

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah Republik Indonesia telah mencanangkan target untuk mencapai *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Untuk mencapai target tersebut Pemerintah telah menerbitkan *Enhanced Nationally Determined Contribution* pada tahun 2022, dengan salah satu mitigasi untuk mengurangi emisi Gas Rumah Kaca (GRK) adalah dengan menargetkan penambahan pembangkit Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebesar 42.569 MW pada tahun 2034. Pembangkit EBT tersebut dapat berasal dari panas bumi, tenaga air, sel surya, tenaga angin, serta penggunaan biomassa dan *biofuel* (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Target mencapai NZE tersebut selaras dengan tujuan pemerintah untuk meningkatkan target bauran energi baru terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan sebesar 31% pada tahun 2050, yang dituangkan melalui Peraturan Presiden nomor 22 tahun 2017 perihal Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Untuk memenuhi target bauran energi baru terbarukan tersebut, energi panas bumi ditargetkan dapat memberikan kontribusi energi baru terbarukan sebesar 7.200 MW pada tahun 2025 dan 17.600 MW pada tahun 2050 (Rencana Umum Energi Nasional Lampiran I Peraturan Presiden Republik Indonesia No 22, 2017).

PLN sebagai perusahaan penyedia listrik bagi masyarakat Indonesia telah memiliki komitmen untuk mendukung mandat yang telah diberikan pemerintah untuk menurunkan emisi GRK melalui program transisi energi. Transisi energi yang dilakukan oleh PLN antara lain adalah dengan mengembangkan lebih banyak pembangkit energi baru dan terbarukan yang berkelanjutan. RUPTL 2025-2034 mencanangkan penambahan pembangkit sebesar 69,6 GW, dimana porsi pembangkit EBT akan memiliki porsi sebesar 76% (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia, 2025).

Rencana pengembangan pembangkit pada RUPTL 2025-2034 dapat dilihat pada Tabel 1.1 dimana porsi pembangunan pembangkit EBT mencapai 52,9 GW yang terdiri dari PLTA, PLTP, Pembangkit Storage, PLTS, PLTB, Pembangkit energi lain dan PLTN.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa PLN berencana melakukan pembangunan pembangkit panas bumi yang ditargetkan mencapai sebesar 5,1 GW pada tahun 2034.

Tabel 1.1. Rencana pengembangan pembangkit PLN pada RUPTL 2025-2034 (PT PLN, 2025)

No	Pembangkit EBT	Satuan	Kapasitas
1	PLTA	GW	11,7
2	PLTP	GW	5,1
3	Storage	GW	10,3
4	PLTS	GW	17,1
5	PLTB	GW	7,2
6	Pembangkit EBT Lain	GW	1
7	PLTN	GW	0,5
8	Pembangkit Gas	GW	10,3
9	PLTU		6,4
Jumlah		GW	69,6

Sejalan dengan rencana tersebut, Indonesia memiliki potensi panas bumi sebesar 40% dari kapasitas panas bumi di dunia, dengan estimasi potensi daya sebesar 29.500 MW, namun pemanfaatan potensi panas bumi tersebut hanya sebesar 1.189 MW pada tahun 2014 (Khasmadin & Harmoko, 2021). Dengan masih banyaknya potensi panas bumi di Indonesia, maka pembangunan *geothermal power plant* atau Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) dapat dijadikan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan bauran energi baru terbarukan. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) memiliki kelebihan antara lain *Capacity factor* (CF) yang tinggi, biaya pokok produksi rendah, dan tidak menghasilkan emisi GRK yang tinggi (Meilani & Wuryandani, 2010). Oleh karena itu, PLTP dapat menjadi opsi strategis untuk mendukung pengurangan emisi GRK sekaligus menekan biaya produksi energi.

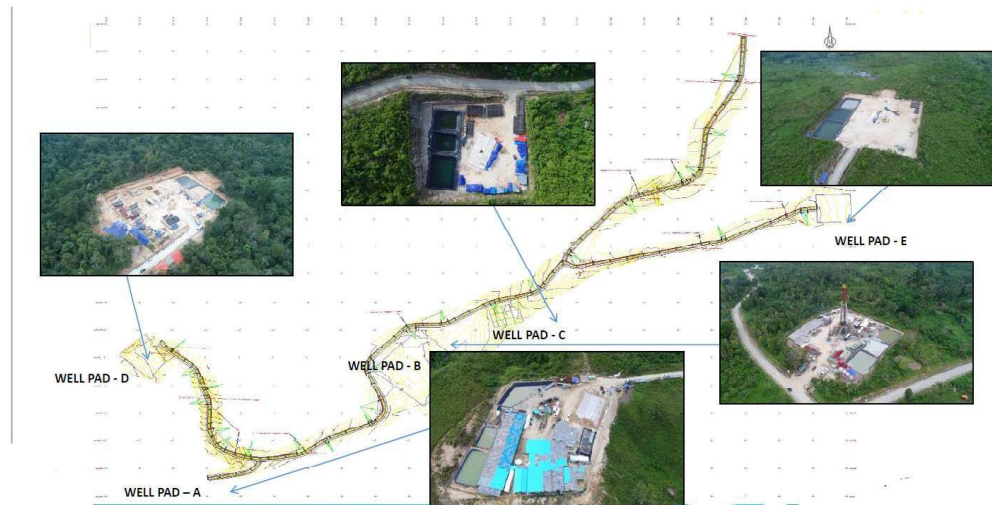
Dalam rangka pengembangan potensi panas bumi tersebut, PLN memiliki beberapa Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) yang sedang atau telah dikembangkan pemanfaatannya. PLN bertanggung jawab terhadap eksplorasi, pembiayaan,

pengembangan, dan kegiatan operasi dari WKP tersebut. Beberapa lokasi WKP tersebut antara lain adalah pada WKP Tulehu, WKP Ulumbu, WKP Mataloko, dll. (PT PLN, 2025).

Meskipun WKP Tulehu memiliki beberapa sumur hasil eksplorasi, analisis teknis dan finansial pada penelitian ini difokuskan pada satu sumur produksi, yaitu sumur TLU-B-02, yang dipilih karena memiliki data produksi paling lengkap, meliputi temperatur, tekanan, laju aliran massa brine dan uap, serta kurva deliverability. Hasil uji produksi menunjukkan bahwa sistem panas bumi di WKP Tulehu bersifat water-dominated, yang ditandai oleh dominasi laju aliran brine dibandingkan uap. Pada sumur TLU-B-02, laju aliran brine mencapai sekitar 81,9 t/h, sedangkan laju aliran uap hanya sekitar 11,7 t/h. Karakteristik ini menyebabkan pemanfaatan langsung uap untuk pembangkitan listrik konvensional menjadi kurang optimal, sehingga teknologi pembangkit siklus biner lebih sesuai untuk diterapkan. Sedangkan sumur reinjeksi dalam studi ini akan menggunakan sumur TLU-D-01 untuk mendukung keberlanjutan sistem reservoir panas bumi (PLN, 2018).

Dalam penelitian ini, istilah *siklus biner* merujuk pada teknologi *Organic Rankine Cycle* (ORC), yaitu sistem pembangkit yang memanfaatkan fluida kerja organik bertitik didih rendah untuk mengonversi panas bumi bertemperatur menengah hingga rendah menjadi energi listrik

Pemerintah Indonesia melalui kementerian ESDM telah memberikan izin kepada PLN untuk melakukan eksplorasi dan produksi selama 36 tahun pada WKP Tulehu. WKP Tulehu terletak di wilayah enam desa, yaitu Desa Suli, Tial, Tulehu, Tengah-Tengah, Liang, dan Waii Barat, yang berada di Kabupaten Maluku Tengah. PLN berencana akan membangun PLTP Tulehu dengan kapasitas 20 MW yang direncanakan akan beroperasi pada tahun 2031 (PT PLN, 2025). Kegiatan eksplorasi pada WKP Tulehu telah dimulai sejak tahun 1996, yang dilanjutkan dengan pengeboran sumur pertama pada tahun 2010, serta empat sumur tambahan pada periode 2017–2018. Kelima sumur tersebut adalah TLU-01, TLU-B-01, TLU-B-02, TLU-C-01, TLU-C-02 dengan lokasi seperti terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1. Lokasi pengeboran WKP Tulehu (PLN, 2018)

Berdasarkan hasil eksplorasi, parameter tekanan dan temperatur maksimum pada kelima sumur tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.2 Temperatur fluida panas bumi di Tulehu dikategorikan sebagai menengah hingga rendah, dengan kisaran antara 138–205 °C (Gehring & Loksha, 2012).

Tabel 1.2. Data temperatur dan tekanan maksimum pada *wellpad* Tulehu (PLN, 2018)

Parameter	Satuan	TLU-B-01	TLU-B-02	TLU-C-01	TLU-D-01
Temperatur	°C	205	180	180	138
Tekanan	psi	2.015	1.980	1.800	1.874,28

Untuk merancang pembangkit energi panas bumi yang optimal, diperlukan studi teknis dan finansial yang komprehensif. Studi ini bertujuan untuk melakukan analisis kelayakan pada pembangunan PLTP di WKP Tulehu, baik analisis teknis maupun finansial. Pemilihan teknologi yang digunakan akan berpengaruh terhadap kelayakan proyek, khususnya pada pembangunan PLTP di WKP Tulehu.

Panas bumi dapat digunakan langsung sebagai pemanas pada industri dan rumah tangga, maupun digunakan sebagai sumber panas pada pembangkit listrik. Teknologi yang dapat digunakan dan aplikasi penggunaan sumur geothermal dapat dilihat pada Tabel 1.3 (Gehring & Loksha, 2012).

Tabel 1.3. Jenis pembangkit panas bumi berdasarkan temperatur *geofluid*

Kategori <i>geofluid</i>	Temperatur	Teknologi/penggunaan
Tinggi	> 200 °C	PLTP konvensional
Menengah	150-200 °C	PLTP siklus biner
Rendah	< 150 °C	PLTP siklus biner maupun digunakan langsung (pemanas,dll.)

WKP Tulehu memiliki temperatur *geofluid* yang relatif rendah yaitu berkisar 160-170 °C serta memiliki komposisi geothermal berupa campuran brine dan uap dimana jumlah air lebih mendominasi. Jenis PLTP yang dipilih adalah jenis siklus biner atau siklus *Organic Rankine Cycle* (ORC) yang cocok diaplikasikan pada sumur yang memiliki temperatur *geofluid* menengah dan rendah. Berdasarkan referensi tersebut di atas, maka Penulis akan melakukan penelitian berjudul “Analisis Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di Tulehu Maluku Tengah”.

Penelitian dilakukan pada lokasi WKP milik PLN pada lokasi Tulehu yang sedang dalam tahap pengembangan dan relatif belum banyak dikaji. Analisis kelayakan yang dibahas adalah analisis teknis dan analisis finansial pada pembangunan PLTP siklus biner di Maluku Tengah. Analisis teknis dilakukan dengan menghitung daya dan efisiensi termal PLTP siklus biner, sedangkan analisis kelayakan finansial dilakukan untuk menilai kelayakan finansial dari pembangunan PLTP siklus biner tersebut. Tesis ini diharapkan dapat menjadi rujukan analisis kelayakan pada pembangunan PLTP siklus biner, yang dapat diaplikasikan pada pembangunan PLTP siklus biner di lokasi Tulehu tersebut maupun pada pembangunan PLTP siklus biner sejenis, serta dapat mendukung tujuan pemerintah untuk menurunkan emisi GRK.

Pemilihan teknologi siklus biner pada penelitian ini didasarkan pada karakteristik *geofluid* WKP Tulehu yang bertemperatur menengah dan bersifat *water-dominated*, sehingga pemanfaatan panas sensibel lebih optimal dibandingkan teknologi *dry steam* maupun *flash*. Selain aspek teknis, teknologi siklus biner saat ini telah mencapai tingkat kematangan teknologi yang tinggi dan banyak diterapkan secara komersial pada sumber panas bumi bertemperatur menengah hingga rendah. Ketersediaan vendor global, sistem modular, serta fleksibilitas integrasi dengan energi terbarukan lain menjadi pertimbangan penting dalam mendukung implementasi proyek di wilayah kepulauan seperti Maluku. Oleh karena itu, analisis pengembangan PLTP siklus biner di Tulehu juga perlu ditinjau

dari perspektif strategis melalui pendekatan SWOT serta dampak ekonomi, sosial, dan kebijakan. Analisis SWOT untuk pemilihan tipe teknologi siklus biner dapat dilihat pada Tabel 1.4 berikut.

Tabel 1.4. Analisis SWOT pemilihan PLTP siklus biner (Tulenbayev et al., 2025)

Strengths	• Sumber energi domestik dan berkelanjutan. • Faktor kapasitas tinggi dibandingkan EBT lain. • Emisi gas rumah kaca rendah sehingga mendukung target <i>Net Zero Emission</i>. • Cocok untuk kondisi <i>geofluid</i> Tulehu yang bertemperatur menengah dan <i>water-dominated</i>. • Teknologi siklus biner sudah matang dan banyak diterapkan secara komersial.
Weaknesses	• Biaya investasi awal dan eksplorasi relatif tinggi. • Risiko <i>subsurface</i> dan ketidakpastian produksi sumur. • Kapasitas relatif kecil dibandingkan PLTP konvensional. • Sensitif terhadap harga jual listrik dan biaya EPC.
Opportunities	• Mendukung kebijakan transisi energi dan peningkatan bauran EBT. • Potensi menurunkan biaya pembangkitan di sistem Ambon. • Menggantikan pembangkit diesel dan meningkatkan keandalan sistem. • Tren global peningkatan penggunaan teknologi ORC skala kecil dan modular. • Potensi integrasi dengan energi terbarukan lain (PLTS, BESS, dll.).
Threats	• Ketidakpastian regulasi dan skema tarif. • Keterbatasan infrastruktur dan logistik di wilayah kepulauan. • Tantangan sosial dan penerimaan masyarakat. • Risiko pembiayaan dan sensitivitas terhadap suku bunga. • Fluktuasi harga peralatan dan biaya pengembangan.

Pengembangan PLTP siklus biner di WKP Tulehu berpotensi memberikan dampak ekonomi melalui penurunan biaya pembangkitan listrik di sistem Ambon, pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar impor, serta peningkatan ketahanan energi daerah. Dari sisi sosial, proyek ini dapat membuka lapangan kerja, meningkatkan

aktivitas ekonomi lokal, serta mendorong pembangunan infrastruktur di wilayah sekitar. Selain itu, pengembangan panas bumi juga memiliki implikasi politik dan kebijakan karena mendukung agenda transisi energi nasional, pengurangan emisi karbon, serta memperkuat posisi Indonesia dalam komitmen dekarbonisasi global.

Namun demikian, implementasi proyek juga berpotensi menimbulkan dampak lingkungan, seperti perubahan penggunaan lahan, risiko penggundulan hutan, serta gangguan terhadap ekosistem dan sumber daya air. Oleh karena itu, pengembangan PLTP perlu disertai dengan konservasi lingkungan, pengelolaan daerah tangkapan air, serta rehabilitasi dan reboisasi untuk menjaga keberlanjutan ekosistem dan keseimbangan hidrologi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan pada subbab sebelumnya, maka rumusan masalah penelitian ini ditentukan sebagai berikut.

1. Berapa besar daya dan efisiensi termal PLTP dengan menggunakan fluida kerja n-pentana di Tulehu Maluku Tengah?
2. Berapa besar daya dan efisiensi termal PLTP dengan menggunakan fluida kerja isopentana di Tulehu Maluku Tengah?
3. Berapa besar tingkat kelayakan finansial PLTP dengan menggunakan fluida kerja n-pentana di Tulehu Maluku Tengah?
4. Berapa besar tingkat kelayakan finansial PLTP dengan menggunakan fluida kerja isopentana di Tulehu Maluku Tengah?

Penelitian dilakukan dengan mendefinisikan beberapa asumsi berdasarkan referensi dari penelitian sejenis yang pernah dilakukan. Beberapa asumsi yang digunakan antara lain adalah penentuan temperatur *geofluid*, pemilihan temperatur reinjeksi, pemilihan fluida kerja PLTP siklus biner dan nilai efisiensi termal dari peralatan yang digunakan. Siklus yang digunakan adalah siklus dasar *binary cycle* dengan menggunakan recuperator. Parameter finansial yang digunakan juga berdasarkan parameter yang digunakan oleh PLN.

1.3 Tujuan

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut.

- a. Untuk mengetahui berapa besar daya dan efisiensi termal PLTP dengan menggunakan fluida kerja n-pentana di Tulehu Maluku Tengah.
- b. Untuk mengetahui berapa besar daya dan efisiensi termal PLTP dengan menggunakan fluida kerja isopentana di Tulehu Maluku Tengah.
- c. Untuk mengetahui berapa besar tingkat kelayakan finansial PLTP dengan menggunakan fluida kerja n-pentana di Tulehu Maluku Tengah.
- d. Untuk mengetahui berapa besar tingkat kelayakan finansial PLTP dengan menggunakan fluida kerja isopentana di Tulehu Maluku Tengah.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penyusunan tesis berjudul “Analisis Kelayakan Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi di Tulehu Maluku Tengah” adalah sebagai berikut.

- a. Bermanfaat sebagai referensi dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya pada pembahasan tentang siklus ORC dan analisis finansial.
- b. Dapat memberikan rekomendasi pada pengambil keputusan (*stakeholders*) terkait untuk memilih siklus termodinamika terbaik dan layak secara finansial.
- c. Bermanfaat sebagai sumber referensi bagi para praktisi yang berkecimpung dalam siklus biner.
- d. Memberikan manfaat bagi penelitian masa depan khususnya dalam melakukan optimasi teknoekonomi siklus biner.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini adalah untuk melakukan analisis kelayakan pembangunan PLTP di Tulehu Maluku Tengah. Siklus yang digunakan adalah siklus biner yang dapat mengakomodasi rendahnya temperatur *geofluid* di lokasi Tulehu. Analisis kelayakan yang dibahas adalah analisis teknis dan analisis kelayakan finansial. Analisis kelayakan teknis dilakukan dengan cara menganalisis kapasitas dan efisiensi termal pembangkit yang didapatkan dari satu sumur WKP Tulehu dengan menggunakan PLTP siklus biner. Analisis finansial dilakukan dengan menganalisis estimasi biaya,

memperhitungkan estimasi *cash flow* PLTP dan menghitung kelayakan finansialnya. Analisis kelayakan finansial mencakup NPV, *BC Ratio*, IRR, dan *Payback period* dari PLTP tersebut.

Terdapat beberapa batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini untuk menghindari ruang lingkup yang terlalu besar. Batasan permasalahan tersebut antara lain adalah sebagai berikut :

- a. Analisis kelayakan yang dibahas adalah analisis kelayakan teknis dan analisis kelayakan finansial
- b. Analisis kelayakan teknis hanya membahas perhitungan daya dan efisiensi termal yang dihasilkan PLTP siklus biner dengan menggunakan fluida kerja n-pentana dan isopentana.
- c. Analisis kelayakan teknis hanya membahas performa PLTP siklus biner dengan menggunakan properties *geofluid* yang berasal dari sumur produksi TLU-B-02 di WKP Tulehu, yang ditetapkan pada satu titik kondisi operasi (*design point*), yaitu pada tekanan *wellhead* sebesar 6,2 bar dan temperatur *geofluid* sebesar 166 °C, berdasarkan data uji produksi PLN (PLN-BRIN, 2023).
- d. Sumur TLU-D-01 ditetapkan sebagai sumur reinjeksi untuk mendukung keberlanjutan sistem reservoir panas bumi (PLN, 2018).
- e. Analisis kelayakan finansial mencakup pembahasan NPV, *BC Ratio*, IRR, dan *Payback period*.
- f. Temperatur dan laju aliran massa *geofluid* yang digunakan adalah berdasarkan data dari PLN atau data dari penelitian yang telah dilakukan pada lokasi Tulehu.
- g. Siklus biner yang digunakan adalah siklus dasar Rankine dengan menggunakan komponen turbin, *preheater*, *evaporator*, *condenser*, *recuperator* dan pompa.
- h. Membandingkan dua fluida kerja yang akan dianalisis, yaitu n-pentana dan isopentana.
- i. Efisiensi peralatan seperti turbin, *heat exchanger*, dan pompa diambil dari referensi data dari PLN atau data dari penelitian yang telah dilakukan pada siklus ORC sejenis.

- j. Harga EPC *cost*, biaya bahan bakar, biaya pemeliharaan, biaya kepegawaian, dan biaya administrasi ditentukan berdasarkan referensi data PLN pada pembangkit sejenis.
- k. Parameter finansial menggunakan parameter yang dipakai oleh PLN.

1.6 Kebaharuan

Berdasarkan studi yang dirangkum pada Tabel 1.5, kajian pembangunan PLTP siklus biner di WKP Tulehu masih terbatas, terutama yang mengintegrasikan analisis teknis dan finansial secara komprehensif berbasis data eksplorasi aktual. Sebagian besar studi hanya membahas aspek teknis atau finansial secara terpisah, dan sangat sedikit yang secara khusus menyoroti potensi Tulehu. Untuk menjawab celah tersebut, penelitian ini menghadirkan pendekatan baru dengan memanfaatkan data suhu, tekanan, dan debit fluida dari hasil eksplorasi lapangan guna mensimulasikan performa sistem pembangkit serta mengevaluasi kelayakan finansial pembangunan PLTP siklus biner di Tulehu.

Penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui integrasi analisis teknis dan finansial pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) siklus biner di Wilayah Kerja Panas Bumi (WKP) Tulehu berbasis data eksplorasi aktual. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya hanya meninjau aspek teknis atau finansial secara terpisah, studi ini memanfaatkan data suhu, tekanan, dan laju aliran fluida dari sumur TLU-B-02 untuk mensimulasikan performa sistem sekaligus mengevaluasi kelayakan investasi menggunakan indikator NPV, BC *ratio*, IRR, dan *payback period*. Dalam studi ini, sumur TLU-D-01 ditetapkan sebagai sumur reinjeksi untuk mendukung keberlanjutan sistem reservoir panas bumi.

1.7 Hipotesis

Hipotesis pada penelitian ini adalah PLTP siklus biner pada lokasi Tulehu layak secara teknis karena dapat menghasilkan kapasitas dan efisiensi termal yang memanfaatkan panas dari *geofluid*. Selain itu secara hipotesis, PLTP siklus biner lokasi Tulehu tidak layak secara finansial pada temperatur dan EPC *Cost* tertentu, dengan menggunakan harga jual listrik rata-rata berdasarkan data internal PLN.

Tabel 1.5. Penelitian terdahulu tentang PLTP siklus biner

Referensi	Lokasi	Temperatur <i>geofluid</i>	Laju aliran massa <i>geofluid</i>	Fluida Kerja yang diteliti	Simulasi	Daya gross	Efisiensi Pembangkit	Indikator Analisis Finansial	Keterangan
(Pellu & Hatuwe, 2025)	Tulehu, Maluku Tengah	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	i-pentana, i-butana, butana	Hysys	3 MW	Tidak disebutkan	Tidak ada	Menggunakan 2 sumur WKP Tulehu, namun tidak disebutkan lokasi sumur yang dianalisis. Fluida kerja i-pentana memiliki kapasitas tertinggi sebesar 3 MW
(Nur et al., 2022)	Jaboi, Sabang	200 °C	95 kg/s	isopentana	EES	4,6 MW	Tidak disebutkan	IRR	IRR 10% dapat dicapai jika tarif adalah USD cent 13,38 /kWh
(Pellu et al., 2021)	Tulehu, Maluku Tengah	Tidak disebutkan	Tidak disebutkan	R134a, isobutane-n-pentana	Hysys	10 MW	Tidak disebutkan	Tidak ada	Lokasi sumur dan parameter <i>geofluid</i> tidak disebutkan dengan jelas. Disebutkan R134a merupakan fluida kerja terbaik
(Hajianto, 2022)	Tulehu, Maluku Tengah. Sumur TLU-01	101 °C	Brine: 19,87 t/h; Steam: 13,03 t/h	N-butane, Isobutane, R245fa, N-pentana, Isopentana	Hysys, excel, refprop	1,19–1,29 MW	10,2-10,9%	Hanya menyebutkan EPC Cost	Simulasi dilakukan pada sumur TLU-01. Fluida kerja yang memiliki performa terbaik adalah N-butane dengan kapasitas sebesar 1,29 MW.
Penelitian thesis	Tulehu, Maluku Tengah. Sumur TLU-B-02	Berdasarkan data PLN	Berdasarkan data PLN	n-pentana, isopentana	EES	dihitung	dihitung	NPV, BC Ratio, IRR, <i>payback period</i>	Penelitian membahas analisis teknis dan finansial pada lokasi TLU B-02 Tulehu dengan menggunakan software Engineering Equation Solver