



NOZEL

Jurnal Pendidikan Teknik Mesin

Jurnal Homepage: <https://jurnal.uns.ac.id/nozel>



ANALISIS PENGARUH KEDALAMAN INSULASI RISER TERHADAP KINERJA TERMAL DAN TEKNO EKONOMI SISTEM GEOTHERMAL CLOSE LOOP BERBASIS CO₂

Muhammad Robith Atho'illah¹, Nugroho Agung Pambudi²

Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan,
Universitas Sebelas Maret

Corresponding e-mail: na.pambudi22@gmail.com

Abstract

This study evaluates the thermodynamic and techno-economic impacts of varying Vacuum Insulated Tubing (VIT) depths in the riser of a supercritical CO₂ (sCO₂) closed-loop geothermal system (CLGS) integrated with an Organic Rankine Cycle (ORC). Through numerical modeling of a U-shaped configuration with insulation depths ranging from 0 m to the maximum well depth, a depth of 2,750 m was identified as the optimum point that yields the best balance between performance and capital expenditure. At this depth, the fluid production temperature increased from 111.27 °C to 127.13 °C and the heat extraction rate rose from 1.949 MW to 2.472 MW, directly boosting the ORC net electric power by 26.83% (from 0.2339 MW to 0.2966 MW). From an economic perspective, this optimal insulation depth generated a minimum Levelized Cost of Electricity (LCOE) of 0.96991 USD/kWh, representing a 13.51% reduction compared to the uninsulated system. In conclusion, precisely determining the insulation depth is highly crucial for maximizing thermodynamic efficiency while maintaining the financial feasibility limits of the CLGS power plant infrastructure.

Keywords: *Closed-Loop Geothermal System (CLGS), sCO₂, Heat Loss, Vacuum Insulated Tubing, Organic Rankine Cycle (ORC), LCOE*

A. PENDAHULUAN

Sistem panas bumi *closed-loop* (CLGS) yang memanfaatkan karbon dioksida superkritis (sCO₂) merupakan teknologi energi bersih yang sangat menjanjikan, namun efisiensi termalnya menghadapi kendala karena sangat dipengaruhi oleh kehilangan panas (*heat loss*) saat fluida mengalir naik menuju permukaan melalui pipa produksi (*riser*) (Lou et al., 2023). Kehilangan panas ini menyebabkan suhu keluaran fluida menurun secara signifikan, yang pada akhirnya menurunkan kualitas energi yang dapat dimanfaatkan oleh sistem pembangkit *Organic Rankine Cycle* (ORC) (Lou et al., 2023). Di sisi lain, penggunaan insulasi khusus seperti *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) terbukti efektif menekan laju kerugian termal tersebut (Lei et al., 2022a, 2022b). Namun, hal ini memunculkan dilema finansial (*trade-off*) karena tingginya biaya investasi material awal (CAPEX). Hingga saat ini, masih terdapat ketidakpastian mengenai batas kedalaman optimal penggunaan insulasi VIT agar mampu menyeimbangkan pencapaian efisiensi termodinamika secara maksimal dengan batasan kelayakan biaya infrastrukturnya.

Untuk mengatasi kendala termal dan keekonomian tersebut, diperlukan penentuan "posisi kritis" atau *sweet spot* finansial dari kedalaman insulasi. Rencana pemecahan masalah dilakukan melalui pendekatan pemodelan dan simulasi numerik secara terintegrasi pada sistem CLGS berkonfigurasi *U-shape*. Pemecahan masalah ini tidak hanya berfokus pada perpindahan panas, tetapi juga melacak efektivitas efek termosifon alami dari sCO₂ yang mampu mendorong sirkulasi dan menghilangkan kebutuhan konsumsi daya pompa (W. Song et al., 2020). Selanjutnya, keluaran termal ini akan diintegrasikan dengan efisiensi sistem ORC untuk menghitung sensitivitas biaya pembangkitan listrik dan menemukan titik operasi yang paling ekonomis.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kedalaman insulasi riser terhadap kinerja termal sumur sCO₂ serta performa pembangkitan listrik pada siklus ORC berbasis fluida R245fa, sekaligus merumuskan model analisis yang secara simultan membandingkan fluktuasi output energi sCO₂ terhadap parameter biaya investasi insulasi vakum dalam aspek tekno-ekonomi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi dan menentukan batas kedalaman insulasi optimal yang mampu menghasilkan nilai *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) terendah.

Tinjauan teoritik yang mendasari pemecahan masalah pada studi ini meliputi konsep *Geothermal Closed-Loop System* (CLGS), yaitu metode ekstraksi panas menggunakan sistem

pipa tertutup tanpa menambang air tanah secara langsung sehingga mampu mencegah penurunan permukaan air tanah dan pencemaran akuifer lingkungan (Liao et al., 2021). Selain itu, penelitian ini juga didasarkan pada karakteristik *Supercritical Carbon Dioxide* (sCO₂) dan fenomena termosifon, di mana sCO₂ yang menyerap panas akan mengalami ekspansi signifikan sehingga menciptakan gaya dorong hidrostatik yang memungkinkan sirkulasi fluida tanpa pompa dan berpotensi meningkatkan efisiensi eksergi ketika dikombinasikan dengan sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) (J. Song et al., 2021). Dari sisi pengendalian kehilangan panas, digunakan *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) untuk meningkatkan resistansi termal dan memblokir perpindahan panas, dengan nilai konduktivitas termal ultra-rendah sebesar 0,001–0,005 W/m·K sehingga efektif menjaga stabilitas temperatur sCO₂ (Dufrene et al., n.d.). Selanjutnya, pada tahap konversi energi, pembangkitan listrik dari sumber panas bersuhu menengah- rendah dilakukan menggunakan sistem ORC berbasis fluida kerja R245fa yang memiliki titik didih dan panas laten lebih rendah dibandingkan air, sehingga lebih efisien untuk aplikasi panas bumi temperatur menengah-rendah (Macchi & Astolfi, 2017).

Penelitian ini terdapat suatu titik *ekuilibrium* (keseimbangan) yang kritis antara performa termodinamika sCO₂ dan batasan kelayakan ekonomi instalasinya. Belum adanya panduan desain kuantitatif yang mengintegrasikan pengaruh sifat fluida sCO₂ terhadap posisi kedalaman insulasi secara finansial. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis berupa panduan desain kuantitatif (rekomendasi kedalaman insulasi optimal) bagi para insinyur dalam membangun sistem CLGS di lapangan. Selain itu, studi ini mengisi kekosongan literatur tentang dinamika terintegrasi sCO₂ dengan menyajikan sistem operasi yang mampu menjaga performa termodinamika secara maksimal dengan kelayakan finansial yang sepadan.

B. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif yang menggunakan pendekatan pemodelan komputasional dan simulasi termodinamika berbasis bahasa pemrograman Python. Desain utama yang diterapkan adalah studi parametrik (*parametric study*), yaitu dengan merekayasa dan memvariasikan kedalaman pemasangan insulasi *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) pada pipa riser secara sistematis. Evaluasi sistem dilakukan secara terintegrasi melalui tiga tahapan pemodelan: (a) pemodelan termal sumur di bawah permukaan untuk mensimulasikan profil suhu keluaran sCO₂, (b) pemodelan konversi energi siklus ORC di permukaan untuk

memproyeksikan daya listrik bersih dan (c) analisis tekno-ekonomi untuk mendapatkan angka kelayakan investasi berupa *Levelized Cost of Electricity* (LCOE).

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh parameter termodinamika dan tekno-ekonomi pada sistem pembangkit *Geothermal Closed Loop System* berkonfigurasi *U-shape*, sedangkan sampel penelitian ditentukan berdasarkan skenario simulasi variasi kedalaman insulasi yang diuji mulai dari kondisi tanpa insulasi (0 meter) hingga batas maksimum kedalaman riser. Karena penelitian ini berbasis simulasi komputer, seluruh sampel komputasi dieksekusi dengan menjaga variabel kontrol tetap konstan, seperti kedalaman lintasan vertikal dan horizontal sumur yang masing-masing ditetapkan sepanjang 5.000 meter, serta penggunaan fluida kerja *Supercritical Carbon Dioxide* (sCO₂) dan R245fa secara eksklusif dalam proses simulasi.

Data dalam penelitian simulasi ini diperoleh melalui teknik pengumpulan data sekunder berupa studi literatur dari jurnal internasional, buku teks, dan laporan proyek panas bumi terdahulu yang telah divalidasi ke dalam sistem satuan SI.

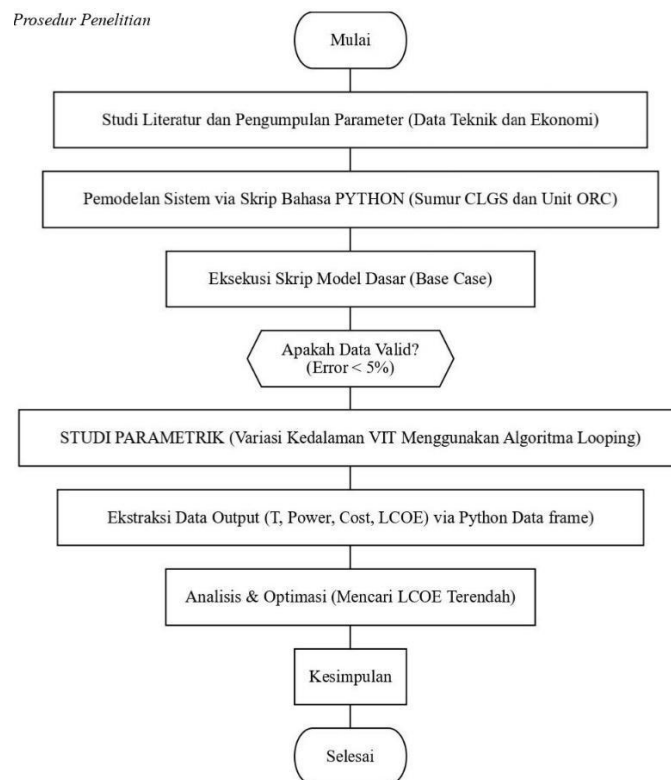
Proses pengumpulan data meliputi pengambilan data sifat termofisik menggunakan persamaan keadaan (*Equation of State*) melalui basis data properti fluida seperti [CoolProp](#) dan [REFPROP](#) untuk mengekstraksi nilai densitas, entalpi, serta konduktivitas termal *Supercritical Carbon Dioxide* (sCO₂) dan R245fa. Selain itu, data geologi dan lingkungan dikumpulkan melalui parameter reservoir batas, seperti gradien temperatur bumi sebesar 40–50 °C/km, suhu rata-rata permukaan bumi, dan konduktivitas formasi batuan. Pada aspek tekno-ekonomi, pengumpulan data dilakukan dengan menghimpun referensi dan asumsi pendanaan yang realistis, meliputi harga material *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) per meter, biaya pengeboran sumur, serta estimasi biaya investasi sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) atau *Capital Expenditure* (CAPEX).

Data simulasi dianalisis menggunakan landasan evaluasi numerik termodinamika (hukum kekekalan massa, momentum dan energi) yang diolah dalam kerangka *physics-informed dataset*. Peneliti membandingkan keluaran skenario simulasi secara simultan untuk melacak sensitivitas suhu keluaran fluida, peningkatan *net power output* (kinerja termal) dan fluktuasi biaya instalasi VIT (tekno-ekonomi). Hasil akhir kemudian dianalisis untuk menemukan *sweet spot* atau batas kedalaman optimal yang menghasilkan kurva nilai minimum pada *Levelized Cost of Electricity*. Keandalan model komputasi ini sebelumnya divalidasi akurasinya menggunakan parameter galat *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), di mana resolusi model harus menunjukkan angka penyimpangan jauh di bawah 5%.

NOZEL, Volume 08 Nomor 01, Mei 2026, 47 – 63

<https://doi.org/10.20961/nozel.v8i1.118682>

Penelitian ini berbasis virtual dan komputasi, spesifikasi alat dan bahan merujuk pada kemampuan perangkat lunak serta parameter fluida dan material yang disimulasikan. Pada aspek alat, penelitian menggunakan Python sebagai bahasa pemrograman yang mampu mengeksekusi perhitungan numerik matematis tingkat lanjut dan mengotomatisasi iterasi data pada studi parametrik persamaan termal sumur. Selain itu, digunakan basis data properti fluida [CoolProp](#) dan [REFPROP](#) yang memiliki tingkat presisi tinggi dalam memodelkan dinamika sifat termofisik fluida, terutama perubahan fase *pseudo-critical* akibat variasi tekanan dan temperatur. Pada aspek bahan komputasi, fluida primer yang digunakan adalah *Supercritical Carbon Dioxide* (sCO₂) dengan kriteria laju aliran massa 15–30 kg/s, tekanan masuk 8–10 MPa dan temperatur awal 20–30 °C. Fluida sekunder pada sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) menggunakan R245fa yang bersifat tidak mudah terbakar (*non-flammable*) dan bekerja optimal pada temperatur kondensasi 30–35 °C. Penelitian ini juga memodelkan *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) berupa struktur pipa baja koaksial beruang vakum dengan konduktivitas termal ultra-rendah sebesar 0,001–0,005 W/m·K untuk meminimalkan kehilangan panas. Sementara itu, formasi batuan reservoir dalam simulasi ditetapkan memiliki densitas 2.600 kg/m³, kapasitas panas spesifik 1.000 J/kg·K, dan konduktivitas termal sebesar 2,5–3,5 W/m·K.



Gambar 1

Prosedur Penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Penelitian

Bagian ini menyajikan hasil penelitian yang sudah dilakukan. Proses analisis data seperti perhitungan statistik dan proses pengujian hipotesis tidak harus disajikan. Hasil analisis dan hasil pengujian hipotesis saja yang dituliskan. Tabel dan atau grafik dapat digunakan untuk memperjelas penyajian hasil penelitian. Tabel dan atau grafik harus diberi penjelasan dan dibahas. Pada penelitian kualitatif, hasil memuat bagian-bagian rinci yang berkaitan langsung dengan fokus penelitian dan kategori-kategorinya.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kedalaman insulasi pada pipa riser memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa termal dan ekonomi sistem *Geothermal Closed-Loop* (CLGS). Data dikumpulkan melalui variasi kedalaman insulasi dari 0 meter (tanpa insulasi) hingga 5.000 meter (insulasi penuh).

Validasi numerik dilakukan dengan membandingkan hasil diskretisasi $dz = 20$ m terhadap referensi lebih halus $dz = 5$ m.

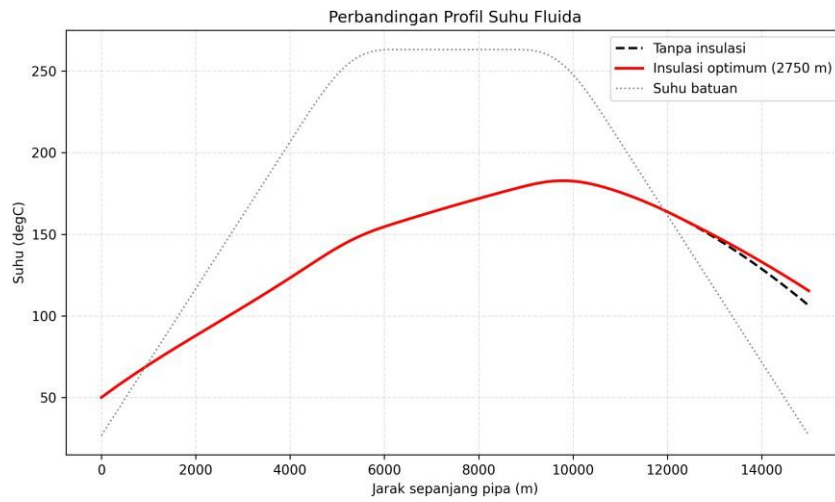
GAMBAR 1

Interpretasi: seluruh nilai MAPE berada jauh di bawah 5%, sehingga model dinyatakan sangat baik untuk studi parametrik dan analisis optimasi tekno - ekonomi.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan kedalaman insulasi pada riser menurunkan kehilangan panas parasitik dan meningkatkan temperatur produksi hingga rentang optimum tertentu. Ringkasan hasil pada beberapa titik kedalaman ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

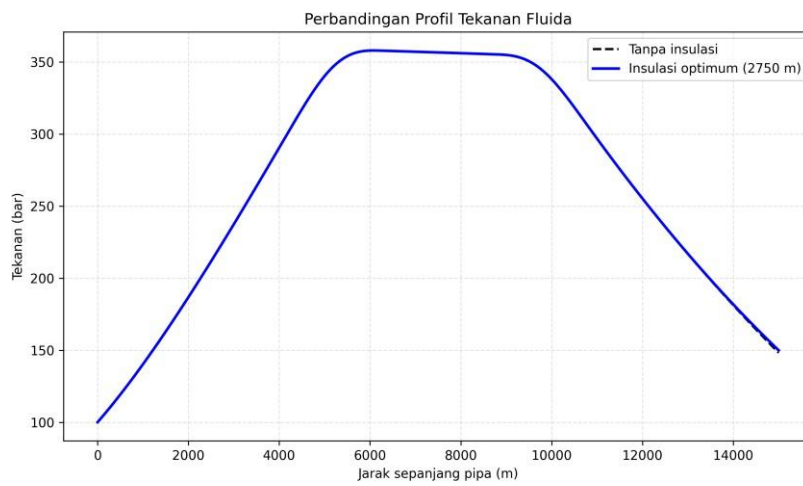
Tabel 1
Hasil Kinerja Termal

L_{ins} (m)	T_{out} (degC)	$Q_{thermal}$ (MW)
0	111.27	1.949
1000	118.52	2.204
2000	124.34	2.389
2750	127.13	2.472
3000	127.66	2.487
4000	127.67	2.488
5000	123.03	2.362



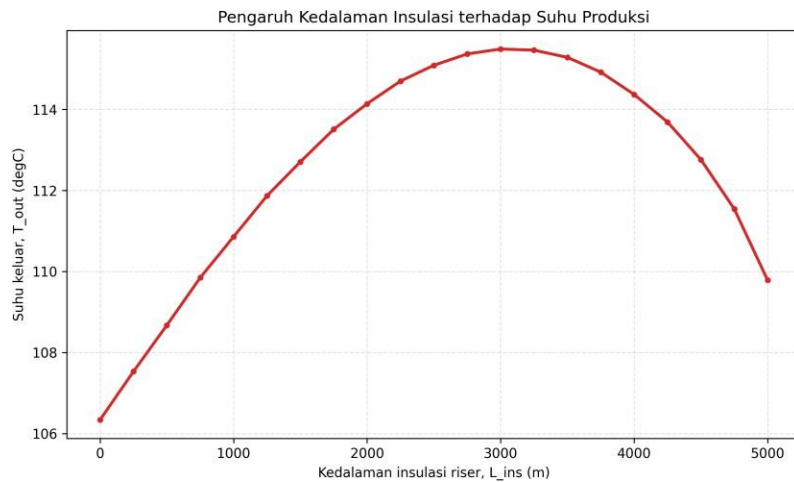
Gambar 2

Grafik Perbandingan Profil Suhu Fluida



Gambar 3

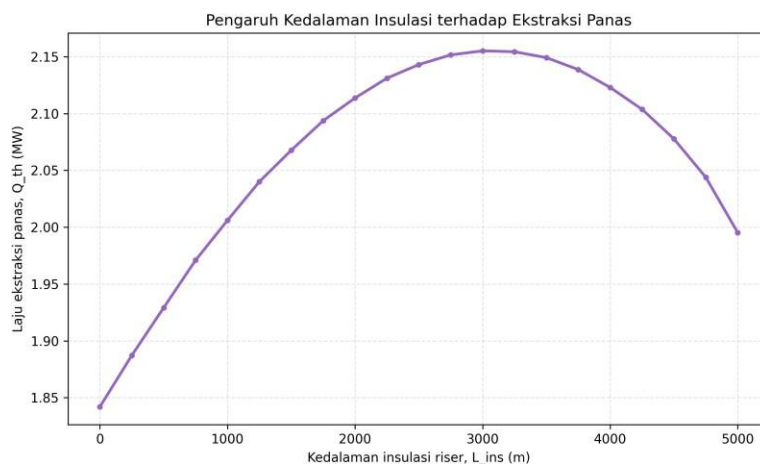
Grafik Perbandingan Profil Tekanan Fluida



Gambar 4

Grafik Pengaruh Kedalaman Insulasi Terhadap Suhu Produksi

Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa suhu keluaran sCO₂ meningkat secara logaritmik seiring bertambahnya kedalaman insulasi. Namun, kurva LCOE menunjukkan tren yang berbeda, di mana biaya pembangkitan menurun hingga titik tertentu sebelum akhirnya kembali meningkat perlahan.



Gambar 5

Grafik Pengaruh Kedalaman Insulasi Terhadap Ekstraksi Panas

Kondisi termal optimum tekno-ekonomi terjadi pada $L_{ins} = 2750$ m dengan $T_{out} = 127.13$ degC dan $Q_{thermal} = 2.472$ MW.

Perbandingan terhadap *baseline* ($L_{ins} = 0$ m):

- a. $\delta T_{out} = +15.86$ degC (+14.25%)
- b. $\delta Q_{thermal} = +0.523$ MW (+26.83%)

Secara termodinamika, tren ini konsisten dengan peningkatan resistansi termal radial pada segmen riser dangkal. Setelah titik tertentu, tambahan kedalaman insulasi memberikan manfaat marginal yang menurun (*diminishing thermal return*).

Daya listrik bersih dihitung dengan pendekatan:

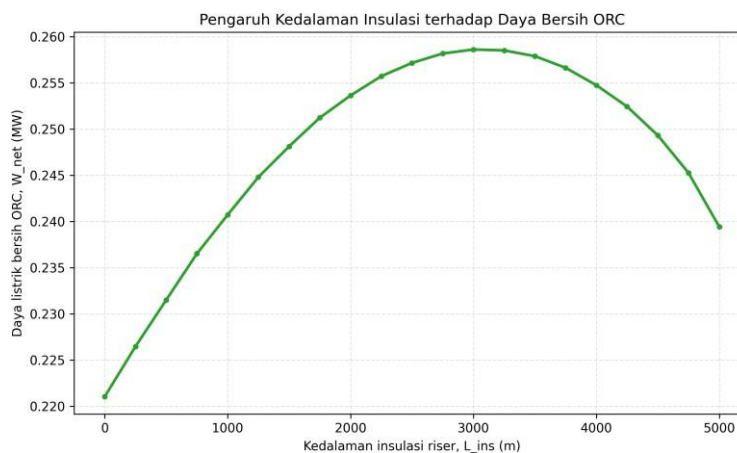
$$W_{net} = \eta_{ORC} \cdot Q_{thermal}$$

dengan $\eta_{ORC} = 12\%$

Tabel 2

Hasil Kinerja ORC

L_{ins} (m)	W_{net} (MW)
0	0.2339
2000	0.2867
2750	0.2966
3000	0.2985
5000	0.2834



Gambar 6

Grafik Pengaruh Kedalaman Insulasi Terhadap Daya Bersih ORC

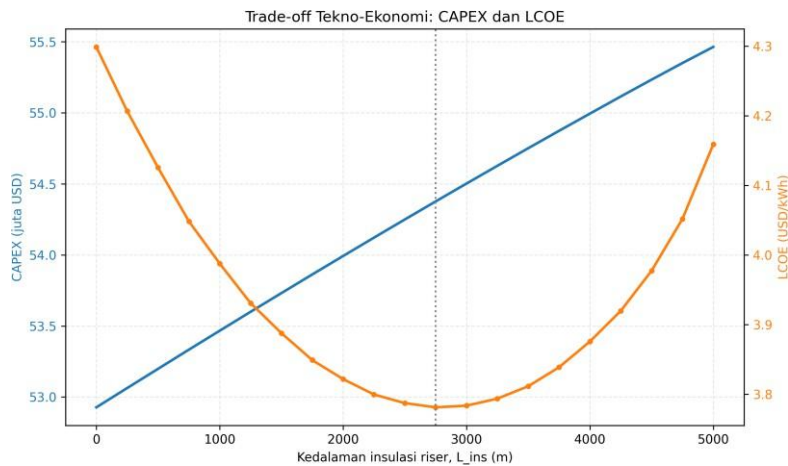
Pada titik optimum ($L_{ins} = 2750$ m) daya bersih meningkat +0.0628 MW dibanding *baseline* (+26.83%).

Hasil Tekno-Ekonomi dan Optimasi pada penelitian ini dihitung dengan Tabel 3 Indikator Ekonomi dan Grafik *Trade off Tecno Ekonomi* : CAPEX dan LCOE dibawah.

Tabel 3

Indikator Ekonomi

L_{ins} (m)	CAPEX (juta USD)	OPEX (juta USD/tahun)	LCOE (USD/kWh)	NPV (juta USD)	Payback (tahun)
0	15.468	0.619	1.12135	-20.104	
2000	16.573	0.663	0.98033	-21.238	
2750	16.968	0.679	0.96991	-21.717	
3000	17.097	0.684	0.97128	-21.885	
5000	18.067	0.723	1.08092	-23.396	



Gambar 7

Grafik Trade off Tekno Ekonomi : CAPEX dan LCOE

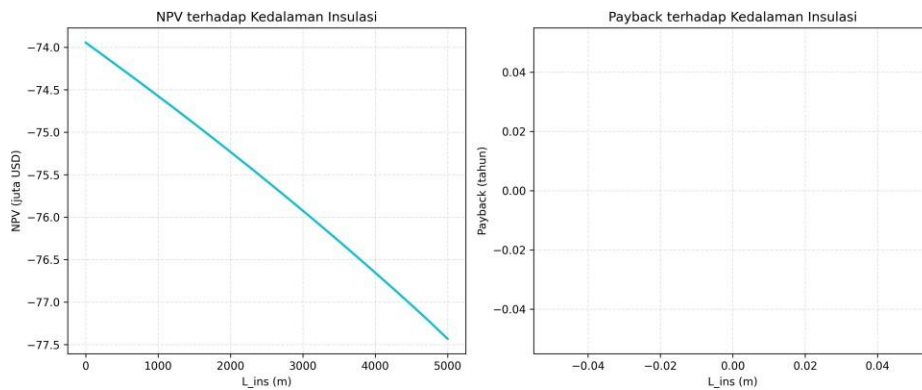
Hasil optimasi memberikan:

$$L_{ins,opt} = 2750 \text{ m}$$

$$LCOE_{min} = 0.96991 \text{ USD/kWh}$$

Dibandingkan *baseline*, LCOE turun dari 1.12135 menjadi 0.96991 USD/kWh (penurunan absolut 0.15144 USD/kWh atau 13.51%).

Walaupun performa termal dan daya bersih meningkat signifikan, hasil ekonomi dasar masih menunjukkan $NPV < 0$ dan $Payback = inf$ untuk seluruh skenario. Dengan kata lain, pada asumsi biaya dan harga listrik saat ini, proyek belum mencapai kelayakan investasi komersial.



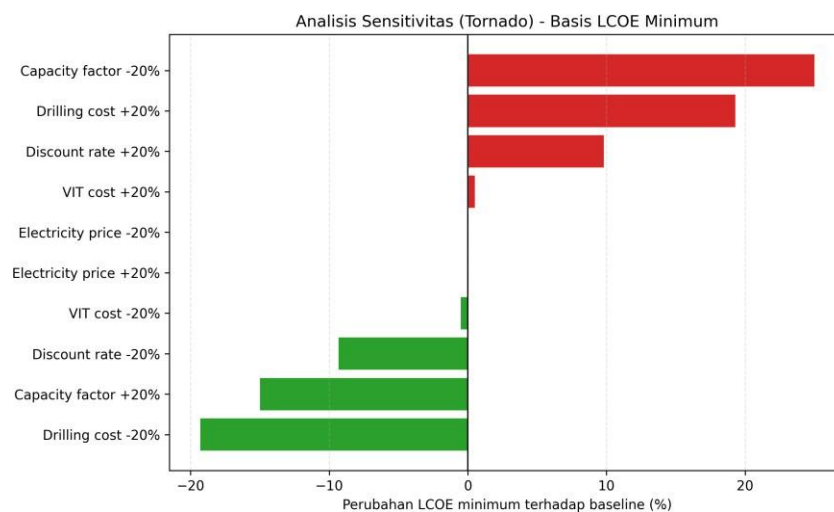
Gambar 8

Grafik NPV Terhadap Kedalaman Insulasi dan Payback Terhadap Kedalaman Insulasi

Sensitivitas dihitung terhadap perubahan parameter ekonomi utama (+/-20% dari *baseline*) dengan indikator respons delta LCOE pada kondisi minimum.

Tabel 4
Analisis Sensitivitas LCOE

<i>Skenario</i>	<i>LCOE_{min}</i> (USD/kWh)	<i>L_{ins,opt} (m)</i>	<i>Delta LCOE (%)</i>
Baseline	0.96991	2750	0.00
Discount rate -20%	0.87954	2750	-9.32
Discount rate +20%	1.06508	2750	+9.81
Drilling cost -20%	0.79827	2500	-17.70
Drilling cost +20%	1.14139	2750	+17.68
VIT cost -20%	0.95419	2750	-1.62
VIT cost +20%	0.98562	2750	+1.62
Capacity factor -20%	1.21238	2750	+25.00
Capacity factor +20%	0.87291	2750	-10.00
Electricity price -20%	0.96991	2750	0.00
Electricity price +20%	0.96991	2750	0.00



Gambar 9

Parameter paling dominan terhadap LCOE adalah:

- a. *Capacity factor*
- b. *Drilling cost*
- c. *Discount rate*

Temuan ini menegaskan bahwa strategi peningkatan kelayakan harus diprioritaskan pada peningkatan faktor kapasitas operasi, efisiensi biaya pengeboran, dan optimasi struktur pembiayaan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedalaman insulasi riser merupakan parameter desain yang sangat berpengaruh terhadap performa termal sistem CLGS-sCO₂. Peningkatan kedalaman insulasi dari 0 m ke 2750 m menaikkan temperatur produksi sebesar 15.86 degC dan laju ekstraksi panas sebesar 0.523 MW yang berdampak langsung pada peningkatan daya bersih ORC sebesar 0.0628 MW. Dari sudut pandang tekno-ekonomi, titik optimum diperoleh pada $L_{ins, opt} = 2750$ m dengan $LCOE_{min} = 0.96991$ USD/kWh atau menurun 13.51% dibanding kondisi tanpa insulasi. Walaupun demikian, nilai NPV yang masih negatif dan payback yang belum tercapai menunjukkan bahwa kelayakan komersial masih sensitif terhadap asumsi biaya pengeboran, faktor kapasitas dan struktur pendanaan proyek.

2. Pembahasan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa kedalaman insulasi riser tidak hanya meningkatkan efisiensi termal tetapi juga memiliki titik batas ekonomi. Kedalaman insulasi yang paling optimal ditemukan pada titik di mana penambahan biaya investasi material *Vacuum Insulated Tubing* (VIT) masih lebih rendah dibandingkan keuntungan finansial dari peningkatan daya listrik yang dihasilkan.

Temuan ini diperoleh melalui integrasi model numerik perpindahan panas sumur dengan siklus menggunakan termodinamika Python. ORC Dengan memvariasikan parameter L_{ins} , peneliti dapat melacak perubahan profil entalpi fluida sCO₂ sepanjang riser. Penurunan suhu yang drastis pada 1.000 m pertama di bawah permukaan (tanpa insulasi) teridentifikasi sebagai area kerugian panas terbesar karena perbedaan suhu yang ekstrem antara fluida panas dengan formasi batuan dangkal yang dingin.

Peningkatan kedalaman insulasi dari 0 ke 2.500 m memberikan peningkatan suhu keluaran sebesar ~38%. Hal ini disebabkan oleh kemampuan VIT dalam meminimalisir

konduksi panas ke lingkungan. Namun, pemasangan insulasi dari 2.500 m hingga 5.000 m hanya memberikan tambahan suhu yang relatif kecil namun dengan tambahan biaya modal (CAPEX) yang besar. Hal inilah yang menyebabkan nilai LCOE mulai merangkak naik setelah melewati kedalaman 2.500 meter, menandakan bahwa insulasi penuh tidak selalu menjadi pilihan yang paling ekonomis.

Temuan ini sejalan dengan teori perpindahan panas radial pada sumur panas bumi yang menyatakan bahwa resistansi termal tambahan akan menurunkan laju aliran panas keluar (heat loss) secara signifikan (Lou et al., 2023). Hasil ini juga mendukung penelitian Lei et al. (2022) yang menyatakan bahwa efektivitas VIT paling tinggi berada pada bagian atas sumur. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi lebih spesifik dengan mengintegrasikan aspek LCOE, yang belum banyak dibahas secara mendalam dalam konteks perbandingan kedalaman parsial insulasi pada fluida sCO₂. Penelitian pemahaman ini baru memunculkan bahwa dalam perancangan CLGS, strategi "insulasi parsial" (*partial insulation*) pada bagian atas riser jauh lebih efektif daripada insulasi total. Hal ini memodifikasi umum yang cenderung mengasumsikan bahwa insulasi sepanjang pipa produksi adalah keharusan untuk performa maksimal. Secara ekonomi, efektivitas biaya sistem panas bumi sCO₂ justru tercapai dengan membiarkan pipa bagian bawah tanpa insulasi untuk tetap menyerap sisa panas formasi, sementara perlindungan termal difokuskan pada zona batuan dingin.

D. PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil pemodelan simulasi termodinamika dan evaluasi tekno ekonomi terintegrasi pada sistem *Geothermal Closed-Loop* (CLGS) berbasis sCO₂, dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh Terhadap Kinerja Termal: Variasi kedalaman insulasi riser terbukti memberikan pengaruh yang signifikan dalam mencegah kehilangan panas (*heat loss*) ke formasi batuan dangkal. Pemasangan insulasi dari 0 m hingga ke titik kedalaman 2.750 m terbukti mampu meningkatkan temperatur produksi secara optimal dari 111,27 °C menjadi 127,13 °C, serta menaikkan laju ekstraksi panas dari 1,949 MW menjadi 2,472 MW.
2. Pengaruh Terhadap Kinerja Sistem ORC: Peningkatan kualitas profil termal sCO₂ tersebut berdampak langsung dan positif terhadap performa konversi

permukaan. daya Peningkatan di suhu keluaran mampu mendongkrak daya listrik bersih (*net power output*) pembangkit siklus ORC sebesar 26,83%, yaitu naik dari 0,2339 MW (pada sistem tanpa insulasi) menjadi 0,2966 MW.

3. Titik Optimal Tekno-Ekonomi (LCOE): Melalui perumusan model keseimbangan antara performa teknis energi dan biaya investasi modal material vakum (CAPEX), diperoleh titik keseimbangan finansial (*sweet spot*). Batas kedalaman insulasi riser yang paling optimal ditetapkan pada kedalaman 2.750 meter. Pada titik kedalaman ini, sistem menghasilkan biaya pembangkitan listrik atau *Levelized Cost of Electricity* (LCOE) minimum sebesar 0,96991 USD/kWh, yang mana nilai ini menurun 13,51% dibandingkan konfigurasi sumur tanpa insulasi.

Secara keseluruhan, penentuan kedalaman insulasi parsial yang tepat sangat krusial sebagai landasan desain guna menyeimbangkan pencapaian efisiensi termodinamika energi secara maksimal tanpa melampaui batasan kelayakan biaya infrastruktur pembangkit.

Saran

Saran disusun berdasarkan penelitian yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil analisis dan kesimpulan yang telah diuraikan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan baik untuk aplikasi praktis maupun pengembangan penelitian selanjutnya:

Bagi Praktisi Geothermal dan Insinyur:

1. Dalam perancangan instalasi sistem *Geothermal Closed-Loop* (CLGS), perencanaan desain insulasi riser sebaiknya tidak lagi difokuskan pada pencapaian pemulihan panas maksimum (*maximum thermal recovery*) dengan menginsulasi keseluruhan pipa secara total. Pemasangan insulasi disarankan berpedoman pada batas kedalaman pemotongan ekonomi (*economic cut-off depth*), di mana insulasi parsial pada sumur atas terbukti jauh lebih rasional secara finansial.
2. Oleh karena faktor kapasitas (*capacity factor*) dan biaya pengeboran merupakan variabel yang paling dominan mengungkit nilai LCOE, maka intervensi proyek disarankan lebih berfokus pada strategi penekanan biaya pengeboran sumur dan peningkatan jam operasi pembangkit dibandingkan sekadar menekan harga material insulasi.

Bagi Penelitian Selanjutnya:

1. Model yang digunakan pada studi ini masih menggunakan pendekatan 1-Dimensi steady state. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya sangat disarankan untuk mengembangkan pemodelan numerik ke arah rezim transien (*transient*). Hal ini diperlukan untuk menangkap fluktuasi dan evolusi termal pada *reservoir* dalam jangka panjang, serta untuk menganalisis dinamika sistem secara *real-time* ketika fase *startup* maupun beroperasi *shutdown*.
2. Disarankan juga untuk mengkaji parameter operasi sistem ORC yang lebih bervariasi atau melakukan integrasi dengan jenis fluida kerja organik lainnya guna mengeksplorasi potensi perbaikan efisiensi eksergi yang lebih tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Rektorat Universitas Sebelas Maret (UNS) Surakarta dan Dekan Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan (FKIP) atas dukungan fasilitas selama masa studi. Apresiasi khusus dan penghargaan yang setinggi-tingginya ditujukan kepada Dr. Eng. Nugroho Agung Pambudi, M.Eng., selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan, motivasi, dan bimbingan berharga dalam penyelesaian riset ini. Penulis juga berterima kasih kepada Prof. Dr. Indah Widiastuti, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Pendidikan Teknik Mesin beserta seluruh jajaran dosen atas bekal ilmu dan dukungannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Dufrene, C., Cambre, E., Sfeir, J., Kozikowski, M., & Bois, A.-P. (n.d.). Enhancing Thermal Efficiency in Super-Hot Geothermal Systems: Optimizing Premium Connections for Advanced Vacuum Insulated Tubulars. In *PROCEEDINGS* (Vol. 50).
- Lei, G., Yu, X., Li, T., Habibzadeh-Bigdarvish, O., & Hurley, M. T. (2022a). Insulated PEX-pipe loops for deicing on existing bridge deck using geothermal energy: Laboratory tests, modeling, and performance analyses. *Applied Thermal Engineering*, 205, 118028. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.118028>
- Lei, G., Yu, X., Li, T., Habibzadeh-Bigdarvish, O., & Hurley, M. T. (2022b). Insulated PEX-pipe loops for deicing on existing bridge deck using geothermal energy: Laboratory tests, modeling, and performance analyses. *Applied Thermal Engineering*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.118028>

- Liao, Y., Sun, X., Sun, B., Wang, Z., Wang, J., & Wang, X. (2021). Geothermal exploitation and electricity generation from multibranch U-shaped well-enhanced geothermal system. *Renewable Energy*, *163*, 2178–2189. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.10.090>
- Lou, Y., Liu, G., Romagnoli, A., & Ji, D. (2023). TEG-ORC combined cycle for geothermal source with coaxial casing well. *Applied Thermal Engineering*, *226*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120223>
- Macchi, E., & Astolfi, M. (2017). Axial flow turbines for Organic Rankine Cycle applications. *Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications*, 299–319. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100510-1.00009-0>
- Song, J., Wang, Y., Wang, K., Wang, J., & Markides, C. N. (2021). Combined supercritical CO₂ (SCO₂) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for hybrid solar and geothermal power generation: Thermo-economic assessment of various configurations. *Renewable Energy*, *174*, 1020–1035. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2021.04.124>
- Song, W., Wang, C., Du, Y., Shen, B., Chen, S., & Jiang, Y. (2020). Comparative analysis on the heat transfer efficiency of supercritical CO₂ and H₂O in the production well of enhanced geothermal system. *Energy*, *205*, 118071. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118071>