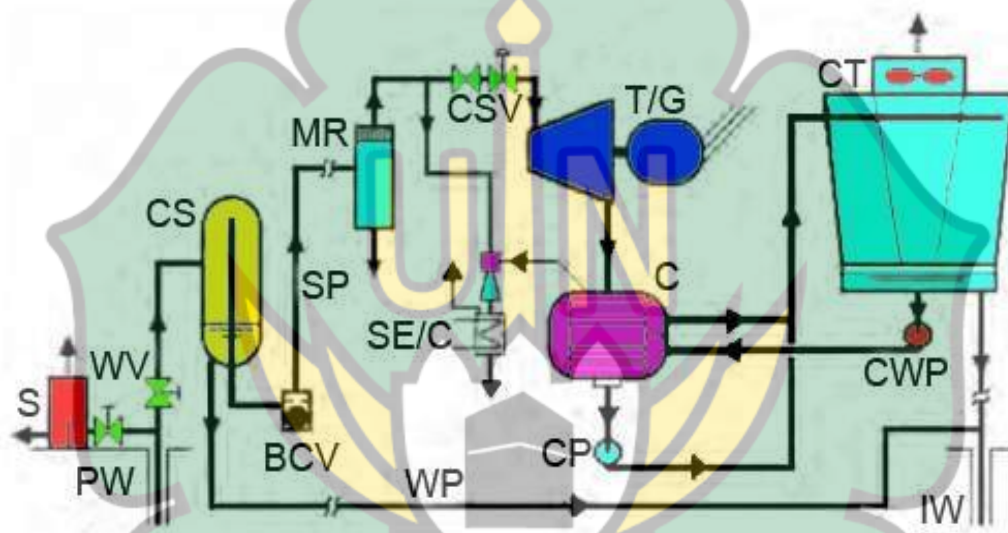
Sistem *flash steam* pada PLTP merupakan jenis PLTP yang paling banyak digunakan. Sementara itu, tipe PLTP siklus biner lebih banyak digunakan pada sistem panas bumi suhu sedang atau rendah seperti *Enhanced Geothermal System* (EGS). Pembangkit listrik siklus biner memakai fluida sekunder untuk mengubah panas menjadi tenaga. Dalam konteks ini, panas dari fluida panas bumi ditransfer ke fluida sekunder, fluida kerja, biasanya fluida kerja organik melalui penukar kalor. Fluida kerja sekunder bersirkulasi dalam sistem siklus tertutup. Pada titik didih tertentu, fluida kerja menguap, mengembang melalui turbin dan melepaskan entalpi.

2.2.2 Siklus Termodinamika

Analisis siklus termodinamika yang komprehensif yang melibatkan pompa, turbin, kondensor, serta sistem pendingin sangat penting dalam merancang pembangkit listrik siklus biner panas bumi. Analisis dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip termodinamika fundamental sebagaimana yang diberikan oleh hukum pertama termodinamika. parameter kunci yang menentukan spesifikasi teknis pembangkit listrik siklus biner panas bumi meliputi suhu dan laju aliran massa fluida panas bumi, tekanan kepala sumur, reinjeksi, dan suhu sekitar. Laju aliran massa dan suhu fluida panas bumi bersifat spesifik sesuai dengan karakteristik alami reservoir. Namun, suhu reinjeksi ditentukan melalui analisis cermat dengan mempertimbangkan indeks saturasi air garam untuk menghindari penskalaan endapan seperti silika di dalam pipa dan penukar kalor.

2.2.3 Siklus Single Flash Steam

Siklus single flash steam adalah salah satu siklus dalam Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi yang sering digunakan dalam industri pembangkitan listrik tenaga panas bumi. Cairan yang keluar dari sumur produksi akan melewati proses penguapan, ekspansi, kondensasi, lalu sebagian akan diinjeksi kembali ke sumur injeksi dan sebagian akan mengalir ke kondensor untuk mengubah uap panas bumi menjadi cair. Gambar 2. 5 berikut adalah diagram siklus single flash steam yang sederhana.



Gambar 2.5 Siklus Single Flash Steam (Kriyantono, 2020)

Keterangan :

PW : *Production* (Sumur Produksi)

S : *Silencer* (Peredam)

CP : *Pump* (Pompa)

CWP : *Cooling Water Pump* (Pompa Air Pendingin)

C : *Condenser* (Kondesator)

MR : *Material Remover* (Penghilang Material)

CS : *Cyclone Separator* (Pemisah Siklon)

SE/C : *Steam Jet Ejector* (Ejektora Jet Uap)

CT : *Cooling Tower* (Menara Pendingin)

IW : *Injection Well* (Sumur Injeksi)

T/G : *Turbine/Generator* (Turbin/Generator)

WV, BCV, CSV : *Valve* (Katup)

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa di setiap sumur produksi ada beberapa alat yang digunakan untuk mengontrol dan memonitor fluida panas bumi yang berasal dari sumur menuju ke pembangkit. Alat tersebut antara lain : katup, WV, sebuah *silencer*, sebuah *cyclone separator* sederhana untuk keadaan darurat, perpipaan dan instrumentasi (pengukur temperatur dan tekanan). Kemudian fluida panas bumi akan masuk ke dalam alat separator. Alat ini berfungsi untuk memisahkan fasa menjadi uap jenuh dan cair jenuh. Fluida dengan fasa cair jenuh (disebut dengan brine) akan diinjeksikan kembali ke sumur injeksi. Fluida dengan fasa uap jenuh akan melewati *ball check valve*, BCV. Kemudian fluida akan menuju turbin untuk diekspansi. Keluar dari turbin, fluida akan menuju kondensor untuk dikondensasi menjadi fasa cair jenuh. Kemudian, aliran fluida akan menuju menara pendingin. Dari menara pendingin, aliran terbagi menjadi dua, aliran pertama akan menuju kondensor untuk melakukan proses kondensasi, sedangkan aliran kedua akan bergabung dengan aliran brine untuk menuju sumur injeksi

a. Analisis Turbin

Ketika uap bertekanan tinggi dari fluida kerja organik mengembang di turbin, sebagian energi internal fluida bertekanan diubah menjadi energi kinetik oleh turbin. Daya keluaran turbin diberikan oleh Persamaan 1 :

$$\dot{W} = \dot{m}_{wf}(h_1 - h_2) = \dot{m}_{wf}\eta_t(h_1 - h_{2s}) \dots \dots \dots (1)$$

Keterangan :

- $\dot{m}_{wf}$: adalah laju aliran massa fluida kerja
- $h_1 - h_2$: merujuk pada entalpi di bagian masuk dan keluar turbin
- η_t : mengacu pada efisiensi turbin isentropik
- h_{2s} :: mengacu pada keadaan gas buang dari turbin isentropik ideal.

b. Analisis Kondensor

Uap buangan dari turbin dikondensasikan dalam kondensor. Kinerja kondensor merupakan salah satu parameter yang menentukan efisiensi pembangkit listrik biner. Di kondensor, panas dari fluida kerja dibuang ke media pendingin yaitu air atau udara.

Jumlah panas yang dibuang ke media pendingin diberikan oleh Persamaan sebagai berikut:

$$Q = \dot{m}_{wf}(h_2 - h_4) \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

- $\dot{m}_{wf}$: mengacu pada laju aliran massa fluida kerja
- $(h_2 - h_4)$: mengacu pada entalpi fluida kerja di saluran masuk dan keluar kondensor

c. Analisis Pompa Umpan

Konsumsi daya pompa umpan untuk memberi tekanan pada fluida kerja diberikan oleh Persamaan sebagai berikut:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf}(h_5 - h_4) = \dot{m}_{wf} (h_{5s} - h_4) / \eta_p \dots \dots \dots (3)$$

Keterangan :

- h_{5s} : mengacu pada pompa isentropik ideal.
- η_p : mengacu pada efisiensi pompa isentropik

d. Analisis Penukar Panas

Dua penukar panas digunakan dalam siklus sebagai preheater dan evaporator. Keseimbangan energi dari penukar panas ini dianalisis secara terpisah. Diasumsikan, bahwa penukar kalor terisolasi dengan baik, sehingga semua kalor dari fluida panas bumi dipindahkan ke fluida kerja atau tidak terjadi kehilangan kalor pada penukar kalor. Lebih lanjut, laju aliran massa diasumsikan konstan, oleh karena itu perbedaan energi potensial dan energi kinetik yang masuk dan keluar dari penukar kalor dapat diabaikan. Hubungan antara aliran massa panas bumi dan aliran massa fluida kerja diberikan dalam Persamaan sebagai berikut:

$$\dot{m}_b C_b (T_a - T_c) = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_5) \dots \dots \dots (4)$$

Keterangan :

- e. C_b : adalah rata-rata panas spesifik fluida brine
- f. T_a : adalah suhu fluida brine di saluran masuk
- g. T_c : adalah suhu injeksi fluida brine

e. Analisis Sistem Pendinginan

PLTP biasanya didinginkan dengan menggunakan udara, air dengan menara pendingin atau air langsung sebagai media pendingin. Dalam penelitian ini, kami menggunakan sistem pendingin udara force draft. Aliran udara kering melalui menara pendingin tetap tidak berubah. Karena air yang bersirkulasi kemudian kehilangan massa karena penguapan, sementara sebaliknya uap air di udara memperoleh massa dari air yang menguap, berdasarkan satuan massa udara kering, maka air pendingin pengganti yang dibutuhkan dapat dihitung



seperti pada Persamaan sebagai berikut:

Gambar 2.6 energi pada menara pendingin (cooling tower)

Keterangan :

➤ Untuk air

- W_a : Massa air bersuhu tinggi dialirkan ke menara pendingin (kg/s)
- H_{fa} : Entalpi air yang dialirkan ke menara pendingin (kJ/kg)
- W_b : Massa Aliran air hasil proses pendinginan dari menara (kg/s)
- H_{fb} : Entalpi Air yang berasal dari menara pendingin (kJ/kg)

Aliran udara kering melalui menara pendingin tetap tidak berubah. Karena air yang bersirkulasi kemudian kehilangan massa karena penguapan, sementara sebaliknya uap air di udara memperoleh massa dari air yang menguap,

berdasarkan satuan massa udara kering (m_a), maka air pendingin pengganti yang dibutuhkan dapat dihitung seperti pada Persamaan berikut:

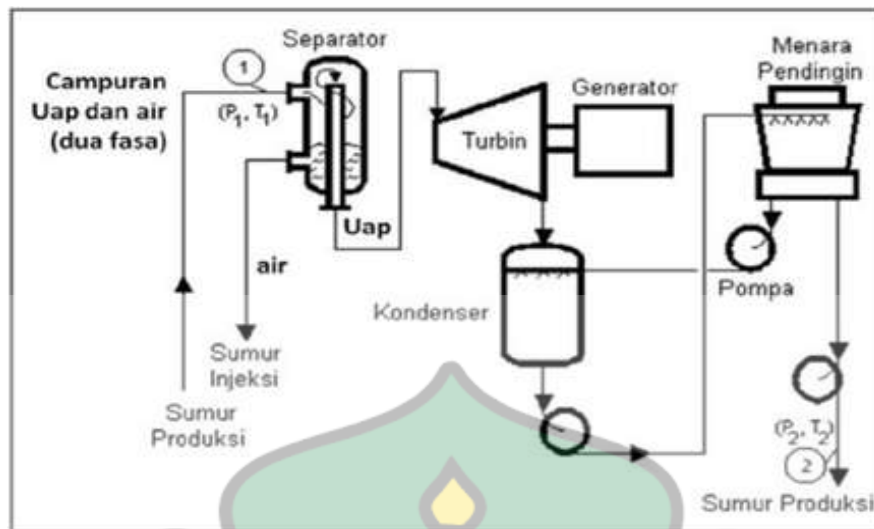
$$W_a - W_b = m_a \cdot (\omega_2 - \omega_1) \dots \dots \dots (5)$$

➤ untuk udara

- m_{air} : kecepatan massa udara yang mengalir (kg/s)
- h_{a1} : entalpi udara kering dingin (kJ/kg)
- ω_1 : rasio kelembaban udara dingin
- h_{g1} : entalpi uap air dingin (kJ/kg)
- h_{a2} : entalpi udara kering panas (kJ/kg)
- ω_2 : rasio kelembaban udara panas
- h_{g2} : entalpi uap air panas (kJ/kg)

2.2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi

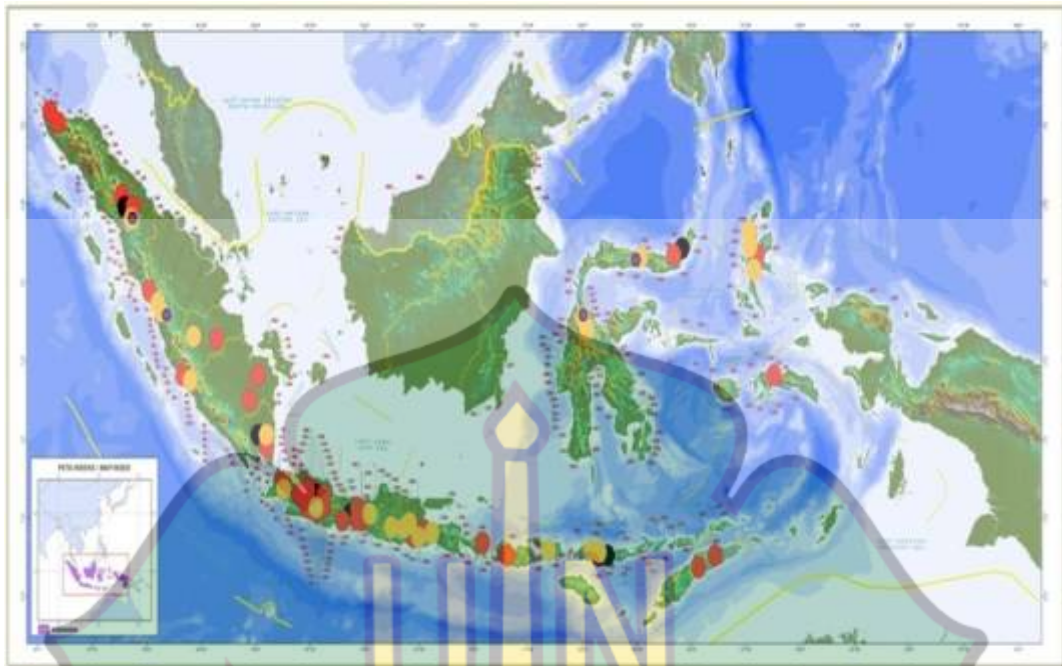
Pada prinsipnya, PLTP memiliki mekanisme kerja yang serupa dengan PLTU, namun perbedaannya terletak pada sumber panas yang digunakan. PLTU memanfaatkan boiler di permukaan sebagai penghasil uap, sedangkan PLTP menggunakan fluida panas yang berasal dari reservoir panas bumi. Fluida yang keluar melalui kepala sumur umumnya berada dalam fase uap dan kemudian dialirkan menuju turbin. Selanjutnya, energi panas bumi dikonversikan menjadi energi mekanik melalui putaran turbin yang menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Berdasarkan karakteristik lapangan panas bumi, terdapat beberapa jenis pembangkit listrik tenaga panas bumi, yaitu pembangkit uap kering (*dry steam*), pembangkit flash steam, dan pembangkit siklus biner (*binary cycle*). Dapat dilihat pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Pembangkit Listrik tenaga panas bumi (Falqahiyah & Benyamin, 2021)

2.2.5 Potensi Sumber Daya Energi Primer Panas Bumi

Indonesia memiliki potensi energi panas bumi yang sangat besar, yang ditandai dengan keberadaan deretan gunung api yang tersebar di hampir seluruh wilayah provinsi. Sumber daya panas bumi tersebut tersebar mulai dari Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Flores, Sulawesi Utara, hingga Maluku dengan sekitar 312 titik potensi panas bumi. Besarnya potensi tersebut diperkirakan mencapai sekitar 40% dari total sumber daya panas bumi dunia, sehingga menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara dengan cadangan panas bumi terbesar di dunia, dengan potensi lebih dari 23,9 GW atau sekitar 29 GWe. Energi panas bumi juga memiliki karakteristik *site specific*, yaitu hanya dapat dimanfaatkan pada lokasi sumber panas bumi berada dan tidak dapat dipindahkan maupun diekspor. Oleh karena itu, apabila dikelola secara optimal, energi panas bumi berpotensi dimanfaatkan secara efisien, efektif, dan produktif untuk memenuhi kebutuhan energi nasional hingga sekitar 20% dari total konsumsi listrik nasional (Kementerian ESDM, 2016; KESDM, 2017).



Gambar 2.8 Sebaran Potensi Panas Bumi di Indonesia (KESDM, 2017)

2.2.6 Eksplorasi Sumber Panas Bumi Jaboi

Eksplorasi sumber daya panas bumi di Jaboi, Kota Sabang, dilakukan dengan pendekatan yang mencakup geologi, geokimia, dan geofisika. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai masing-masing aspek:

2.2.6.1 Geologi

Survei Studi geologi di Jaboi bertujuan untuk memahami struktur geologi dan formasi batuan yang ada. Sumber daya energi panas bumi di Jaboi Sabang memiliki potensi besar dan terkait erat dengan geologi daerah tersebut, khususnya dengan adanya aktivitas vulkanik dan struktur geologi yang mendukung adanya manifestasi thermal seperti uap panas, fumarol, dan sumber dari air panas. Jaboi Sabang terletak di sekitar gunung api Leumo Matee dan Seumeuregoh, yang menunjukkan adanya aktivitas vulkanik. Aktivitas vulkanik ini menjadi sumber panas bumi yang signifikan, Analisis struktur geologi, seperti patahan dan lipatan, penting untuk memahami pergerakan fluida panas. Patahan dapat menjadi jalur bagi fluida panas untuk bergerak ke permukaan. Daerah Jaboi memiliki struktur

geologi yang mendukung adanya aliran panas bumi, seperti patahan dan lapisan batuan yang permeabel, yang memungkinkan panas bumi bergerak dan terkumpul. Dengan adanya uap panas, fumarol, dan sumber dari air panas di permukaan adalah indikasi adanya panas bumi di bawah permukaan. Temperatur reservoir panas bumi di Jaboi diperkirakan berkisar 228 derajat Celcius, yang menunjukkan potensi untuk dikembangkan menjadi PLTP. Jaboi Sabang memiliki potensi energi panas bumi yang signifikan karena adanya aktivitas vulkanik, struktur geologi yang mendukung, dan adanya manifestasi termal. Pengeboran sumur panas bumi di Jaboi telah membuktikan potensi pembangkit listrik, dan penelitian terus dilakukan untuk mengoptimalkan pemanfaatan energi panas bumi di daerah tersebut. Manifestasi panas bumi muncul ke permukaan berada di gunung leumo matee, Suhu manifestasi berkisar antara 82-99 0C dan berbau gas H₂S yang menyengat. Sedangkan air panas yang muncul secara berkelompok terletak pada aliran sungai Ceunohot disebelah utara gunung Seumeuregoh bersuhu antara 55-70 0C.

2.2.6.2 Geokimia

Survei Geokimia panas bumi dimaksudkan untuk mengetahui jenis manifestasi, pengukuran temperatur, pH, gas, dll. Sumber daya energi panas bumi di Jaboi, Sabang, memiliki potensi yang signifikan dan dapat dikembangkan untuk menghasilkan energi listrik. Geokimia daerah ini menunjukkan adanya reservoir panas bumi dengan suhu tinggi, yang ditunjukkan oleh perhitungan menggunakan geotermometer. Selain itu, daerah Jaboi juga memiliki manifestasi fumarol, air panas asam, tanah panas, dan alterasi asam kuat, yang merupakan indikasi sistem panas bumi yang aktif. Penelitian geokimia pada daerah Jaboi menunjukkan adanya reservoir panas bumi dengan suhu tinggi, dengan estimasi suhu sekitar 228°C menggunakan geotermometer Na/K. manifestasi panas bumi Jaboi terdiri dari hembusan gas dan adanya sublimasi belerang pada fumarol jaboi, dengan temperatur 98.4-99.5 0C, tanah panas dan mata air panas. Pengukuran panas bumi menggunakan geothermometer dan temperatur bawah permukaan, Penggunaan geotermometer untuk mengukur temperatur reservoir panas bumi, misalnya

geotermometer Na/K atau Na-K-Ca. Pengukuran temperatur bawah permukaan melalui pemboran untuk mengetahui temperatur reservoir dan potensi energi panas bumi. Dan juga Pengukuran permeabilitas dan porositas reservoir panas bumi untuk mengetahui kemampuan fluida panas bumi bergerak dan tersimpan. Analisis kimia fluida panas bumi (air dan gas) untuk mengetahui komposisi dan karakteristiknya.

2.2.6.3 Geofisika

Metode geofisika digunakan untuk memetakan struktur bawah permukaan dan mengidentifikasi lokasi reservoir panas bumi. Sumber daya energi panas bumi di Jaboi, Sabang, dapat diklasifikasikan berdasarkan geofisika, yaitu dengan mengidentifikasi dan mengukur karakteristik fisik dari reservoir panas bumi tersebut. Studi geofisika ini mencakup survei geologi, pengukuran panas bumi, dan studi hidrogeologi, serta interpretasi data tersebut untuk memahami potensi dan karakteristik reservoir panas bumi Jaboi. Pengukuran geofisika, seperti seismik, magnetik, dan gravitasi, untuk mendeteksi struktur bawah permukaan dan karakteristik reservoir panas bumi.

Eksplorasi sumber daya panas bumi di Jaboi melibatkan integrasi data dari geologi, geokimia, dan geofisika untuk mengidentifikasi dan memanfaatkan potensi energi panas bumi. Dengan pendekatan yang komprehensif ini, diharapkan dapat dikembangkan sumber energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk memenuhi kebutuhan energi di daerah tersebut.

2.3 Rencana Pengembangan PLTP Jaboi

Pembangunan PLTP Jaboi di Kota Sabang direncanakan akan dikembangkan oleh PT Sabang Geothermal Energi. Perusahaan tersebut telah melaksanakan pra-studi kelayakan guna memastikan kesesuaian lokasi pengembangan PLTP di kawasan Jaboi, termasuk melalui kegiatan pengeboran sumur panas bumi yang akan dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Pengembangan panas bumi Jaboi diproyeksikan mampu mengurangi ketergantungan penggunaan bahan bakar solar pada sistem pembangkit listrik di

Sabang. Selain itu, pemanfaatan energi panas bumi dinilai lebih ramah lingkungan karena menghasilkan tingkat pencemaran udara yang lebih rendah dibandingkan pembangkit berbahan bakar minyak, gas, maupun batubara.

2.4 Emisi Gas Rumah Kaca

Emisi gas rumah kaca merupakan kelompok gas di atmosfer yang berperan penting dalam terjadinya fenomena pemanasan global. Gas-gas tersebut menyebabkan sebagian energi panas dari sinar matahari yang dipantulkan permukaan bumi tidak dapat dilepaskan kembali ke atmosfer, sehingga panas terperangkap dan meningkatkan suhu permukaan bumi. Selain itu, sebagian besar radiasi inframerah yang dipancarkan bumi akan diserap oleh awan dan gas rumah kaca, kemudian dipantulkan kembali ke permukaan bumi (Rahmawati et al., 2020). Fenomena pemanasan global pada dasarnya dipicu oleh peningkatan konsentrasi emisi gas berbahaya yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia. Kondisi tersebut dapat mengganggu keseimbangan atmosfer dan berdampak pada penurunan kualitas lapisan pelindung bumi terhadap radiasi matahari, khususnya sinar ultraviolet. Akibatnya, berbagai aspek kehidupan, seperti manusia, hewan, tumbuhan, serta ekosistem bumi secara keseluruhan, dapat mengalami dampak negatif. Beberapa jenis gas rumah kaca utama yang terakumulasi di atmosfer meliputi karbon dioksida (CO_2), metana (CH_4), dinitrogen monoksida (N_2O), hidrofluorokarbon (HFCs), perfluorokarbon (PFCs), dan sulfur heksafluorida (SF_6) (Dewi et al., 2017).

- GRK bersumber dari berbagai macam aktivitas industri, Emisi gas rumah kaca dapat berasal dari proses alami maupun dari berbagai aktivitas manusia, seperti sektor transportasi, pembangkitan energi, industri, dan kegiatan lainnya. Permasalahan emisi gas rumah kaca pada dasarnya mencakup dua aspek utama, yaitu upaya pengurangan emisi dari sumber penghasil emisi serta peningkatan potensi penyerapan gas rumah kaca di lingkungan.
- **Pembakaran Bahan Bakar Fosil:**
 - Sektor ini adalah penyumbang terbesar emisi GRK, mencakup penggunaan bahan bakar untuk pembangkit listrik, pemanasan, dan

transportasi.

- Sekitar 74% dari emisi yang disebabkan oleh manusia berasal dari aktivitas ini.
- **Proses Industri:**
 - Emisi juga dihasilkan dari proses industri, produksi semen, baja, dan bahan kimia.
 - Proses ini sering kali melibatkan pembakaran bahan bakar fosil dan pelepasan gas rumah kaca lainnya.
- **Pertanian:**
 - Sektor pertanian berkontribusi signifikan terhadap emisi, terutama melalui penggunaan pupuk nitrogen, pengelolaan limbah ternak, dan pembakaran sisa tanaman.
 - Metana (CH_4) dan nitrous oxide (N_2O) adalah yang dihasilkan dari aktivitas pertanian.
- **Perubahan Penggunaan Lahan:**
 - Deforestasi dan konversi lahan untuk pertanian atau pemukiman menyebabkan pelepasan karbon dioksida (CO_2) yang tersimpan di pohon dan tanah.
 - Perubahan ini mengurangi kemampuan ekosistem untuk menyerap CO_2 dari atmosfer.
- **Pengelolaan Limbah:**
 - Tempat pembuangan sampah dan pengolahan limbah menghasilkan emisi GRK, terutama metana, yang dihasilkan dari dekomposisi bahan organik.
 - Pengelolaan limbah yang tidak efisien dapat meningkatkan emisi dari sektor ini.
- **Sektor Energi:**
 - Selain pembakaran bahan bakar fosil, sektor energi juga mencakup emisi dari pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan yang tidak sepenuhnya bersih.

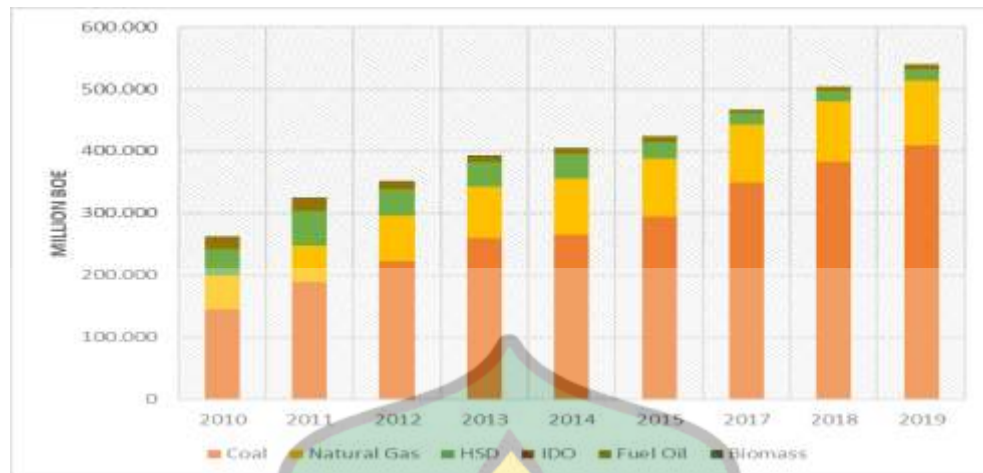
- Emisi dari pembangkit listrik tenaga nuklir dan hidro juga perlu diperhitungkan meskipun lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

Sumber emisi gas rumah kaca berasal dari berbagai sektor dan aktivitas, sehingga penanganannya memerlukan upaya yang menyeluruh dan berkelanjutan. Pengurangan emisi gas rumah kaca dapat dilakukan melalui berbagai langkah strategis, seperti pemanfaatan energi terbarukan, peningkatan efisiensi energi, serta pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan guna meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

2.4.1 Emisi Gas Rumah Kaca dari Sektor Energi Listrik

Sumber emisi gas rumah kaca pada sektor ketenagalistrikan terutama berasal dari proses produksi energi listrik yang dihasilkan oleh berbagai jenis pembangkit, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD), Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG), dan pembangkit berbahan bakar fosil lainnya. Besarnya emisi yang dihasilkan dipengaruhi oleh volume konsumsi bahan bakar yang digunakan selama proses pembangkitan listrik. Semakin besar kebutuhan bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik, maka semakin tinggi pula emisi gas rumah kaca yang dihasilkan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2013).

Dalam periode 2010–2019, konsumsi bahan bakar untuk sektor pembangkit listrik di Indonesia didominasi oleh batubara. Persentase penggunaan batubara meningkat dari 55,12% pada tahun 2010 menjadi 76,22% pada tahun 2019. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) masih memegang peranan utama dalam penyediaan energi listrik bagi masyarakat Indonesia (KESDM, 2020).



Gambar 2.9 konsumsi bahan Bakar pada pembangkit listrik

Sumber: Dokumen Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi (2020).

2.4.2 Perhitungan Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi

Emisi gas rumah kaca (GRK) pada sektor energi dikelompokkan ke dalam dua kategori utama, yaitu emisi yang berasal dari pembakaran bahan bakar dan emisi fugitive. Emisi dari pembakaran bahan bakar merupakan emisi yang dihasilkan akibat proses oksidasi bahan bakar secara sengaja untuk menghasilkan energi panas. Sementara itu, emisi fugitive adalah emisi gas rumah kaca yang terlepas ke atmosfer secara tidak disengaja sebagai akibat dari proses produksi, pengolahan, distribusi, dan penyediaan energi (Yudha, 2019). *Intergovernmental Panel on Climate Change* pada tahun 2006 menerbitkan pedoman inventarisasi gas rumah kaca sektor energi melalui dokumen **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 2**. Pedoman tersebut menjelaskan bahwa metode perhitungan emisi gas rumah kaca dibagi menjadi tiga tingkat pendekatan atau “tier” berdasarkan tingkat ketelitian dan kompleksitas data yang digunakan, yaitu sebagai berikut:

- a. Tier 1: Perhitungan dilakukan berdasarkan data aktivitas dan faktor emisi default IPCC.
- b. Tier 2: Perhitungan dilakukan berdasarkan data aktivitas yang lebih akurat dan faktor emisi default IPCC atau faktor emisi spesifik suatu negara, atau pabrik.

- c. Tier 3: Perhitungan dilakukan berdasarkan metode spesifik suatu negara dengan data aktivitas yang lebih akurat (pengukuran diukur secara langsung) dan faktor emisi spesifik suatu negara atau suatu pabrik.

Sistem tier menggambarkan tingkatan ketelitian dan keakuratan dalam perhitungan emisi gas rumah kaca. Pada setiap tingkatan tier terdapat perbedaan kualitas, keakuratan, dan ketidakpastian data. Semakin tinggi tier yang digunakan maka semakin akurat hasil perhitungan emisi gas rumah kaca, namun hal ini harus didukung dengan data yang lebih detail dan akurat. Perhitungan emisi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan IPPC Tier 1 sebagai berikut:

$$ECO_2 = DA \times FE \dots \dots \dots (6)$$

Dimana:

E : Emisi GRK (ton)

DA : Data Aktivitas (TJ)

FE : Faktor Emisi (ton/TJ)

Data aktivitas merupakan volume bahan bakar yang dibakar secara sengaja untuk keperluan energi dan bukan bahan baku proses. Sementara itu data aktivitas sumber emisi yang berasal dari pembangkit listrik adalah jumlah volume konsumsi bahan bakar yang digunakan. Sedangkan Faktor emisi merupakan nilai koefisien yang menghubungkan banyaknya suatu polutan yang dilepaskan ke atmosfer dari suatu kegiatan yang menghasilkan polutan.

RETScreen dapat menghitung pengurangan gas emisi pada sektor energi terbarukan terdapat 3 tingkatan atau juga disebut dengan *tier* yang bisa menghitung emisi dengan spesifik dan akurat diantaranya yaitu *tier 1* meliputi perhitungan yang dapat dilakukan berdasarkan data aktivitas dan juga faktor emisi yang *default* dari IPCC, *tier 2* meliputi perhitungan yang dilakukan berdasarkan metode lebih spesifik dan akurat berdasarkan faktor emisi suatu negara atau suatu pabrik. *Tier 3* meliputi perhitungan yang dilakukan berdasarkan emisi suatu pabrik atau negara yang lebih akurat dan diukur secara langsung. Pada penelitian ini berdasarkan perhitungan emisi di *RETScreen* dengan tingkatan ketelitian dalam menghitung emisi gas rumah kaca yang berbeda-beda pada setiap

tingkatannya, semakin tinggi tier yang digunakan maka semakin akurat hasil perhitungan emisi gas rumah kaca, namun hal ini harus didukung dengan data yang lebih detail dan akurat. Maka perhitungan emisi yang dapat dihitung dengan menggunakan tigkatan atau tier 2 supaya lebih akurat dan detail dalam perhitungan pengurangan emisi gas rumah kaca tersebut.

2.5 Analisis kelayakan

Evaluasi kelayakan merupakan langkah krusial yang harus dilaksanakan, baik untuk ekspansi bisnis yang sudah ada maupun pembentukan badan usaha baru, termasuk pengembangan proyek pembangkit listrik tenaga panas bumi. Tujuan evaluasi ini adalah untuk menilai potensi keuntungan finansial versus potensi kerugian dari suatu investasi. Lebih lanjut, analisis kelayakan berfungsi sebagai faktor penentu bagi investor dalam memutuskan untuk menanamkan modalnya di suatu perusahaan.

Dalam rangka mengukur kelayakan suatu usulan investasi, dibutuhkan suatu instrumen indikator yang mampu menjembatani disparitas antara nilai moneter di masa depan dengan nilai moneter saat ini. Instrumen ini dikenal sebagai *Profitability Indicator*, yang berlandaskan pada prinsip *present value of money* dan diaplikasikan menggunakan pendekatan *metode engineering economy*.

1. Net Present Value (NPV)

NPV adalah selisih antara total arus kas diskonto yang diharapkan dari suatu investasi dan investasi awal. Dengan kata lain, NPV adalah nilai yang menunjukkan jumlah yang akan dihasilkan oleh suatu investasi. NPV diukur dengan menghitung semua arus kas masa depan secara mundur ke titik waktu saat ini. Jika metode NPV menghasilkan hasil positif, proyek tersebut layak.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t} \dots \dots \dots (7)$$

Kriteria evaluasi kelayakan proposal proyek, sebagaimana ditentukan oleh Nilai Sekarang Bersih (NPV), adalah sebagai berikut:

- Jika $NPV > 0$, proyek layak untuk dilaksanakan (feasible).
- Jika $NPV < 0$, proyek tidak layak untuk dilaksanakan.

2. Internal Rate Of Return (IRR)

Metode ini memberikan informasi tentang kemampuan arus kas untuk menghasilkan laba atas investasi yang dinyatakan dalam persentase. Pada dasarnya, metode ini mengukur efektivitas arus kas dalam memulihkan modal awal. Kemampuan ini dikenal sebagai Tingkat Pengembalian Internal (IRR) dan harus dibandingkan dengan Tingkat Pengembalian Minimum yang Menarik (MARR). Oleh karena itu, suatu proyek investasi dianggap layak atau menguntungkan jika memenuhi kriteria berikut: $IRR > MARR$

Dapat dikatakan bahwa IRR adalah *discount rate* pada NPV sama dengan nol.

$$\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+IRR)^t} \dots \dots \dots (8)$$

3. Payback Period (PBP)

Analisis *payback period* pada dasarnya bertujuan untuk mengetahui jangka waktu yang dibutuhkan agar investasi yang telah dikeluarkan dapat kembali melalui keuntungan atau arus kas yang diperoleh hingga mencapai kondisi titik impas (*Break Even Point/BEP*). Dengan demikian, periode pengembalian (k) menunjukkan lamanya waktu yang diperlukan suatu proyek untuk menutup kembali total biaya investasi awal.

$$\sum_{t=0}^n CF_t \geq 0 \dots \dots \dots (9)$$

Untuk menentukan kelayakan ekonomi suatu rencana investasi, diperlukan kriteria atau ukuran evaluasi tertentu. Dalam metode periode pengembalian modal (*payback period*), suatu rencana dianggap layak jika periode pengembalian modal (k) kurang dari atau sama dengan umur ekonomis proyek (n), dan dinyatakan tidak layak jika sebaliknya.

k = jumlah periode pengembalian

n = umur investasi

4. Benefit cost Ratio (BCR)

Rasio manfaat-biaya (BCR) merupakan alat analisis yang umum digunakan pada tahap awal evaluasi investasi atau berfungsi sebagai studi pelengkap untuk

memvalidasi temuan metode evaluasi alternatif. Pendekatan BCR menekankan proporsi kuantitatif antara manfaat yang diharapkan dengan pengeluaran dan potensi kerugian (biaya) yang timbul akibat realisasi investasi.

$$BCR = \frac{\text{Total Manfaat}}{\text{Total Biaya}} \dots \dots \dots (10)$$

Untuk mengetahui apakah suatu rencana investasi layak ekonomis atau tidak setelah metode ini adalah:

Jika :

$BCR \geq 1$ investasi layak (feasible)

$BCR < 1$ investasi tidak layak

2.6 Rencana Pembangkit Listrik Yang Akan Dibangun di Aceh

Dalam pemenuhan suplai energi listrik di masa yang akan datang, Perusahaan Listrik Negara (PLN) telah merencanakan pengembangan pembangkit listrik pada setiap Provinsi di Aceh. Berdasarkan RUPTL 2021-2030, peningkatan pembangkit listrik untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik dilihat pada tabel .2.1

Tabel 2.1 Pembangkit Listrik Yang Direncanakan Hingga 2030

Jenis Pembangkit	Lokasi>Nama Pembangkit	Kapasitas (MW)	Pengembang
PLTU	Nagan Raya	460	PLN
PLTA	Kluet	120	PLN
PLTA	Tenom 3	240	PLN
PLTA	Jambo Aye	140	PLN
PLTP	Seulawah Agam	110	IPP

Sumber: RUPTL 2021-2030

2.6.1 Potensi PLTP di Provinsi Aceh

Berdasarkan data dari (ESDM) 2024, jumlah PLTP dengan kapasitas besar yang ada di Provinsi Aceh sebanyak lima unit, berikut Adalah data dan spesifikasi pembangkit listrik dilihat pada Tabel 2.4:

Jenis Pembangkit Listrik	Lokasi	Jenis Energi	Potensi (MW)	Lokasi
PLTP	Kota Sabang,Jaboi	Panas Bumi	40	Kota Sabang
	Seulawah Agam	Panas bumi	110	Aceh Besar
	G.Geurudong	Panas Bumi	120	Bener Meuriah
	Gunung Kembar	Panas Bumi	100	Gayo Lues
	Lokop	Panas Bumi	40	Aceh Timur
total			410	

Tabel 2.2 Potensi PLTP Provinsi Aceh

Sumber: QANUN Aceh 2019 Tentang Rencana Umum Energi ACEH

2.7 Software RETScreen

2.7.1 Pengenalan RETScreen

RETScreen adalah perangkat lunak yang diadopsi secara global untuk menilai kinerja produk energi, menganalisis total biaya kepemilikan, dan mengukur pengurangan emisi gas rumah kaca yang terkait dengan berbagai teknologi energi terbarukan dan hemat energi. Lebih lanjut, *RETScreen* memfasilitasi pengembangan kebijakan energi strategis. Didukung dalam 36 bahasa, perangkat lunak ini secara substansial mengurangi biaya finansial dan waktu yang diperlukan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi kelayakan proyek energi terbarukan dan efisiensi energi

RETScreen memudahkan para pembuat kebijakan dan praktisi untuk menilai potensi keberhasilan inisiatif energi terbarukan. Perangkat lunak ini dirancang sebagai alat untuk mendukung studi kelayakan proyek energi terbarukan, dengan mengintegrasikan tahapan analisis proyek yang selaras dengan standar global. Tahapan ini meliputi evaluasi kondisi geografis lokasi proyek, penerapan teknologi energi terbarukan yang relevan, kuantifikasi produksi energi, estimasi

biaya, penghitungan pengurangan emisi, dan penilaian risiko. RETScreen, yang dikembangkan oleh CanmetENERGY di Kanada, memiliki kemampuan untuk menyediakan studi kelayakan yang komprehensif untuk berbagai jenis energi terbarukan, termasuk energi angin, surya, hidro, dan panas bumi. Keluaran perangkat lunak ini meliputi indikator kapasitas energi, proyeksi pengurangan emisi karbon dioksida, evaluasi keuangan, dan analisis risiko (Arif, 2025). Lebih lanjut, RETScreen juga memiliki fungsi untuk menilai kelayakan penerapan sumber energi konvensional atau tak terbarukan, seperti turbin gas, turbin uap, dan mesin konversi energi lainnya



Gambar 2.10 Tampilan awal RETScreen

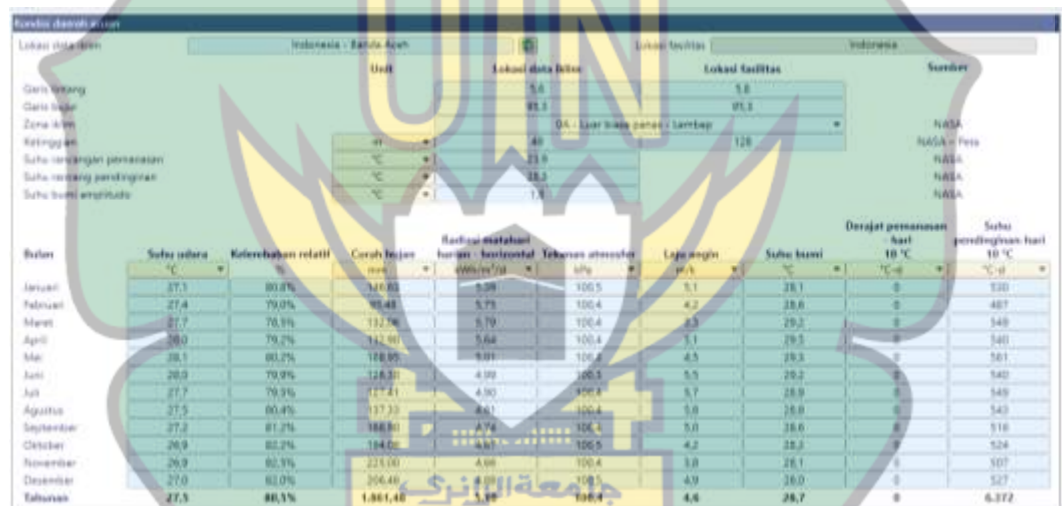
2.7.2 Bagian-Bagian RETScreen

1. Penganalisis Energi Virtual: pada halaman ini Pengguna akan mengawali kajian mengenai energi dan melanjutkan dengan pemilihan sebuah institusi.
2. Tolak Ukur: pada tab ini pengguna memulai dengan memilih Lokasi dan fasilitas. Tolak ukur energi memungkinkan pengguna mengambil kesimpulan cepat untuk mengukur kinerja energi suatu fasilitas konsumsi energi.

3. Kinerja: memungkinkan pengguna untuk mengawasi, Menganalisis dan melaporkan data utama terkait kinerja energi kepada operator fasilitas, manajer, serta pengambil keputusan. Analisis kinerja tersebut terintegrasi dengan data cuaca berbasis satelit yang diperoleh secara langsung dari NASA untuk seluruh permukaan bumi, serta terhubung dengan standar *Green Button* dalam pengelolaan data energi.

2.7.3 Penggunaan RETScreen

- a. Mencari Lokasi terlebih dahulu yang akan digunakan, pada menu ini semua sudah otomatis terdeteksi seperti suhu, cuaca, curah hujan, kelembaban, laju angin, dll. dilihat pada gambar 2.11



Bulan	Suhu udara °C	Kelembaban relatif %	Curah hujan mm	Radikasi matahari harian - horizontal kWh/m ² /day	Tekanan atmosfer kPa	Laju angin m/s	Suhu bumi °C	Derajat pemanasan hari 10 °C	Suhu pendinginan hari 10 °C
Januari	27.3	80.0%	110.83	5.09	100.5	5.1	28.1	0	120
Februari	27.4	79.0%	85.48	5.73	100.4	4.2	28.6	0	487
Maret	27.7	78.9%	132.76	5.70	100.4	3.3	29.2	0	549
April	28.0	79.2%	132.90	5.64	100.4	3.1	29.5	0	540
Mei	28.3	80.2%	128.95	5.91	100.3	4.5	29.3	0	561
Juni	28.0	79.9%	128.30	4.92	100.3	5.5	29.2	0	540
Juli	27.7	79.9%	117.41	4.90	100.3	5.7	28.9	0	549
Agustus	27.5	80.4%	137.33	4.61	100.4	5.8	28.8	0	543
September	27.2	81.2%	166.80	4.74	100.4	5.0	28.6	0	516
Oktober	26.9	82.2%	184.02	4.67	100.5	4.2	28.2	0	524
November	26.9	82.9%	223.00	4.66	100.4	3.8	28.1	0	507
Desember	27.0	83.0%	206.46	4.89	100.5	4.9	28.0	0	527
Tahunan	27.5	80.3%	1,861.48	5.39	100.4	4.6	28.7	0	6,372

Gambar 2.11 Tampilan Lokasi

- b. Selanjutnya beralih ke menu fasilitas, lalu pilih tipe yang dipakai untuk pembuatan proyek energi yang diinginkan. Tampilannya terdapat pada gambar 2.12



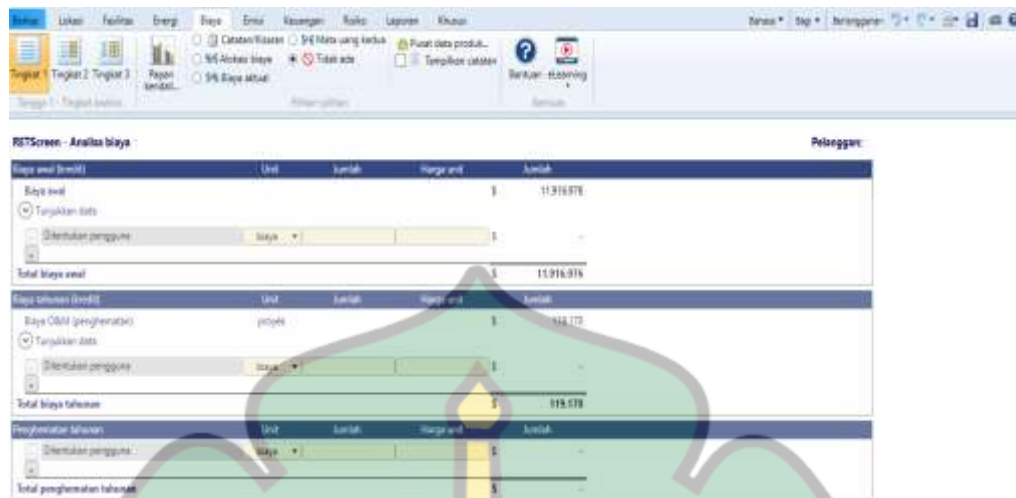
Gambar 2.12 Tampilan Menu Fasilitas

- c. Menu energi, pada menu ini pengguna bisa menambahkan daya energi terbarukan yang akan dipakai, seperti energi panas bumi (Geothermal), dll. Bisa dilihat pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Tampilan Menu Energi

- d. Bagian menu biaya. Pada tahap ini diperlukan data yang lengkap dan akurat sebagai dasar perhitungan ekonomi proyek. Tahapan ini berfungsi untuk membantu penyusunan estimasi biaya secara menyeluruh, mulai dari biaya investasi awal, pembangunan sistem pembangkit, keseimbangan sistem (balance of system), hingga komponen biaya lainnya. Tampilan bagian menu biaya dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Tampilan Menu Biaya

- e. Selanjutnya ada menu emisi, pada menu ini kita dapat memperkirakan berapa gas emisi yang terdapat pada suatu proyek yang kita teliti seperti emisigas rumah kaca, emisi karbon dioksida, dll. Dapat dilihat tampilannya di gambar 2.15



Gambar 2.15 Tampilan Menu Analisa Emisi

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul	Hasil
1	Ramadhan, F.2019	Kajian Dampak Lingkungan Pembangkit Listrik Panas Bumi di Jawa Barat	Evaluasi dampak operasional PLTP terhadap kualitas udara dan pengeolaan limbah panas bumi di kawasan Jawa Barat. Dampak lingkungan bisa mencakup ancaman terhadap hutan lindung, erosi, perubahan kualitas air, dan potensi gempa bumi. Dampak sosial bisa meliputi relokasi penduduk, perubahan mata pencaharian, dan potensi konflik. Dampak ekonomi bisa meliputi peluang investasi, lapangan kerja, dan potensi peningkatan pendapatan daerah.
2	Khasmadin, Mochammad Fa'iq Harmoko, Udi ,2021	Overview Potensi Panas Bumi di Provinsi Jawa Barat	Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki karakteristik ramah lingkungan, sehingga menjadi salah satu keunggulan utama dalam pemanfaatannya sebagai sumber energi alternatif. Secara umum, potensi energi panas bumi tidak dimiliki oleh seluruh negara, melainkan terutama terdapat pada negara-negara yang berada di jalur cincin api (<i>ring of fire</i>). Indonesia termasuk salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia, yang ditandai dengan keberadaan sekitar 117 gunung api aktif yang tersebar di berbagai wilayah nusantara. Potensi energi panas bumi di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 40% dari total potensi panas bumi dunia atau sekitar 29.544 MW. Namun demikian, tingkat pemanfaatannya masih relatif rendah. Hingga tahun 2019, kapasitas panas bumi yang telah dimanfaatkan sebagai

			pembangkit listrik baru mencapai sekitar 2.130,7 MW atau sekitar 7,2% dari total potensi yang tersedia. Oleh karena itu, pemerintah menargetkan peningkatan bauran energi melalui pengembangan pembangkit listrik tenaga panas bumi sebesar 7,2 GW pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 17,6 GW pada tahun 2050. Jawa Barat merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki potensi panas bumi cukup besar. Bahkan, sekitar 56% kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga panas bumi di Indonesia saat ini berasal dari wilayah Jawa Barat.
3.	Husein, Maura Chrisantia, 2024	Kelayakan Teknoekonomi PLTP di Indonesia Menggunakan Retscreen dengan Mempertimbangkan Mekanisme Kredit Karbon Untuk Mencapai NDC 2060 Indonesia	Besarnya cadangan panas bumi di Indonesia menjadikan negara ini memiliki potensi energi panas bumi yang sangat melimpah. Salah satu potensi tersebut terdapat pada proyek Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Gunung Kembar dengan kapasitas potensi sebesar 330 MW. Dalam penelitian ini, dikembangkan empat skenario untuk menentukan kelayakan proyek berdasarkan harga kredit karbon dan umur proyek. Skenario pertama disusun untuk mengevaluasi kondisi profitabilitas PLTP di Indonesia saat ini dengan mempertimbangkan harga karbon sebesar 2 USD per ton CO₂ sesuai dengan ketentuan dalam Undang-Undang Nomor 7 Tahun 2021 serta umur proyek selama 25 tahun. Skenario kedua menggunakan umur proyek yang sama, namun dengan peningkatan harga kredit karbon dari 2 USD menjadi 18 USD per ton CO₂. Selanjutnya, skenario ketiga mempertimbangkan perubahan umur proyek dari 25 tahun menjadi 30

			tahun dengan mengacu pada umur operasional PLTP Sarulla berkapasitas 330 MW. Adapun skenario keempat merupakan skenario usulan yang menggunakan harga kredit karbon sebesar 50 USD per ton CO₂ berdasarkan rekomendasi Dana Moneter Internasional atau International Monetary Fund, serta menetapkan umur proyek selama 30 tahun. Hasil pemodelan menggunakan perangkat lunak RETScreen menunjukkan bahwa kapasitas daya yang sesuai untuk satu unit PLTP dari potensi 330 MW tersebut adalah sebesar 21 MW dengan mempertimbangkan ketersediaan aliran uap serta berbagai aspek teknis lainnya. Oleh karena itu, pemerintah Indonesia disarankan untuk meningkatkan harga karbon hingga mencapai 50 USD per ton CO₂ guna meningkatkan keuntungan proyek serta menarik minat investor dalam pengembangan energi terbarukan.
4.	(Isa & Suhud, 2019)	Hasil Uji Kandungan Kation dan Anion Sampel Mata Air Panas Jaboi, Sabang	Hasil analisis geokimia menunjukkan estimasi temperatur bawah permukaan uap panas Jaboi sekitar 220°C. Temperatur tersebut menunjukkan potensi panas bumi Jaboi berada pada tingkat sedang dan berpeluang dikembangkan untuk energi terbarukan. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem panas bumi Jaboi memiliki temperatur sedang hingga tinggi dan berpotensi untuk dikembangkan sebagai sumber energi bagi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi. Namun, pengembangan lebih lanjut tetap memerlukan kajian tambahan mengenai permeabilitas, porositas, kapasitas reservoir,

			serta kelayakan ekonomi proyek.
5.	Falqahiyah, Chandra Benyamin, Benyamin,2021	Analisis Kelayakan Proyek Pembangkit Listrik Energi Panas Bumi Area “Cfa”	Kebutuhan energi listrik di Indonesia saat ini terus mengalami peningkatan yang signifikan seiring dengan bertambahnya kebutuhan masyarakat serta perkembangan berbagai sektor kehidupan. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi untuk dikembangkan sebagai pembangkit listrik adalah energi panas bumi. Selain ramah lingkungan, energi panas bumi juga dinilai mampu mendukung konsep pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan proyek pembangkit listrik tenaga panas bumi pada daerah penelitian berdasarkan potensi cadangan serta parameter keekonomiannya. Lokasi penelitian berada pada area “CFA” yang terletak di Kabupaten Lebong, Provinsi Bengkulu. Metode penelitian yang digunakan meliputi analisis potensi cadangan panas bumi, pengembangan model keuangan, serta analisis sensitivitas terhadap nilai <i>Net Present Value</i> (NPV) proyek. Hasil penelitian menunjukkan bahwa area “CFA” memiliki potensi cadangan panas bumi terduga sebesar 475,6 MWe. Berdasarkan potensi tersebut, wilayah ini dinilai memungkinkan untuk dikembangkan menjadi proyek pembangkit listrik tenaga panas bumi dengan kapasitas pembangkitan sebesar 55 MWe.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan memanfaatkan simulasi menggunakan perangkat lunak *RETScreen* untuk menganalisis kelayakan teknis dan ekonomis proyek. Pendekatan deskriptif kuantitatif digunakan untuk memberikan gambaran serta informasi mengenai objek penelitian berdasarkan data dan sampel yang diperoleh tanpa melakukan manipulasi atau rekayasa terhadap data tersebut. Dengan demikian, metode deskriptif bertujuan untuk menguraikan dan menjelaskan hasil penelitian secara sistematis sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian berlokasi di Desa Jaboi Kecamatan Suka Jaya Kota Sabang. Dari hasil observasi lokasi yang direncanakan sebagai lokasi Pengembangan PLTP tersebut,



Gambar 3.1 Peta Penelitian

3.3 Alat dan bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Spesifikasi Alat Penelitian

No	Nama Alat	Spesifikasi	Fungsi
1.	Laptop	Laptop- <i>Intel Core</i> i3-6006U 2.0 GHz atau i3-7020U- 4GB DDR3L- HDD 500GB atau 1TB- LED 14 inci HD (1366 x 768 piksel)	Digunakan untuk melakukan simulasi, dan pengolahan data
2.	<i>RETScreen</i>	<i>RETScreen Expert</i> 8.0.1.31	Merupakan sistem perangkat lunak manajemen energi bersih yang digunakan untuk analisis efisiensi energi, energi terbarukan, kelayakan proyek kogenerasi, serta evaluasi kinerja energi secara berkelanjutan..
3.	<i>Microsoft Office</i>	<i>Microsoft Office</i> 2010	Untuk menulis dan menyusun tugas akhir.

3.4 Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan guna memperoleh data primer yang diperlukan dalam mendukung proses analisis dan pelaksanaan penelitian. dan data sekunder diperlukan dalam perencanaan. Data-data tersebut meliputi:

3.4.1 Data Primer

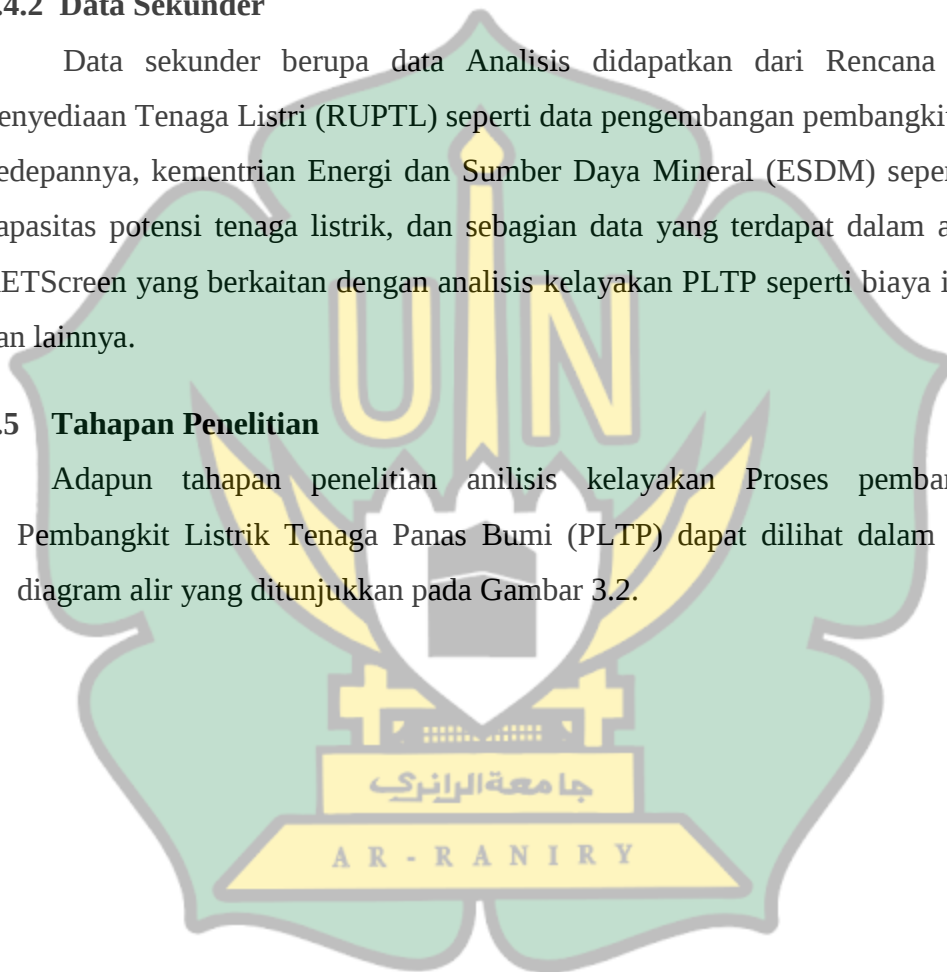
Data primer diperoleh melalui observasi lapangan, wawancara dan survei lapangan. Melalui observasi lapangan akan didapat data berupa data observasi, struktur geologi, geoteknik, geofisika, geokimia, pengukuran temperatur dan tekanan uap, data teknis pembangkit, dan data desain konstruksi.

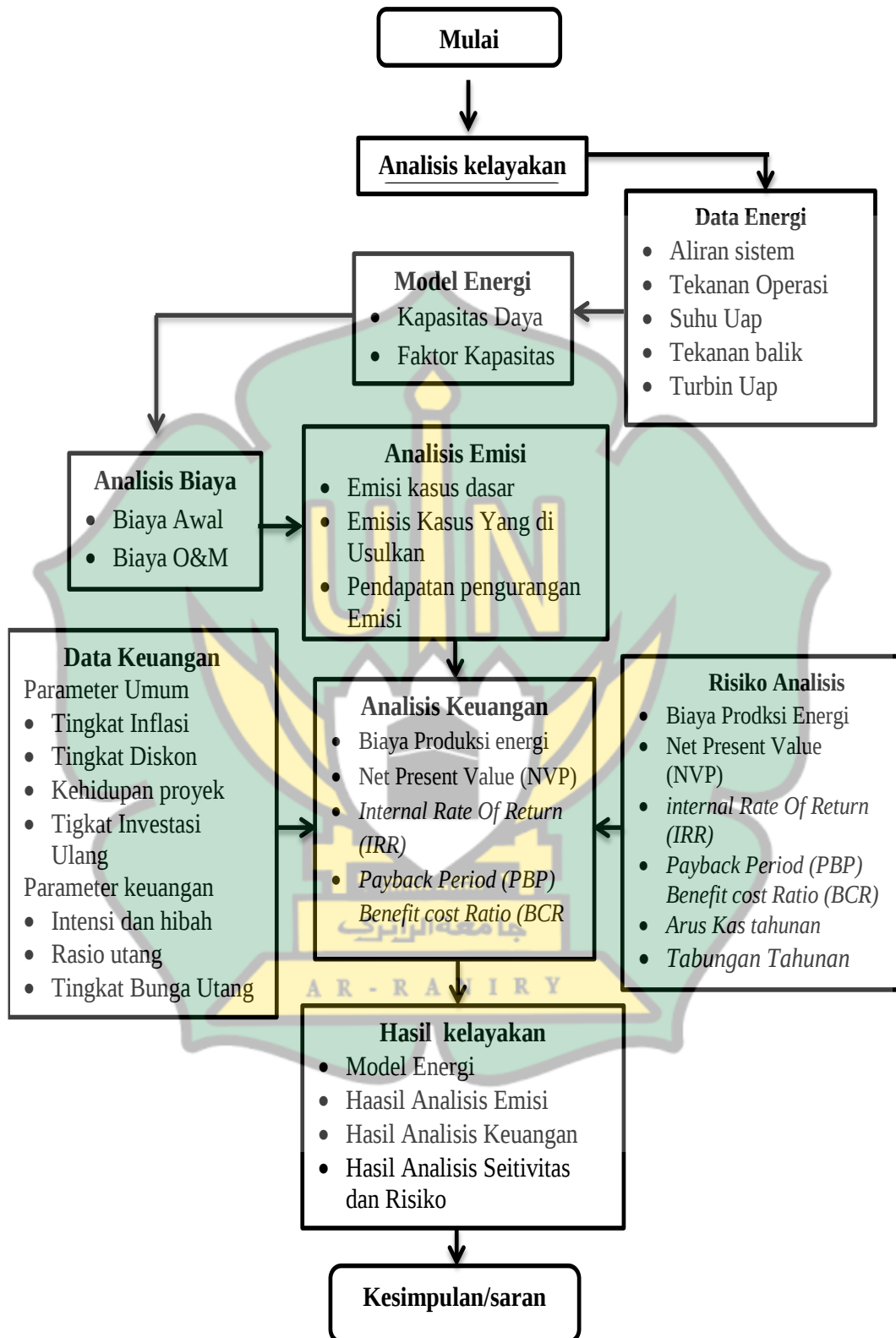
3.4.2 Data Sekunder

Data sekunder berupa data Analisis didapatkan dari Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) seperti data pengembangan pembangkit listrik kedepannya, kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) seperti data kapasitas potensi tenaga listrik, dan sebagian data yang terdapat dalam aplikasi RETScreen yang berkaitan dengan analisis kelayakan PLTP seperti biaya investasi dan lainnya.

3.5 Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian analisis kelayakan Proses pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dapat dilihat dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 3.2.





Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.5.1 Studi Literaatur

Melakukan studi literatur dari beberapa sumber penelitian seperti jurnal dan artikel yang telah dipublikasikan ataupun buku-buku yang berkaitan dengan teori mengenai Pembangkit Listrik Tenaga panas Bumi (PLTP), serta regulasi terkait energi baru terbarukan (EBT).

3.5.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan salah satu tahapan yang dilakukan peneliti untuk memperoleh berbagai informasi dan data yang diperlukan guna mencapai tujuan penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh dari dokumen resmi instansi pemerintah serta sumber terkait lainnya yang dapat diakses melalui situs resmi masing-masing lembaga, seperti Perusahaan Listrik Nasional (PLN), dan Qanun Aceh (Tentang Rencana Umum Energi Aceh). Data sekunder yang dikumpulkan dalam melakukan prakiraan emisi gas rumah kaca dan potensi energi listrik panas bumi.

3.6 Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan data menggunakan *software RETScreen*, dimana tahapan pengolahan dan analisis data meliputi :

3.6.1 Menentukan Parameter Dasar

Akses dengan mengklik ikon 'Kelayakan' pada halaman 'Fasilitas'. Saat menentukan jenis fasilitas di *RETScreen*.

3.7 Perhitungan Kapasitas Pembangkit Listrik Jaboi

Untuk menghitung kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi, kita perlu mempertimbangkan beberapa parameter penting, seperti aliran panas, suhu, kapasitas panas spesifik, dan efisiensi sistem. Berikut adalah langkah-langkah umum untuk melakukan perhitungan kapasitas PLTP:

1. Mengumpulkan Data:

- Laju aliran massa (m) fluida panas bumi (Kg/s).
- Kapasitas panas spesifik (C_p) fluida (J/Kg.K), biasanya untuk air sekitar 4200 J/kg.k.

- Perbedaan suhu (ΔT) antara fluida masuk dan keluar (K)
- Efisiensi sistem (η) (nilai antara 0 dan 1)

2. Menghitung Aliran Panas

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \dots \dots \dots (11)$$

Dimana:

Q = aliran panas (Watt)

m = laju aliran massa

c_p = kapasitas panas spesifik (J/kg.K)

ΔT = perubahan suhu

3. Menghitung Kapasitas Energi

$$P = Q \cdot \eta \dots \dots \dots (12)$$

dimana :

P = kapasitas energi (Watt)

η = efisiensi sistem

kapasitas energi yang dihasilkan oleh PLTP Jaboi adalah 3.15 MW berdasarkan data yang diberikan. Namun, untuk mencapai kapasitas terencana 40 MW, diperlukan penyesuaian parameter seperti laju aliran massa, perbedaan suhu, atau efisiensi sistem.

3.8 Analisis Hasil

Analisa hasil kelayaakan pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi di jaboi Kota Sabang dilakukan untuk mengetahui kelayakan PLTP berdasarkan aspek teknis dan ekonomis. Analisis berdasarkan hasil simulasi *software RETScreen Expert* meliputi *Net Present Value (NPV)*, *internal Rate Of Return (IRR)* dan analisis kelayakan pembangunan PLTP di daerah kota Sabang. Analisis ini untuk menentukan tingkat kelayakan untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) di Jaboi Kota Sabang. Dan juga dilakukan analisis untuk mengetahui seberapa besar emisi yang dapat dimitigasi sebagai efek dari pembangunan PLTP.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Input Parameter

RETScreen digunakan dalam penelitian ini untuk menganalisis kelayakan pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dari aspek teknis, finansial dan lingkungan. Sistem yang dianalisis terdiri dari 1 unit PLTP dengan kapasitas terpasang sebesar 5 MW. Kapasitas ini menunjukkan daya maksimum yang dapat dihasilkan pembangkit pada kondisi operasi penuh. Parameter sumber energi panas bumi yang dimasukkan meliputi aliran uap sebesar 68.400 kg/jam, yang menunjukkan jumlah massa uap yang digunakan untuk menggerakkan turbin setiap jam. Laju aliran massa ini berperan penting dalam menentukan besarnya energi termal Aliran yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik. Semakin besar kapasitas aliran uap yang tersedia, maka semakin besar pula potensi daya listrik yang dapat dihasilkan.

Perangkat lunak *RETScreen* dimanfaatkan dalam penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis kelayakan pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi ditinjau dari aspek teknis, finansial, serta lingkungan. Data tersebut dijadikan sebagai landasan dalam menghitung potensi produksi energi, estimasi biaya investasi, serta menghitung pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proyek pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi ini. Analisis parameter dilakukan menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* dengan memasukkan parameter operasi utama pembangkit listrik tenaga panas bumi. Data parameter menunjukkan bahwa sistem PLTP beroperasi dengan aliran uap sebesar 342.000 kg/jam, yang merupakan nilai tipikal untuk unit turbin kecil-menengah. Ketersediaan sistem mencapai 90%, yang sesuai dengan standar operasi PLTP skala komersial di Indonesia. Tekanan operasi sebesar 1.000 kPa dengan suhu uap 250°C menunjukkan bahwa sistem memanfaatkan kondisi uap jenuh pada reservoir dominasi cairan (*liquid-dominated system*). Adapun input parameter dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Input parameter

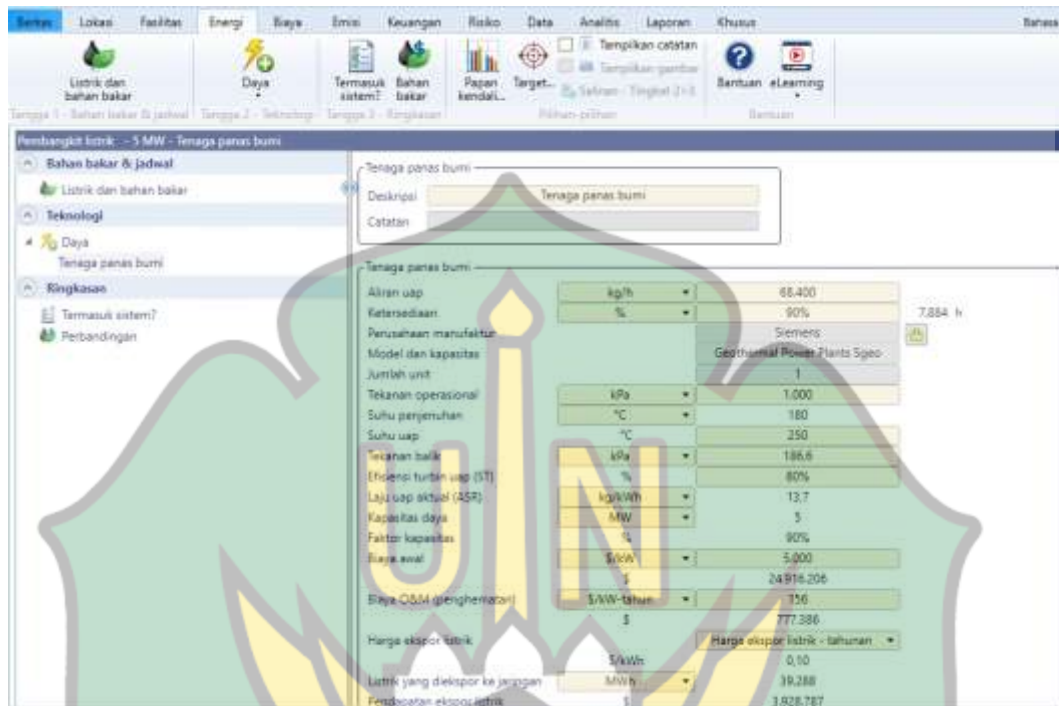
No	Parameter	Nilai	Referensi
1	Aliran uap	342.000 kg/h	Perhitungan
2	Persentase Aliran uap	25%	Ronald DiPippo(2016)
3	Ketersediaan	90%	(Nur et al., 2022)
4	Tekanan Operasional	1.000 kPa	(Zuchrillah et al., 2015)
5	Suhu Uap	250 °C	Ronald DiPippo(2016)
6	Tekanan Balik	186,6 kPa	(Nur et al., 2022)
7	Efisiensi Turbin	80%	Ronald DiPippo(2016)

Tekanan operasional sistem ditetapkan sebesar 1.000 kPa, dengan suhu penjenjutan 180°C dan suhu uap masuk turbin sebesar 250°C. Parameter tekanan dan suhu ini menggambarkan kondisi termodinamika fluida kerja sebelum memasuki turbin. Suhu uap yang lebih tinggi menunjukkan kandungan entalpi yang lebih besar, sehingga meningkatkan potensi konversi energi. Selain itu, tekanan balik (*back pressure*) sebesar 186,6 kPa, yang menunjukkan tekanan pada sisi keluaran turbin. Tekanan balik memengaruhi proses ekspansi uap dan berkontribusi terhadap efisiensi sistem secara keseluruhan. Efisiensi turbin uap diasumsikan sebesar 80%, Nilai ini mencerminkan performa konversi energi yang relatif tinggi dan sesuai dengan karakteristik turbin uap pada pembangkit panas bumi skala menengah. Selain itu, nilai *Actual Steam Rate* (ASR) sebesar 13,7 kg/kWh menunjukkan jumlah uap yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu kilowatt-hour energi listrik. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat konsumsi uap sistem dan efisiensi pemanfaatan sumber daya panas bumi.

4.2 Hasil Pemodelan Energi

Hasil kinerja energi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Jaboi dalam menghasilkan energi listrik berdasarkan parameter teknis dan operasional yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert*. Parameter utama yang dianalisis meliputi

kapasitas terpasang, faktor kapasitas, ketersediaan sistem, serta kondisi termodinamika uap yang digunakan sebagai sumber energi utama pembangkit



Gambar 4.1 Data RETScreen

Proses konversi energi dalam sistem PLTP dimodelkan berdasarkan laju aliran uap sebesar 68.400 kg/jam dengan kondisi tekanan operasional 1.000 kPa dan suhu uap 250°C. Energi termal yang terkandung dalam uap tersebut dikonversi menjadi energi mekanik melalui turbin uap, kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Efisiensi turbin sebesar 80% menunjukkan bahwa sebagian besar energi termal uap dapat dikonversi menjadi energi mekanik. Nilai ini berada dalam rentang efisiensi turbin uap yang umum digunakan pada PLTP skala menengah. Sementara itu, nilai *Actual Steam Rate* (ASR) sebesar 13,7 kg/kWh menunjukkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWh energi listrik diperlukan 13,7 kg uap. Parameter ini menjadi indikator efisiensi pemanfaatan sumber daya panas bumi. Semakin kecil nilai ASR, semakin kecil efisien sistem dalam menghasilkan energi listrik. Tekanan balik turbin sebesar 186,6 kPa juga memengaruhi kinerja ekspansi uap dan efisiensi keseluruhan sistem. Kombinasi parameter-parameter

tersebut menunjukkan bahwa sistem bekerja dalam kondisi operasional yang stabil dan realistis.

Faktor kapasitas sistem ditetapkan sebesar 90%, yang menunjukkan bahwa pembangkit beroperasi mendekati kapasitas nominalnya sepanjang tahun. Nilai ini tergolong tinggi dan sesuai dengan karakteristik pembangkit panas bumi yang berfungsi sebagai pembangkit beban dasar (*base load power plant*). Selain itu, tingkat ketersediaan sistem (*availability factor*) sebesar 90% menunjukkan bahwa pembangkit diasumsikan beroperasi selama 7.884 jam dari total 8.760 jam dalam satu tahun. Asumsi ini telah mempertimbangkan waktu henti operasi akibat pemeliharaan rutin maupun gangguan teknis. Tingginya tingkat ketersediaan sistem berkontribusi langsung terhadap stabilitas produksi energi tahunan.

Secara teknis, Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dinyatakan layak apabila mampu mengoperasikan sistem konversi energi panas bumi menjadi energi listrik secara stabil, efisien, dan berkelanjutan. Dalam penelitian ini, kelayakan teknis ditunjukkan oleh kinerja sistem yang mampu menghasilkan energi listrik sebesar 39.288 MWh/tahun dengan faktor kapasitas dan tingkat ketersediaan mencapai 90%. parameter seperti efisiensi turbin sebesar 80% dan nilai *Actual Steam Rate* (ASR) sebesar 13,7 kg/kWh menunjukkan bahwa proses konversi energi berlangsung secara efisien dengan konsumsi uap yang relatif optimal. Selain itu, kondisi operasi pada tekanan 1.000 kPa dan suhu 250°C mengindikasikan bahwa sistem bekerja pada kondisi uap jenuh yang umum digunakan pada PLTP tipe single flash, sehingga secara teknis realistis dan sesuai dengan PLTP pada umumnya.

Berdasarkan hasil simulasi *RETScreen*, energi listrik yang diekspor ke jaringan tercatat sebesar 39.288 MWh per tahun. Nilai ini diperoleh dari kapasitas terpasang sebesar 5 MW dengan faktor kapasitas 90% dan waktu operasi efektif 7.884 jam per tahun.

Secara matematis, estimasi energi tahunan dapat dihitung menggunakan:

$E = \text{kapasitas} \times \text{jam operasinal} \times \text{tingkat ketersediaan} \dots\dots\dots 13$

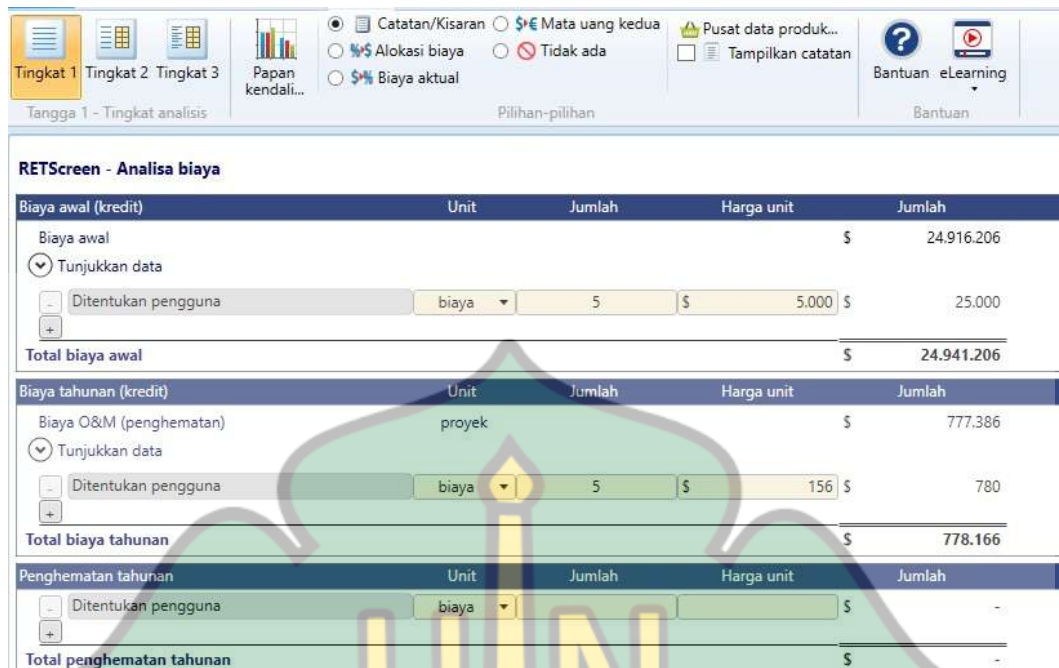
$$E = 5 \times 8.760 \times 90\% = 39.420 \text{ MWh/tahun}$$

Perbedaan antara nilai teoritis (39.420 MWh/tahun) dan hasil simulasi (39.288 MWh/tahun) disebabkan oleh rugi-rugi (*losses*) sistem internal dan konsumsi daya bantu (*auxiliary power consumption*) yang telah diperhitungkan secara otomatis oleh RETScreen. Dengan demikian, nilai 39.288 MWh/tahun merepresentasikan energi bersih yang dapat dijual ke jaringan listrik.

Energi listrik bersih sebesar 39.288 MWh/tahun yang dihasilkan dari sistem ini menunjukkan kontribusi signifikan terhadap penyediaan energi listrik berbasis energi terbarukan. Dengan produksi sekitar 39 GWh per tahun, pembangkit ini berpotensi memenuhi kebutuhan listrik ribuan rumah tangga serta mendukung peningkatan bauran energi baru terbarukan (EBT) dalam sistem kelistrikan. Sebagai pembangkit yang beroperasi secara kontinu, PLTP memiliki keunggulan dalam menjaga kestabilan sistem jaringan dibandingkan dengan pembangkit energi terbarukan yang lain. Oleh karena itu, hasil pemodelan ini tidak hanya menunjukkan kelayakan teknis dari sisi produksi energi, tetapi juga menegaskan peran strategis PLTP dalam mendukung ketahanan energi nasional. Secara keseluruhan, hasil pemodelan energi menunjukkan bahwa sistem PLTP berkapasitas 5 MW mampu menghasilkan energi listrik tahunan yang stabil dan signifikan dengan tingkat efisiensi konversi yang baik.

4.3 Hasil Pemodelan Biaya

Hasil pemodelan biaya diperoleh melalui simulasi menggunakan perangkat lunak RETScreen pada menu *Analisa Biaya*. Pemodelan ini bertujuan untuk mengestimasi kebutuhan investasi awal (*capital cost*), biaya operasi dan pemeliharaan tahunan (*O&M cost*), serta total biaya proyek yang menjadi dasar dalam analisis kelayakan finansial. Seluruh parameter biaya dihitung berdasarkan kapasitas pembangkit sebesar 5 MW dengan asumsi biaya spesifik per satuan daya terpasang.



RETScreen - Analisa biaya

Biaya awal (kredit)	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah
Biaya awal				\$ 24.916.206
Tunjukkan data				
- Ditentukan pengguna	biaya	5	\$ 5.000	\$ 25.000
+				
Total biaya awal				\$ 24.941.206

Biaya tahunan (kredit)	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah
Biaya O&M (penghematan)	proyek			\$ 777.386
Tunjukkan data				
- Ditentukan pengguna	biaya	5	\$ 156	\$ 780
+				
Total biaya tahunan				\$ 778.166

Penghematan tahunan	Unit	Jumlah	Harga unit	Jumlah
- Ditentukan pengguna	biaya			\$ -
+				
Total penghematan tahunan				\$ -

Gambar 4.3 Parameter Biaya

4.3.1 Biaya Investasi Awal (*Initial Capital Cost*)

Hasil pemodelan menunjukkan bahwa total biaya investasi awal proyek PLTP sebesar 24.941.206 USD. Nilai ini terdiri atas: Biaya awal utama (*capital cost*) sebesar 24.916.206 USD. Dan biaya tambahan yang ditentukan pengguna sebesar 25.000 USD, total tersebut mencerminkan seluruh kebutuhan dana pada tahap pembangunan proyek, mulai dari tahap perencanaan hingga konstruksi dan instalasi pembangkit, biaya investasi awal PLTP pada umumnya meliputi:

- pengadaan dan instalasi turbin serta generator,
- pengeboran dan pengembangan sumur panas bumi
- Sistem perpipaan dan separator,
- bangunan pembangkit dan infrastruktur pendukung,
- biaya rekayasa, pengawasan, dan manajemen proyek,
- biaya tidak langsung dan cadangan (*contingency*)

Nilai investasi yang relatif besar menunjukkan bahwa PLTP termasuk proyek yang bersifat padat modal (*capital intensive*). Hal ini merupakan karakteristik umum pembangkit energi terbarukan, khususnya panas bumi, karena sebagian besar biaya dikeluarkan pada tahap awal pembangunan.

4.3.2 Biaya Tahunan (*Annual Cost*)

Selain biaya investasi awal, *RETScreen* juga menghitung estimasi biaya tahunan proyek sebesar 778.166 USD per tahun yang terdiri atas Biaya operasi dan pemeliharaan (O&M). Biaya tahunan ini mencerminkan seluruh pengeluaran rutin selama pembangkit beroperasi. Komponen biaya tersebut meliputi:

- Gaji tenaga kerja operasional
- Pemeliharaan turbin dan generator
- Inspeksi dan perawatan sumur produksi
- Penggantian komponen kecil secara berkala

Berbeda dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil, PLTP tidak memerlukan biaya bahan bakar karena memanfaatkan sumber energi panas bumi yang tersedia secara alami dan berkelanjutan. Oleh karena itu, biaya tahunan relatif lebih stabil dan tidak terpengaruh fluktuasi harga energi global.

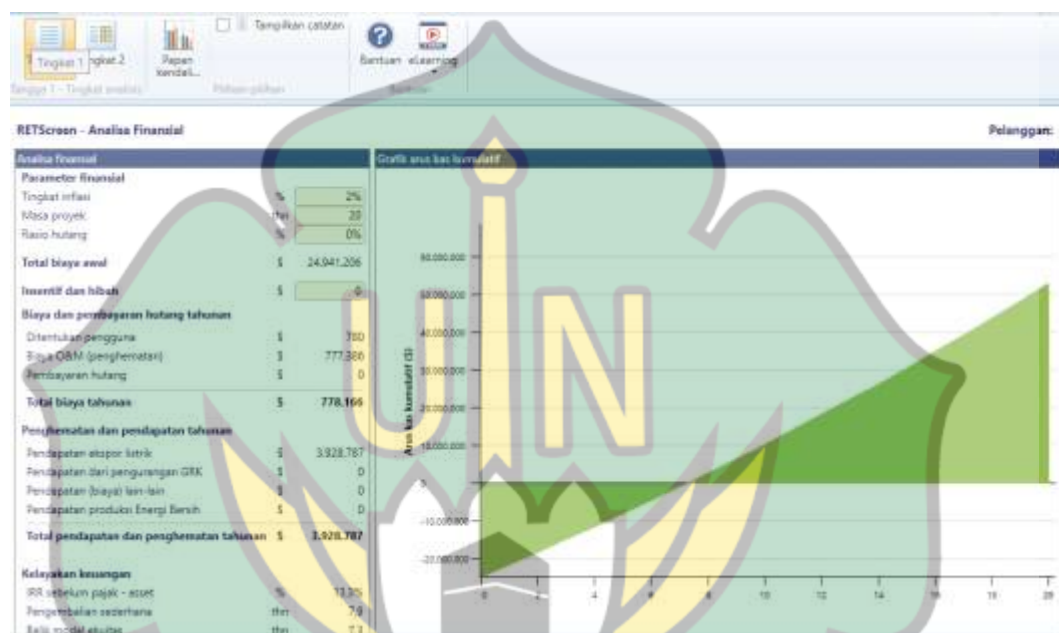
Hasil pemodelan biaya ini menjadi dasar dalam perhitungan kelayakan finansial pada tahap selanjutnya, seperti:

- *Internal Rate of Return* (IRR)
- *Payback Period*

Total investasi sebesar 24.9 juta USD dan biaya tahunan sekitar 778 ribu USD, proyek PLTP ini memiliki struktur biaya yang sesuai dengan karakteristik pembangkit panas bumi pada umumnya. Apabila produksi energi dan harga jual listrik memadai, maka proyek berpotensi menghasilkan arus kas positif dalam jangka panjang. Secara keseluruhan, hasil pemodelan biaya menggunakan *RETScreen* menunjukkan bahwa proyek PLTP memiliki kebutuhan investasi awal yang tinggi, namun biaya operasional tahunan yang relatif rendah dan stabil. Struktur biaya ini mendukung potensi kelayakan ekonomi proyek dalam jangka panjang apabila dikelola secara optimal.

4.4 Hasil Pemodelan Finansial

Analisis finansial dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan investasi proyek selama masa proyek 20 tahun. Penilaian didasarkan pada parameter biaya investasi awal, biaya operasional, pendapatan tahunan, serta indikator kelayakan ekonomi seperti *Internal Rate of Return (IRR)* dan *Payback Period*.



Gambar 4.4 parameter Finansial

4.4.1 Parameter Input dan Biaya Investasi

Berdasarkan hasil pemodelan, asumsi dasar yang digunakan mencakup tingkat inflasi sebesar 2% dan rasio hutang 0%, yang menunjukkan bahwa proyek ini direncanakan menggunakan pembiayaan ekuitas penuh (*full equity*). Total investasi awal (*Total Initial Cost*) yang diperlukan adalah sebesar \$24.941.206. Biaya ini mencakup seluruh pengadaan komponen utama, instalasi, dan biaya perizinan di awal tahun.

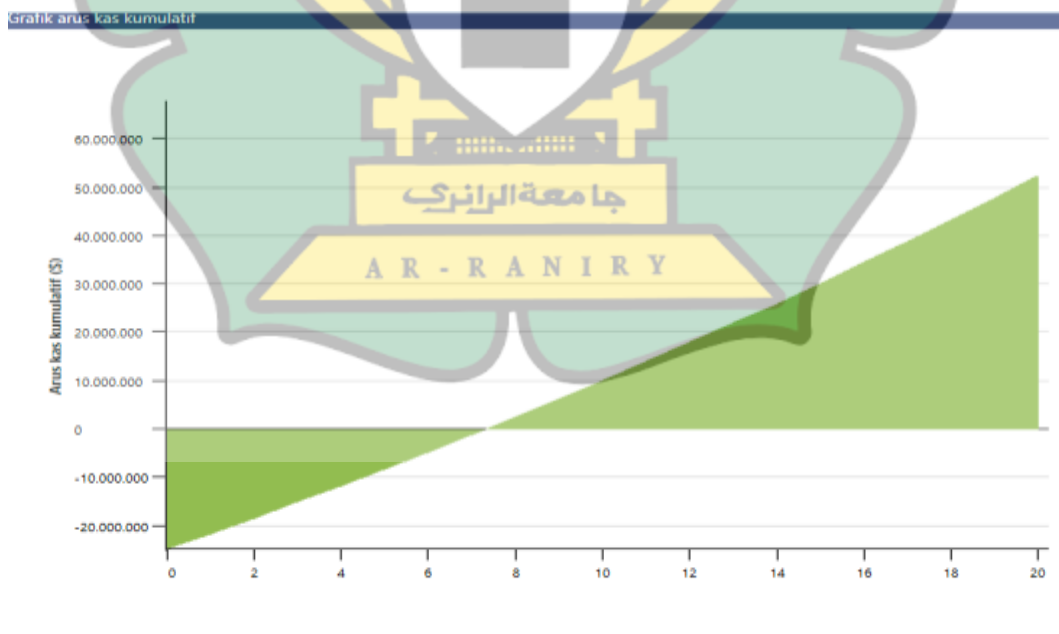
Aliran kas tahunan dipengaruhi oleh pengeluaran operasional dan pemasukan dari produksi energi:

- Pengeluaran Tahunan: Total biaya tahunan mencapai \$778.166 yang didominasi oleh biaya Operasi dan Pemeliharaan (O&M).

- Pendapatan Tahunan: Sumber pendapatan utama berasal dari ekspor listrik senilai \$3.928.787 per tahun. Pada model ini, belum terdapat monetisasi dari kredit karbon (pendapatan GRK) maupun insentif/hibah tambahan.
- Arus Kas Bersih: Selisih antara pendapatan dan pengeluaran memberikan arus kas masuk bersih tahunan yang positif, yang akan digunakan untuk mengembalikan modal investasi awal.

Grafik arus kas kumulatif pada gambar 4.5 menunjukkan profil risiko dan pemulihan modal proyek:

1. Tahun ke-0: Terjadi arus kas negatif sebesar -\$24,9 juta (investasi awal).
2. Fase Pemulihan: Grafik menunjukkan kemiringan positif yang konstan, menandakan pendapatan stabil setiap tahunnya.
3. Titik Impas (*Break-even*): Garis kumulatif memotong sumbu nol pada rentang antara tahun ke-7 dan ke-8. Hal ini mengonfirmasi bahwa setelah periode tersebut, proyek mulai menghasilkan keuntungan bersih.
4. Akhir Masa Proyek: Pada tahun ke-20, akumulasi arus kas bersih diproyeksikan mencapai angka di atas \$50.000.000.



Gambar 4.5 Arus Kas

4.5 Hasil Pemodelan Emisi

Hasil simulasi menunjukkan analisis emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan dari sistem pembangkitan listrik pada kondisi kasus acuan (*baseline*) dibandingkan dengan kasus usulan (proyek PLTP). Analisis ini dilakukan menggunakan pendekatan faktor emisi sistem kelistrikan Indonesia yang mempertimbangkan rugi-rugi transmisi dan distribusi (T&D).

1. Parameter Dasar

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh parameter utama sebagai berikut:

- Faktor emisi GHG (tanpa T&D): 0,755 tCO₂/MWh
- Susut transmisi dan distribusi (T&D): 7%
- Faktor emisi total (dengan T&D): 0,811 tCO₂/MWh
- Energi listrik yang diekspor ke jaringan: 39.288 MWh/tahun

Nilai faktor emisi sebesar 0,811 tCO₂/MWh menunjukkan bahwa setiap produksi energi listrik sebesar 1 MWh dari sistem kelistrikan konvensional di Indonesia menghasilkan emisi sekitar 0,811 ton CO₂. Besaran ini mencerminkan dominasi penggunaan pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil, khususnya batubara dan gas alam. Pada kondisi dasar (*baseline*), yaitu tanpa adanya penerapan proyek energi terbarukan, total emisi yang dihasilkan mencapai 31.876,8 tCO₂ per tahun. Nilai tersebut merepresentasikan jumlah emisi yang dilepaskan ke atmosfer apabila kebutuhan energi listrik sebesar 39.288 MWh per tahun sepenuhnya dihasilkan oleh sistem kelistrikan konvensional. Sebaliknya, pada kondisi proyek dengan penerapan pembangkit listrik tenaga panas bumi, total emisi yang dihasilkan mengalami penurunan signifikan menjadi sebesar 2.231,4 tCO₂ per tahun. Emisi tersebut umumnya berasal dari sumber tidak langsung serta aktivitas operasional terbatas pada pembangkit panas bumi, yang secara keseluruhan jauh lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis bahan bakar fosil.

2. Pengurangan Emisi GRK

Selisih antara emisi *baseline* dan emisi proyek menghasilkan pengurangan emisi tahunan sebesar 29.645,4 tCO₂/tahun, secara persentase terjadi penurunan emisi sebesar ±93%, yang menunjukkan efektivitas tinggi dari implementasi PLTP dalam mengurangi dampak lingkungan. Dengan produksi energi listrik sebesar 39.288 MWh/tahun, sistem konvensional (*baseline*) menghasilkan emisi sebesar 31.876,8 tCO₂/tahun, sedangkan pada kondisi proyek (PLTP), emisi turun drastis menjadi hanya 2.231,4 tCO₂/tahun. Perbandingan antara pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar fosil (PLTU) dan pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) menunjukkan perbedaan yang sangat signifikan. PLTU menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi akibat proses pembakaran batubara, sedangkan PLTP menghasilkan emisi yang jauh lebih rendah karena tidak melibatkan proses pembakaran bahan bakar fosil.

Hasil analisis pengurangan emisi perbandingan dengan studi empiris dan laporan internasional. Berdasarkan hasil penelitian ini, PLTP mampu menurunkan emisi sebesar ±93% dibandingkan sistem konvensional. Penelitian ini konsisten dengan berbagai literatur global yang menyatakan bahwa pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) termasuk dalam kategori *low-carbon energy*. Berdasarkan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC 2022), intensitas emisi siklus hidup PLTP berada pada kisaran 38–79 CO₂-eq/kWh, jauh lebih rendah dibandingkan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batubara yang dapat mencapai 820–1.050 CO₂-eq/kWh. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan energi panas bumi dapat menurunkan emisi hingga lebih dari 90%, sejalan dengan hasil penelitian ini. Ronald DiPippo (2016) dalam bidang geothermal power menyatakan bahwa emisi langsung PLTP sangat kecil karena tidak melalui proses pembakaran bahan bakar, melainkan hanya memanfaatkan energi panas dari reservoir bumi. Emisi yang dihasilkan umumnya berasal dari gas non-kondensabel seperti CO₂ dan H₂S dalam jumlah terbatas.

Secara komparatif, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa:

- Emisi *baseline*: 31.876,8 tCO₂/tahun
- Emisi PLTP: 2.231,4 tCO₂/tahun

- Penurunan emisi: $\pm 93\%$
- PLTU $\rightarrow$ emisi tinggi + bahan bakar fosil
- PLTP $\rightarrow$ emisi sangat rendah + renewable + base load

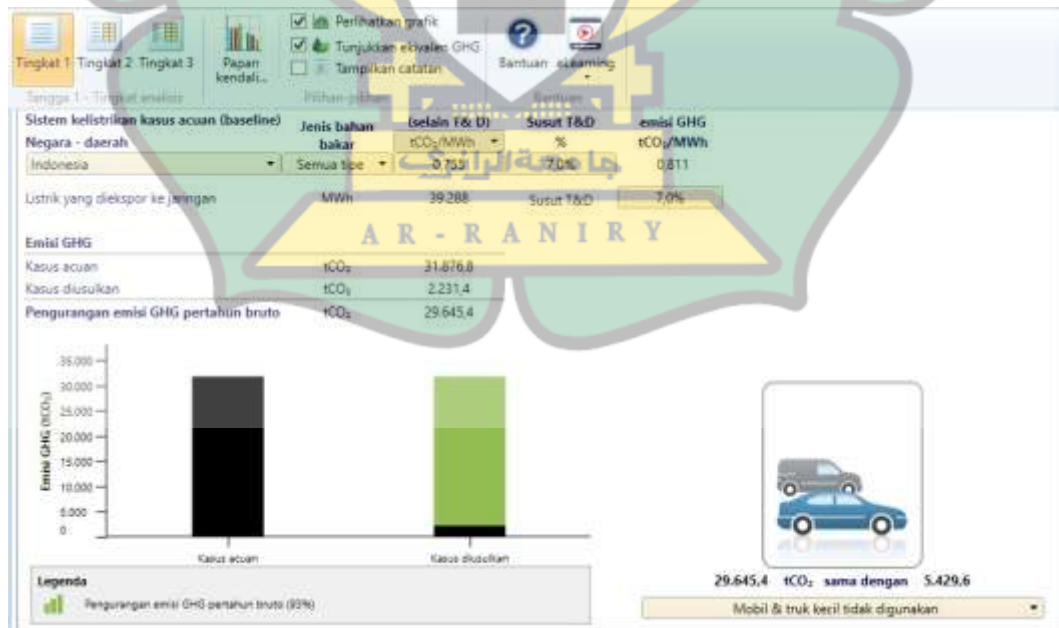
Nilai ini berada dalam rentang yang sebanding dengan hasil penelitian pada berbagai pembangkit listrik panas bumi di dunia (90–95%), sehingga menunjukkan bahwa model PLTP Jaboi memiliki kinerja lingkungan yang kompetitif pada tingkat global.

4.5.1 Interpretasi Visual Grafik

Grafik batang pada gambar memperlihatkan:

- hitam (kasus acuan) menunjukkan emisi tinggi akibat dominasi energi fosil.
- hijau (kasus usulan) menunjukkan emisi yang jauh lebih rendah.
- Area hijau menggambarkan besarnya emisi yang berhasil dikurangi.

Hal ini memperjelas bahwa transisi ke energi panas bumi memberikan kontribusi signifikan terhadap dekarbonisasi sektor energi. Dapat dilihat pada gambar 4.5



Gambar 4.6 Parameter Emisi

Pengurangan emisi sebesar 29.645,4 tCO₂/tahun setara dengan 5.429,6 unit mobil & truk kecil yang tidak digunakan, interpretasi ini memberikan gambaran yang lebih kontekstual terhadap dampak lingkungan, sehingga memudahkan pemahaman terhadap besarnya kontribusi proyek dalam mengurangi emisi. Hasil ini menunjukkan bahwa:

- PLTP merupakan sumber energi bersih dengan emisi rendah.
- Implementasi PLTP berkontribusi signifikan terhadap mitigasi perubahan iklim.
- Proyek ini sejalan dengan target pengurangan emisi nasional (NDC Indonesia).

Secara keseluruhan, analisis menunjukkan bahwa penggunaan pembangkit listrik tenaga panas bumi mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan dibandingkan sistem konvensional. Dengan pengurangan emisi mencapai lebih dari 29 ribu tCO₂ per tahun, proyek ini tidak hanya layak secara teknis dan ekonomi, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang sangat besar. Hasil ini menegaskan bahwa pengembangan PLTP tidak hanya layak dari sisi teknis dan energi, tetapi juga memberikan manfaat lingkungan yang sangat besar. Oleh karena itu, PLTP dapat direkomendasikan sebagai salah satu solusi utama dalam transisi menuju sistem energi bersih dan berkelanjutan di Indonesia.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Produksi energi bersih sistem PLTP ini mampu menghasilkan energi listrik bersih yang diekspor ke jaringan sebesar 39.288 MWh/tahun. Nilai ini mencakup efisiensi pemanfaatan sumber daya dengan nilai *Actual Steam Rate* (ASR) sebesar 13,7 kg/kWh, faktor kapasitas dan ketersediaan ($\pm 90\%$) dan Parameter performa seperti efisiensi turbin 80% dan ASR 13,7 kg/kWh menunjukkan efisiensi konversi energi yang baik. Kelayakan finansial struktur investasi proyek ini bersifat padat modal (*capital intensive*) dengan total biaya investasi awal (*Initial Capital Cost*) sebesar 24.931.206 USD dan untuk efisiensi biaya operasional meskipun investasi awal tinggi, biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) tahunan relatif rendah dan stabil, yakni sebesar 807.096 USD/tahun. Indikator ekonomi: proyek menunjukkan prospek finansial yang positif dengan nilai *Internal Rate of Return* (IRR) sebesar 13,2% dan periode pengembalian modal (*equity payback*) selama 7,3 tahun, dengan masa proyek 20 tahun, akumulasi arus kas bersih diproyeksikan melebihi 50.000.000 USD. Dengan demikian, dari aspek teknis dan ekonomis, proyek ini dinyatakan layak untuk dikembangkan karena mampu menghasilkan energi secara kontinu, efisien, dan stabil.
2. Analisis lingkungan (emisi GRK), implementasi PLTP memberikan kontribusi lingkungan yang sangat besar melalui pengurangan emisi gas rumah kaca sebesar 29.645,4 tCO₂/tahun atau turun 93% dibandingkan sistem pembangkit konvensional.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Penelitian ini masih menggunakan parameter asumsi umum. Oleh karena itu, studi lanjutan perlu mempertimbangkan data reservoir yang lebih detail seperti tekanan reservoir, permeabilitas, dan cadangan uap untuk

meningkatkan akurasi hasil pemodelan energi dan keberlanjutan produksi jangka panjang.

2. Penelitian lanjutan dapat membandingkan teknologi *single flash* dengan teknologi lain seperti *double flash* atau *binary cycle*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui teknologi mana yang paling sesuai dengan karakteristik sumber panas bumi di lokasi penelitian.
3. Optimalisasi Pendapatan melalui Kredit Karbon: Mengingat proyek ini menghasilkan pengurangan emisi yang signifikan, disarankan untuk melakukan analisis lebih lanjut mengenai monetisasi kredit karbon (*carbon credit*). Hal ini dapat menjadi sumber pendapatan tambahan untuk meningkatkan nilai ekonomi proyek.



DAFTAR PUSTAKA

- Ahluriza, P., & Harmoko, U. (2021). Analisis Pemanfaatan Tidak Langsung Potensi Energi Panas Bumi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(1), 53–59.
- Arif, N. (2025). *Potensi Energi Surya sebagai Energi Listrik Alternatif berbasis RETScreen di Kota Palopo , Indonesia*. 01(01).
- Dickson, M. H., & Fanelli, M. (2004). *Cos ' è l ' Energia Geotermica ?* 1–56.
- DiPippo, R. (2016). *Geothermal power plants: Principles, applications, case studies and environmental impact* (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Dwipa, S., Widodo, S., Suhanto, E., & Kusnadi, D. (2006). Integrated geological, geochemical and geophysical survey in Jaboi geothermal field, Nangro Aceh Darussalam, Indonesia. *Proceedings of the 7th Asian Geothermal Symposium*, 121–126.
- Dwipa, S., Widodo, S., Suhanto, E., & Kusnadi, D. (2006). *INTEGRATED GEOLOGICAL , GEOCHEMICAL AND GEOPHYSICAL SURVEY IN JABOI GEOTHERMAL FIELD , NANGRO ACEH DARUSSALAM , INDONESIA Figure . 2 . Geological Map of Weh Island*. 121–126.
- El, M., Assad, H., Aryanfar, Y., Radman, S., Yousef, B., & Pakatchian, M. (2021). *Energy and exergy analyses of single flash geothermal power plant at optimum separator temperature*. March, 873–881.
- El, M., Assad, H., Aryanfar, Y., Radman, S., Yousef, B., & Pakatchian, M. (2021). *Energy and exergy analyses of single flash geothermal power plant at optimum separator temperature*. March, 873–881.
- Energi, K., Sumber, D. A. N., Mineral, D., & Indonesia, R. (n.d.). *Rencana umum ketenagalistrikan nasional*.
- Falqahiyah, C., & Benyamin, B. (2021). Analisis Kelayakan Proyek Pembangkit Listrik Energi Panas Bumi Area “Cfa.” *Journal of Geoscience Engineering & Energy*, 2, 1–11.
- Fitria, N., Hardi, S., dan Fauzi(2021). Optimasi Operasi Pembangkit Listrik

- Tenaga Mesin Gas (Pltmg) Arun Dengan Sistem Homer Energi. *Jurnal Tektro*, 5(1), 82.
- Gunawan, I., Windarta, J., & Harmoko, U. (2021). Overview Potensi Panas Bumi di Provinsi Jawa Barat. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 60–73.
- Hafsari, S. W., & Rading, A. (2017). Potensi Cadangan Panas Bumi dengan Metoda Volumetrik Pada Sumur Saka-1 Lapangan Panas Bumi “X” Kabupaten Lembata Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Offshore: Oil, Production Facilities and Renewable Energy*, 1(1), 1.
- Harahap, E. H. S. (2019). *Analisis Prakiraan Permintaan Dan Penyediaan Energi Listrik Tahun 2019-2023 Di Kabupaten Padang Lawas*. 1–77
- Husein, M. C. (2024). *Techno Economic Feasibility Of Geothermal Power Plant In Indonesia Using Retscreen Considering Carbon Credit Mechanism To Achieve Indonesia's Ndc 2060*. 29122076(February).
- Indarto, M. bima, Mochamad Rafli Azis, & Muhamad Bima Indarto. (2022). Eksplorasi Panas Bumi Dengan Metode Geolistrik. *PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 11(1), 23–26.
- Insani, N. A. (2019). Analisis keekonomian pembangkit listrik tenaga panas bumi kapasitas kecil sistem siklus uap. *EPIC Journal of Electrical Power Instrumentation and Control*, 2(2), 165–171.
- Isa, M., & Suhud, K. (2019). Estimasi Suhu Reservoir Menggunakan Geotermometer (Studi Kasus Lapangan Panas Bumi Jaboi, Sabang). *Talenta Conference Series: Science and Technology (ST)*, 2(2), 30–34.
- Isa, M., & Suhud, K. (2019). Estimasi Suhu Reservoir Menggunakan Geotermometer (Studi Kasus Lapangan Panas Bumi Jaboi, Sabang). *Talenta Conference Series: Science and Technology (ST)*, 2(2), 30–34.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2020). Inventarisasi emisi GRK bidang energi. *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Tahun 2020*, 41.

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2017). *Potensi panas bumi Indonesia 2017*. Jakarta: Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi; Badan Geologi.
- Kementerian ESDM. (2013). Kajian Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi. *Pusat Data Dan Teknologi Informasi Energi Dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral*, 1–118.
- Khasmadin, M. F., & Harmoko, U. (2021). Kajian Potensi dan Pemanfaatan Energi Panas Bumi di Wilayah Kerja Panas Bumi Patuha Ciwidey. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 101–113.
- Kriyantono, R. (2020). Studi Pustaka. *Jakarta: Prenadamedia Group*, 1–30. https://kc.umn.ac.id/17379/5/BAB_III.pdf
- Lewerissa, Y. J. (2018). *Analisis energi pada perencanaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan Cycle Tempo*. *Jurnal Voering*, 3(1), 23–30.
- Lewerissa, Y. J. (2018). *ANALISIS ENERGI PADA PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) DENGAN CYCLE TEMPO*. 3(1), 1–8.
- M., Bumi, G., Mno, P. T., Dewi, Y. P., Sihombing, M., & Setiawan, Y. (2017). *Inventarisasi Sumber Emisi Gas Rumah Kaca (Greenhouse Gas) Dari Kegiatan Eksplorasi & Eksploitasi*.
- Menteri, K., & No, E. (2022). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2013-2022*. 4092, 2013–2022.
- Menteri, K., & No, E. (2022). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero) 2013-2022*. 4092, 2013–2022.
- Nugraha, R. P., & O’Sullivan, J. (2019). A key process of natural state modeling: 3D Geological model of Jaboi Geothermal field, Nangro Aceh Darussalam, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 254(1).

- Nugroho, H., & Fadhilah, M. F. (2019). Identifikasi Daerah Prospek Panas Bumi dengan Menggunakan Teknik Pengindraan Jauh (Studi Kasus: Kecamatan Cisurupan, Kabupaten Garut). *Reka Geomatika*, 2018(1), 19–29.
- Nur, S., Ikhwal, M. F., & Aida, N. (2022). Techno-Economics Assessment of Geothermal Binary Cycle Power Plant Located in Isolated Grid. *International Energy Journal*, 22(3), 255–268.
- Nurwahyudin, D. S., & Harmoko, U. (2020). Pemanfaatan dan Arah Kebijakan Perencanaan Energi Panas Bumi di Indonesia Sebagai Keberlanjutan Maksimalisasi Energi Baru Terbarukan. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 1(3), 111–123
- Qanun Aceh Nomor 4 Tahun 2019 Tentang Rencana Umum Energi Aceh.
- Rahmawati, Y., Anggara, D., Siti, P., Wahyu, S., & Toru, S. (2020). *Development of Digital Learning Media for Renewable Energy Subject Based on Concepts Understanding of Electrical Engineering Department ' s Students State University of Malang*. 406(Iconhomecs 2019), 366–373.
- Wibowo, Y. E., & Windarta, J. (2022). Kondisi Gas Bumi Indonesia dan Energi Alternatif Pengganti Gas Bumi. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 3(1), 1–14.
- Yudha, F. K. (2019). Potensi Pengurangan Emisi Gas Rumah Kaca dari Biogas Skala Rumah Tangga Tipe Floating Drum. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689–1699.
- Yulianto, A. D. (2020). Perencanaan Pembangkit Listrik Berbasis Energi Terbarukan Untuk Lahan Perkebunan: Studi Kasus Di Kecamatan Bupon Kabupaten Luwu. Tesis Teknik Elektro. July, 1–23.
- (Zuchrillah et al., 2015). *PEMILIHAN TEKNOLOGI PROSES GEOTHERMAL SECARA TEKNIK PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI daripada pembangkit listrik tenaga thermal yang lain seperti batubara , gas alam , minyak dan*. 59–66.

LAMPIRAN A

Ringkasan Hasil Analisis Kelayakan PLTP Jaboi 5 MW

A.1 Aspek Teknis

a. Tabel Parameter Teknis Sistem PLTP

Parameter	Nilai
Kapasitas Terpasang	5 MW
Aliran Uap	342.000 kg/jam
Persentase Aliran Uap	25%
Ketersediaan Sistem	90%
Tekanan Operasional	1.000 kPa
Suhu Uap	250°C
Tekanan Balik Turbin	186,6 kPa
Efisiensi Turbin	80%
<i>Actual Steam Rate (ASR)</i>	13,7 kg/kWh

b. Hasil Produksi Energi

Parameter	Nilai
Energi Listrik Bersih	39.288 MWh/tahun
Faktor Kapasitas	90%
Jam Operasi Efektif	7.884 jam/tahun

c. Interpretasi Teknis

- Sistem mampu menghasilkan energi listrik sebesar 39.288 MWh/tahun.
- Efisiensi turbin sebesar 80% menunjukkan kinerja konversi energi yang baik.
- Nilai ASR sebesar 13,7 kg/kWh menunjukkan pemanfaatan uap yang efisien.
- Faktor kapasitas dan ketersediaan sebesar 90% menunjukkan operasi pembangkit yang stabil dan andal.
- Berdasarkan parameter operasi dan hasil produksi energi, proyek layak secara teknis untuk dikembangkan.

A.2 Aspek Finansial

a. Tabel Hasil Analisis Biaya Proyek

Komponen	Nilai
Investasi Awal (<i>Initial Capital Cost</i>)	USD 24.941.206
Biaya O&M Tahunan	USD 778.166/tahun
Pendapatan Penjualan Listrik	USD 3.928.787/tahun

b. Tabel Indikator Kelayakan Finansial

Indikator	Nilai
<i>Internal Rate of Return</i> (IRR)	13,2%
<i>Payback Period</i>	7,3 tahun
Umur Proyek	20 tahun
Akumulasi Arus Kas Akhir Proyek	> USD 50 juta

c. Interpretasi Finansial

- Investasi awal proyek tergolong tinggi karena karakteristik PLTP yang bersifat *capital intensive*.
- Biaya operasi relatif rendah dan stabil karena tidak memerlukan bahan bakar.
- Nilai IRR sebesar 13,2% menunjukkan tingkat pengembalian investasi yang menarik.
- *Payback Period* selama 7,3 tahun masih berada dalam batas yang layak untuk proyek energi.
- Proyek menghasilkan arus kas positif hingga akhir umur proyek.
- Berdasarkan indikator ekonomi, proyek layak secara finansial untuk direalisasikan.

A.3 Aspek Lingkungan

a. Tabel Hasil Analisis Emisi GRK

Parameter	Nilai
Faktor Emisi Total	0,811 tCO ₂ /MWh
Energi Ekspor	39.288 MWh/tahun
Emisi Baseline	31.876,8 tCO ₂ /tahun
Emisi PLTP	2.231,4 tCO ₂ /tahun
Pengurangan Emisi	29.645,4 tCO ₂ /tahun
Penurunan Emisi	±93%

b. Tabel Dampak Lingkungan Proyek

Indikator	Hasil
Ekuivalen Kendaraan yang Dihindari	5.429,6 unit
Kategori Energi	Energi Rendah Karbon
Kontribusi terhadap NDC Indonesia	Mendukung
Kontribusi Mitigasi Perubahan Iklim	Signifikan

c. Interpretasi Lingkungan

- Emisi GRK berhasil dikurangi sebesar 29.645,4 tCO₂/tahun.
- Penurunan emisi mencapai sekitar 93% dibandingkan pembangkit konvensional.
- Hasil ini sejalan dengan studi internasional yang menyebutkan PLTP sebagai teknologi *low-carbon energy*.
- PLTP berkontribusi terhadap pengurangan emisi nasional dan mitigasi perubahan iklim.
- Berdasarkan hasil analisis emisi, proyek layak secara lingkungan dan mendukung pembangunan energi berkelanjutan.

LAMPIRAN B

Perhitungan Pengurangan Emisi

B.1 Perhitungan Aliran Uap

$$\begin{aligned}\text{Presentase air dan uap} \times \text{aliran uap} &= 20\% \times 34.2000 \\ &= 68.400\end{aligned}$$

B.1 Emisi *Baseline*

Emisi pada kondisi tanpa proyek dihitung berdasarkan energi listrik yang dihasilkan oleh sistem kelistrikan konvensional dengan faktor emisi sebesar 0,811 tCO₂/MWh.

$$\begin{aligned}\text{Emisi } \textit{Baseline} &= 39.288 \times 0,811 \\ &= 31.876,8 \text{ tCO}_2/\text{tahun}\end{aligned}$$

B.2 Emisi Proyek

Emisi pada kondisi proyek PLTP diperoleh dari hasil simulasi *RETScreen* sebesar:

$$= 2.231,4 \text{ tCO}_2/\text{tahun}$$

B.3 Pengurangan Emisi

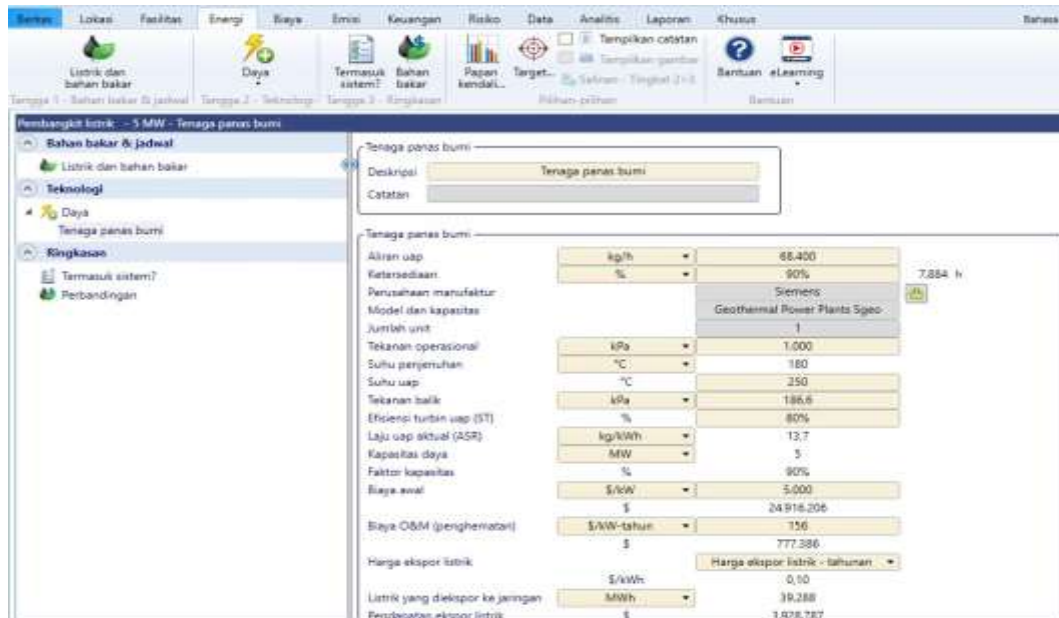
$$\begin{aligned}\text{Pengurangan Emisi} &= \text{Emisi } \textit{Baseline} - \text{Emisi Proyek} \\ &= 31.876,8 - 2.231,4 \\ &= 29.645,4 \text{ tCO}_2/\text{tahun}\end{aligned}$$

B.3 Persentase Pengurangan Emisi

$$\begin{aligned}\text{Penurunan Emisi} &= \frac{29.645,4}{31.876,8} \times 100\% \\ &= 93\%\end{aligned}$$

LAMPIRAN C

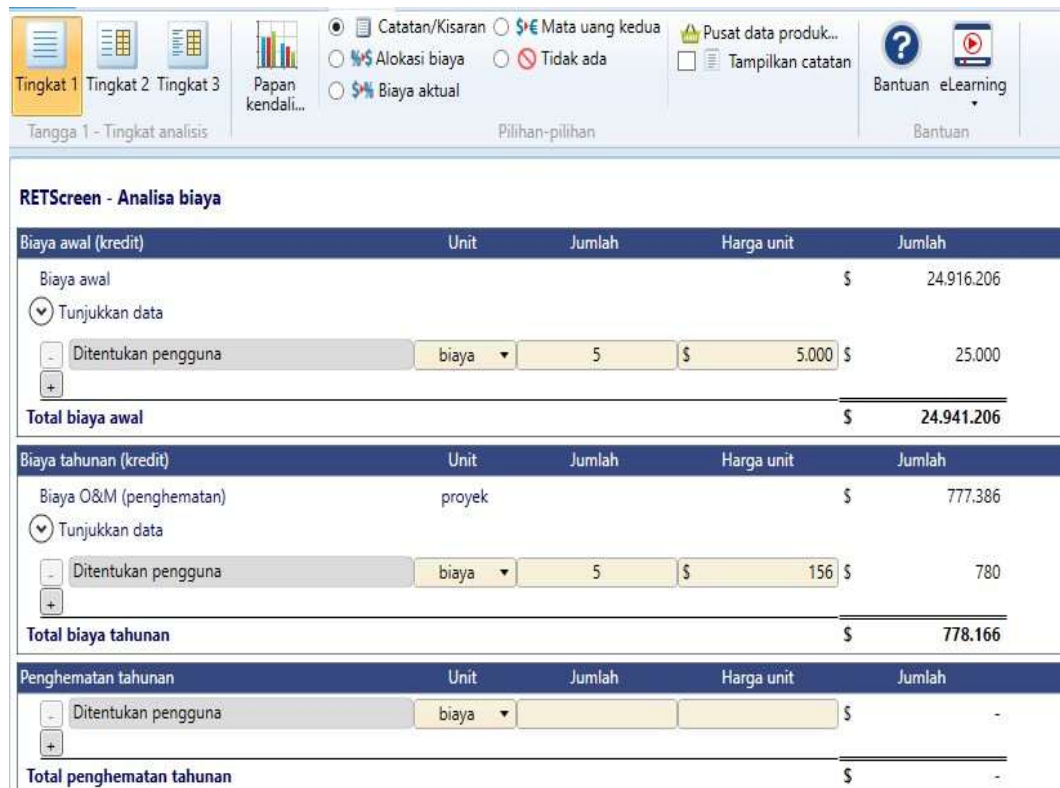
C.1 Gambar Hasil Simulasi RETScreen – Data RETScreen



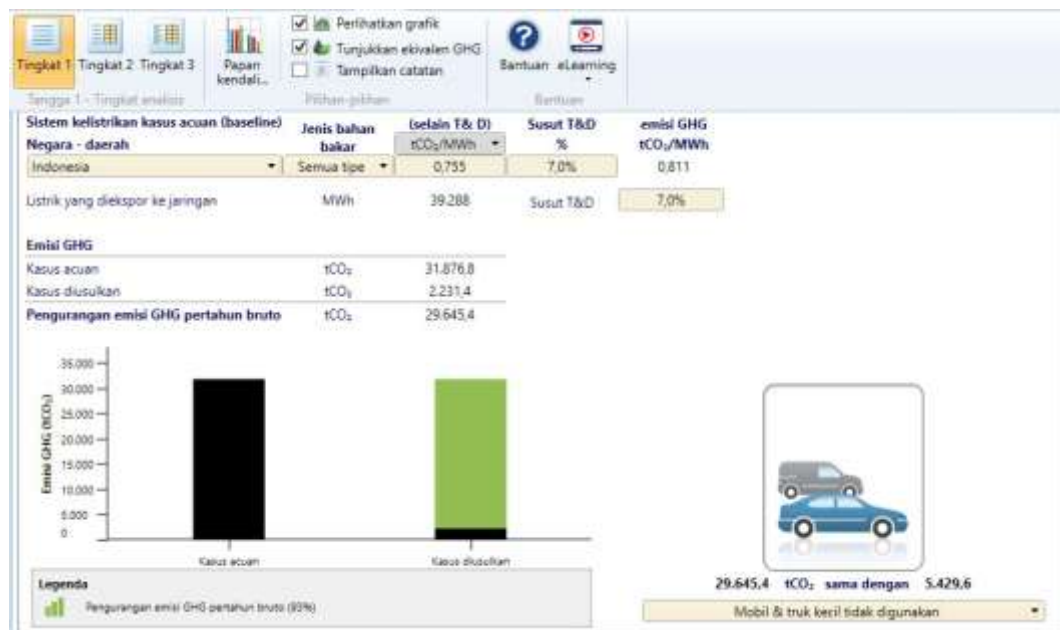
C.2 Gambar Hasil Simulasi RETScreen – finansial



C.3 Gambar Hasil Simulasi RETScreen –Biaya



C.4 Gambar Hasil Simulasi RETScreen – Emisi



C.4 Kesimpulan Kelayakan Proyek

Aspek	Hasil Evaluasi
Teknis	Layak
Finansial	Layak
Lingkungan	Layak

proyek ini dinyatakan layak untuk dikembangkan karena mampu menghasilkan energi secara kontinu, efisien, dan stabil di semua aspek teknis, finansial dan emisi.