

2.5.3 Penelitian Tentang Pengaruh Variasi Diameter <i>Inner Pipe</i> pada <i>Borehole Heat Exchanger</i> dengan Nilai <i>Pressure Drop</i>	12
2.6 Pemilihan Fluida Kerja Organik	12
BAB 3 LANDASAN TEORI	14
3.1 Dasar Perpindahan Panas	14
3.1.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi	15
3.1.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi	16
3.1.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi.....	17
3.2 Alat Penukar Kalor	18
3.2.1 <i>Parallel Flow Heat Exchanger</i>	18
3.2.2 <i>Counter Flow Heat Exchanger</i>	19
3.3 Penukar Kalor Pipa Konsentris.....	20
3.4 Penurunan Tekanan Akibat Aliran dalam Pipa.....	23
3.4.1 Kerugian Mayor pada Aliran Sepanjang Pipa	23
3.4.2 Kerugian Minor pada Aliran Sepanjang Pipa	25
3.5 Daya Pompa	26
3.6 Daya Termal	26
3.7 <i>Computational Fluid Dynamics (CFD)</i>	27
3.7.1 COMSOL Multiphysics	27
3.7.2 Proses Simulasi CFD	28
3.7.3 <i>Governing Equation</i>	34
3.7.4 Model Turbulensi.....	38
3.7.5 Konvergensi	42
BAB 4 METODE PENELITIAN	43
4.1 Lokasi penelitian.....	43
4.2 Alat Penelitian.....	43
4.3 Bahan Penelitian	44
4.3.1 Data PT-Logging sumur panas bumi	44
4.3.2 Desain Casing Sumur Panas Bumi Mataloko MT-03.....	45
4.4 Diagram Alir Penelitian	46
4.4.1 Diagram Alir Penelitian Secara Umum	46

4.4.2 Diagram Alir <i>Computational Fluid Dynamics</i>	47
4.5 Tahap Simulasi COMSOL Multiphysics	48
4.5.1 Tahap Persiapan	48
4.5.2 Proses Simulasi Pada COMSOL Multiphysics.....	48
BAB 5 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	66
5.1 Validasi Sumur dengan Model Simulasi	66
5.2 Hasil Simulasi dengan Variasi <i>Closed Loop Inner Diameter</i>	67
5.2.1 Profil dan Kontur Suhu Pada Model Sumur MT-03 Dengan Variasi <i>Closed Loop Inner Diameter</i>	67
5.2.2 Distribusi Suhu pada Tiap Variasi <i>Inner Pipe Diameter</i>	71
5.3 Daya Pompa dengan Variasi <i>Inner Pipe Diameter</i>	75
5.3.1 Penentuan <i>Friction Factor</i>	75
5.3.2 Perhitungan Daya Pompa.....	77
5.3.3 Perhitungan Tenaga Termal.....	81
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	84
6.1 Kesimpulan	84
6.2 Saran.....	84
DAFTAR PUSTAKA	86
LAMPIRAN.....	89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema pembangkit listrik tenaga panas bumi	6
Gambar 2. 2 Skema pergerakan fluida pada sumur panas bumi	8
Gambar 2. 3 Perbedaan <i>closed loop</i> dan <i>open loop geothermal system</i>	8
Gambar 2. 4 Skema pergerakan fluida pada sumur panas bumi	8
Gambar 3. 1 Penukar kalor aliran searah (<i>parallel flow</i>)	18
Gambar 3. 2 Distribusi temperatur aliran searah pada penukar kalor <i>single-pass</i>	19
Gambar 3. 3 Penukar kalor aliran berlawanan arah (<i>counter flow</i>)	19
Gambar 3. 4 Distribusi temperatur aliran berlawanan arah pada alat penukar kalor <i>single-pass</i>	20
Gambar 3. 5 Dua arah permukaan perpindahan panas pada penukar panas pipa ganda	21
Gambar 3. 6 Jaringan resistansi termal pada perpindahan panas dalam penukar panas pipa ganda	22
Gambar 3. 7 Moody Diagram	24
Gambar 3. 8 Bentuk sel dua dimensi	30
Gambar 3. 9 Bentuk sel <i>meshing</i> tiga dimensi.....	31
Gambar 3. 10 Contoh hasil <i>mesh</i> pada COMSOL	32
Gambar 3. 11 Contoh hasil kontur pada COMSOL.....	33
Gambar 3. 12 Contoh visualisasi <i>vector</i> pada COMSOL	33
Gambar 3. 13 Contoh hasil <i>pathline</i> pada COMSOL	33
Gambar 4. 1 Profil Suhu MT-03	45
Gambar 4. 2 Desain casing sumur MT-03 Mataloko.....	45
Gambar 4. 3 Diagram alir penelitian simulasi <i>closed loop system</i> panas bumi	46
Gambar 4. 4 Diagram alir penelitian proses simulasi <i>closed loop system</i> menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics	47
Gambar 4. 5 Pemilihan dimensi ruang pada COMSOL.....	48
Gambar 4. 6 Pemilihan jenis fenomena fisis yang digunakan di COMSOL	49
Gambar 4. 7 Pemilihan jenis <i>study</i> pada COMSOL	50
Gambar 4. 8 Desain geometri sumur MT-03 Mataloko pada COMSOL.....	51

Gambar 4. 9 Susunan geometri sumur MT-03 Mataloko pada COMSOL	51
Gambar 4. 10 Contoh pemilihan domain material pada COMSOL.....	52
Gambar 4. 11 Penentuan domain modul <i>Heat Transfer in Solids and Fluid</i>	52
Gambar 4. 12 Penentuan domain <i>Solid</i> modul <i>Heat Transfer in Solids and Fluid</i>	53
Gambar 4. 13 Penentuan domain <i>Fluid</i> modul <i>Heat Transfer in Solids and Fluid</i>	53
Gambar 4. 14 Penentuan <i>initial values</i> temperature	54
Gambar 4. 15 Penentuan sumbu <i>axial symmetry</i>	54
Gambar 4. 16 Penentuan <i>outflow</i> pada sistem <i>closed loop</i>	55
Gambar 4. 17 Penentuan <i>outflow</i> pada <i>resevoir</i>	55
Gambar 4. 18 Penentuan <i>inflow</i> sumur dari dalam bumi	56
Gambar 4. 19 Penentuan <i>inflow</i> fluida kerja pada <i>close loop</i>	56
Gambar 4. 20 Penentuan suhu permukaan tanak	57
Gambar 4. 21 Penentuan batasan suhu <i>reservoir</i>	57
Gambar 4. 22 Penentuan domain <i>turbulent flow</i> $k-\omega$	58
Gambar 4. 23 Penentuan <i>fluid properties</i> pada model.....	58
Gambar 4. 24 <i>Initial value</i> dari perhitungan aliran turbulen.....	59
Gambar 4. 25 Pemilihan sumbu <i>axial symmetry</i>	59
Gambar 4. 26 Pemilihan <i>inlet</i> pada <i>closed loop</i>	60
Gambar 4. 27 Pemilihan <i>outlet</i> pada <i>closed loop</i>	60
Gambar 4. 28 Pemilihan inlet pada <i>reservoir</i>	61
Gambar 4. 29 Pemilihan <i>outlet</i> pada <i>reservoir</i>	61
Gambar 4. 30 Pemilihan multiphysics <i>Nonisothermal Flow</i>	62
Gambar 4. 31 Persebaran kualitas <i>mesh</i>	62
Gambar 4. 32 Persebaran nilai quality <i>skewness</i> pada model.....	63
Gambar 4. 33 <i>Segregated solver</i> pada COMSOL	64
Gambar 4. 34 <i>Cut line inlet</i> pada model sumur	65
Gambar 4. 34 <i>Cut line outlet</i> pada model sumur	65
Gambar L. 1 Data Temperatur <i>Inlet/Outlet</i> Variasi Diameter <i>inner pipe</i>	65

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Potensi panas bumi di Indonesia.....	5
Tabel 4. 1 Spesifikasi perangkat keras.....	43
Tabel 4. 2 Ukuran konstruksi sumur panas bumi MT-03 Mataloko	50
Tabel 5. 1 Reynolds Number.....	79
Tabel 5. 2 Daya Pompa	80
Tabel 5. 3 Tenaga Termal Sebagai Fungsi Diameter Dalam	82

DAFTAR NOTASI

A	: Luas permukaan (m^2)
A_i	: Luas permukaan sisi dalam (m^2)
A_o	: Luas permukaan sisi luar (m^2)
A_s	: Luas (m^2)
C_p	: Kalor jenis pada tekanan konstan ($J/kg \cdot K$)
C_v	: Kalor jenis pada volume konstan ($J/kg \cdot K$)
D	: Diameter pipa (m)
D_i	: Diameter dalam pipa (m)
D_o	: Diameter luar pipa (m)
E	: Emisivitas permukaan (0-1)
F	: Faktor gesekan Darcy
G	: Faktor gesekan Darcy
h	: Koefisien konveksi ($W/m^2 \cdot K$)
H_i	: Koefisien konveksi sisi dalam ($W/m^2 \cdot K$)
H_o	: Koefisien konveksi sisi luar ($W/m^2 \cdot K$)
k	: Koefisien konduksi ($W/m \cdot K$)
L	: Panjang pipa (m)
M	: Viskositas fluida ($Pa \cdot s$)
\dot{m}	: Laju massa (kg/s)
P	: Tekanan (Pa)
Q	: Laju perpindahan panas (W)
Q	: Fluks panas (W/m^2)
Re	: Reynolds Number
R_i	: Hambatan termal sisi dalam (K/W)
R_o	: Hambatan termal sisi luar
t	: Waktu (s)
T	: Temperatur (K)
T_s	: Suhu permukaan (K)

T_{∞}	:	Suhu fluida (K)
u, v, w	:	Komponen kecepatan dalam arah x, y, dan z
v	:	Kecepatan aliran fluida (m/s)
μ	:	Viskositas fluida ($Pa \cdot s$)
ΔP	:	Penurunan tekanan (Pa)
ΔT	:	Perbedaan temperatur (K)
ρ	:	Massa jenis (kg/m^3)
σ	:	Konstanta Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$)

Singkatan

2D	:	<i>Two dimension</i>
3D	:	<i>Three dimension</i>
CAD	:	<i>Computer-Aided Design</i>
CAE	:	<i>Computer-Aided Engineering</i>
CFD	:	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
KESDM	:	Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
LES	:	<i>Large Eddy Simulation</i>
MW	:	<i>Megawatt</i>
PLTP	:	Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi
RANS	:	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
SST	:	<i>Shear Stress Transport</i>
TKS	:	Tekanan Kepala Sumur

INTISARI

Sistem panas bumi *closed-loop* koaksial muncul sebagai alternatif yang kuat untuk mengatasi keterbatasan sistem konvensional, karena lebih aman dan fleksibel. Kinerjanya sangat ditentukan oleh parameter desain—khususnya diameter pipa dalam (*inner pipe*)—yang memengaruhi efisiensi perpindahan panas dan performa keseluruhan. Karena itu, studi ini bertujuan menganalisis secara numerik dampak variasi kedalaman terhadap respons termal dan hidrolis sistem, mencakup evaluasi perpindahan panas, tenaga termal, serta kebutuhan daya pompa.

Penelitian dilakukan melalui simulasi COMSOL Multiphysics pada model sumur MT-3 di PLTP Mataloko, Flores. Untuk menilai pengaruh kedalaman, diterapkan variasi diameter inner pipe dari 450 hingga 600 mm. Analisis steady-state digunakan untuk mengamati bagaimana perubahan kedalaman memengaruhi suhu keluaran, tenaga termal yang dihasilkan, dan daya pompa yang diperlukan untuk mensirkulasikan fluida kerja.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa memperkecil diameter inner pipe meningkatkan suhu keluaran fluida kerja dari 137,35°C menjadi 139,26°C, sekaligus menambah tenaga termal yang diekstraksi. Pada saat yang sama, daya pompa turun signifikan dari 7783,9 W menjadi 2702 W. Temuan ini menyoroti *trade-off* penting: perolehan energi termal menunjukkan *diminishing returns* pada diameter pipa dalam yang lebih besar, sementara konsumsi daya pompa justru meningkat tajam. Oleh sebab itu, optimasi desain diperlukan untuk menyeimbangkan kedua aspek tersebut demi efisiensi sistem yang maksimal.

Kata kunci: *closed loop geothermal system*, sumur panas bumi, Perpindahan Panas, Daya Pompa, diameter *inner pipe*, Tenaga Termal, Comsol Multiphysics

ABSTRACT

The coaxial closed-loop geothermal system has emerged as a compelling alternative to overcome the limitations of conventional systems, offering greater safety and flexibility. Its performance is strongly governed by design parameters—particularly the inner-pipe diameter—which influences heat-transfer efficiency and overall system behavior. Accordingly, this study numerically analyzes the effect of depth variation on the system’s thermal and hydraulic responses, including heat transfer, thermal power, and required pumping power.

The investigation employs COMSOL Multiphysics simulations of the MT-3 well model at the Mataloko Geothermal Power Plant, Flores. To assess the influence of depth, inner-pipe diameters ranging from 450 to 600 mm are considered. A steady-state analysis is used to observe how changes in depth affect outlet temperature, generated thermal power, and the pumping power needed to circulate the working fluid.

The simulation results show that reducing the inner-pipe diameter raises the working-fluid outlet temperature from 137.35 °C to 139.26 °C and increases the extracted thermal power. At the same time, the required pumping power drops markedly from 7,783.9 W to 2,702 W. These findings reveal a critical trade-off: thermal energy gains exhibit diminishing returns at larger inner-pipe diameters, while pumping power consumption escalates sharply. Therefore, design optimization is necessary to balance these factors and achieve maximum overall system efficiency.

Keywords: closed-loop geothermal system, geothermal well, heat transfer, pumping power, inner-pipe diameter, thermal power, COMSOL Multiphysics.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki lebih dari 200 gunung berapi yang tersebar di pulau-pulau seperti Sumatra, Jawa, Bali, dan wilayah timur lainnya, memberikan potensi panas bumi terbesar di dunia dengan kapasitas hingga 29 GWe (Darma, 2016). Di tengah penggunaan luas Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia, pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) menjadi opsi yang lebih ramah lingkungan. PLTP dipandang sebagai pilihan yang lebih bersih, karena sumber panasnya berasal dari energi panas bumi alih-alih pembakaran seperti pada PLTU. Panas ini berasal dari inti bumi dan ditransfer ke fluida yang berada di bawah permukaan tanah. Selain itu, PLTP juga memiliki keunggulan dibandingkan dengan energi surya atau angin, karena mampu menghasilkan listrik secara konsisten sepanjang hari.

Saat ini, metode pemanfaatan panas bumi umumnya masih dilakukan secara konvensional dengan langsung mengambil fluida panas bumi berupa uap atau air panas dari reservoir. Namun, ada beberapa alasan mengapa pengambilan langsung fluida produksi ini bisa menimbulkan masalah. Sebagai contoh: (1) fluida produksi dapat mengandung larutan kimia dari batuan yang bersifat korosif terhadap sumur dan peralatan di permukaan, (2) fluida tersebut dapat membawa zat kimia seperti gas asam dari reservoir ke permukaan, yang dianggap sebagai polutan berbahaya, (3) fluida reservoir itu sendiri mungkin berbahaya dan membutuhkan penanganan khusus, (4) fluida kerja yang diinjeksikan dapat bereaksi dengan batuan dan berpotensi merusak formasi, serta (5) reservoir mungkin memiliki permeabilitas yang tidak memadai untuk mengalirkan atau menginjeksikan fluida kerja dengan laju aliran yang diinginkan. Salah satu cara untuk mengatasi masalah ini adalah dengan mengisolasi fluida reservoir dari infrastruktur pengambilan energi. *Borehole Heat Exchanger* merupakan salah satu cara penanganan untuk masalah - masalah tersebut.

Borehole heat exchanger (BHE) telah banyak digunakan pada sistem panas bumi dangkal untuk pemanasan ruangan, pemanasan air, serta kegunaan yang lain. Saat ini peluang terbuka lebar untuk pengembangan borehole heat exchanger yang diaplikasikan pada sistem panas bumi dalam. Hal itu dikarenakan kemampuan ekstraksi panas yang rendah pada sistem panas bumi dangkal, sehingga membutuhkan konduktivitas panas yang lebih tinggi dengan dengan proses pengeboran sumur yang lebih dalam dan lebih panjang. Selain itu, sistem panas bumi liquid-dominated reservoir memiliki karakteristik perpindahan panas secara konveksi karena perbedaan densitas dari fluida panas bumi yang dekat dengan sumber panas (magma) dan fluida dingin yang berada pada bagian atas reservoir. Dengan menggunakan sistem *borehole heat exchanger* secara konveksi dapat meningkatkan transfer panas ke borehole heat exchanger dari pada konduksi.

Peningkatan transfer kalor pada BHE dapat dilakukan dengan memvariasikan diameter dalam (D_i) pada pipa konsentris. Variasi D_i ini bertujuan untuk mencari temperature dan *pressure drop* yang optimal untuk transfer kalor. Pada diameter yang lebih kecil, fluida akan lebih mengalami banyak gesekan sehingga *pressure drop* yang dihasilkan juga semakin besar sedangkan diameter kecil dapat meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksi karena luas permukaan antar fluida dan dinding pipa relatif lebih besar.

Penelitian ini bertujuan untuk mencari variasi diameter secara linear yang dapat meningkatkan transfer kalor pada BHE yang diaplikasikan pada *abandoned well* dan *idle well*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan sebelumnya, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yang menjadi dasar penelitian ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh diameter terhadap peningkatan transfer kalor yang dihasilkan ?
2. Bagaimana pengaruh variasi diameter *inner pipe* terhadap penurunan tekanan ?

3. Bagaimana pengaruh variasi diameter *inner pipe* terhadap tenaga termal yang dihasilkan ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan dalam melakukan simulasi *borehole heat exchanger* pada penelitian ini adalah:

1. Mempelajari pengaruh *inner diameter* (D_i) terhadap suhu *outlet* yang dihasilkan oleh closed loop system pada sumur panas bumi.
2. Mempelajari pengaruh *inner diameter* (D_i) terhadap nilai daya pompa yang dihasilkan oleh *closed loop system* pada sumur panas bumi.
3. Mempelajari pengaruh *inner diameter* (D_i) terhadap nilai tenaga termal yang dihasilkan oleh *closed loop system* pada sumur panas bumi

1.4 Batasan dan Asumsi Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Tubing yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan konfigurasi coaxial atau tube-in-tube design.
2. Model yang digunakan adalah 2D-axisymmetry
3. Data sumur berdasarkan data pada sumur MT-03 dari PLTP Mataloko Nusa Tenggara Timur.
4. Fluida kerja yang digunakan berupa air (H_2O).
5. Ruang lingkup yang diteliti adalah unjuk kerja thermal dan *pressure drop* dari fluida kerja.
6. Sistem beroperasi pada keadaan *steady state* dan *pressure drop* serta *heat loss* diabaikan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Diharapkan dapat menjadi referensi dalam penentuan diameter dari Borehole Heat Exchanger (BHE) sehingga didapat transfer kalor yang maksimal.
2. Memberikan peluang untuk dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai peningkatan heat transfer coefficient dengan menggunakan variasi *inner diameter* (Di).
3. Memberikan gambaran terkait variabel apa saja yang dapat mempengaruhi performa termal untuk penelitian lebih lanjut.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Panas Bumi di Indonesia

Indonesia memiliki potensi sumber daya panas bumi yang signifikan, mencapai 29,5 GW atau sekitar 40% dari total potensi global (KESDM, 2020). Potensi ini dihasilkan oleh aktivitas subduksi lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik yang membentuk 127 gunung api yang tersebar di seluruh wilayah negara ini. Dengan jumlah gunung api yang sangat banyak, Indonesia menjadi bagian integral dari "Cincin Api Dunia". Energi panas bumi merupakan sumber daya alam yang bersih, stabil, dan terbarukan, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber utama pembangkit listrik. Keunggulan utama energi panas bumi adalah ketersediaannya yang berkelanjutan sepanjang waktu, yaitu selama 24 jam sehari, serta tingkat emisi gas rumah kaca yang sangat rendah. Dengan karakteristik tersebut, energi panas bumi memiliki potensi besar untuk mendukung upaya Indonesia dalam mencapai target Net Zero Emission.

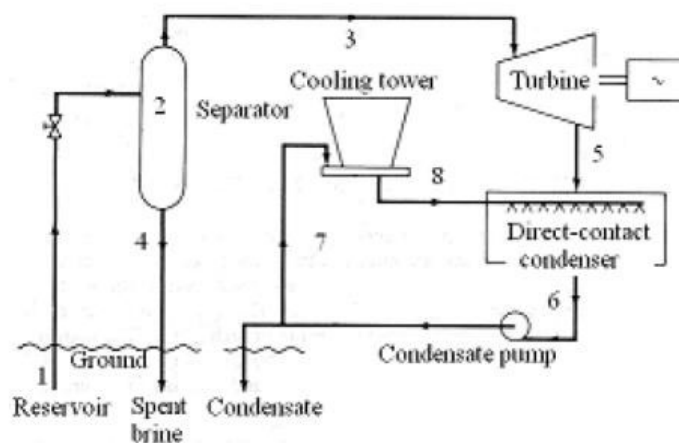
Tabel 2. 1 Potensi panas bumi di Indonesia (KESDM, 2020)

Wilayah	Jumlah Titik	Sumber Daya (MW)	Cadangan (MW)
Sumatera	101	3827	5620
Jawa	75	2450	5600
Bali-Nusa Tenggara	40	464	1269,5
Kalimantan	14	169	6
Sulawesi	91	1708	1363
Maluku-Papua	36	726	493
Total	357	9344	14351,5

Dengan potensi panas bumi yang sangat besar seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.1. Namun pemanfaatan panas bumi di Indonesia masih relatif sangat kecil. Pada akhir tahun 2022, kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga panas bumi di Indonesia sebesar 2356 MW atau 7,9% dari total potensi (Cariaga, 2023). Meski begitu Indonesia masih menjadi negara terbesar kedua kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga panas bumi setelah Amerika Serikat.

2.2 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) memproduksi listrik dengan menggunakan uap geotermal dari kedalaman bumi. Uap terbentuk saat air bawah permukaan dipanaskan oleh batuan bersuhu tinggi hingga mencapai kondisi jenuh, lalu berubah menjadi uap bertekanan yang dipakai untuk memutar turbin dan menggerakkan generator. Sumber panas ini bersifat alami dan berkelanjutan. Suhu inti bumi diperkirakan sekitar 5.000°C dan panasnya dihantarkan ke lapisan batuan di atasnya (Lay & Wallace, 1995). Pemanasan tersebut meningkatkan suhu dan tekanan air pori hingga menjadi uap. Di lokasi pembangkit, uap dialirkan ke turbin yang terhubung dengan generator sehingga energi panas bumi dikonversi menjadi energi listrik yang siap digunakan. Skema aliran energi dari reservoir panas bumi hingga keluaran listrik ditunjukkan pada Gambar 2.1 (Irsamukhti, 2012). Secara umum, PLTP merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan stabil.



Gambar 2. 1 Skema pembangkit listrik tenaga panas bumi (Zeyghami,2010)

Energi panas bumi memiliki beberapa keuntungan antara lain :

1. Dapat Diperbarui (*Renewable*)

Energi panas bumi bersifat terbarukan karena dengan pengelolaan reservoir yang tepat, panasnya dapat terus dimanfaatkan. Prosesnya melibatkan pengambilan uap untuk menghasilkan energi, yang kemudian didinginkan dan dikembalikan ke dalam reservoir untuk menjaga keseimbangan dan keberlanjutan sumber energi (Lund dkk., 2010).

2. Melimpahnya Titik Panas Bumi di Indonesia

Di Indonesia sudah memiliki banyak titik panas bumi yang dapat dimanfaatkan karena Indonesia memiliki keuntungan geografis yang terletak pada ring of fire.

3. Stabil dan Konsisten

Pembangkit listrik tenaga panas bumi dapat berjalan secara konsisten selama 24 jam dan 7 hari dalam seminggu tanpa berhenti.

4. Sumber Energi Bersih

PLTP dengan sistem *closed loop* saat ini tidak menimbulkan gas rumah kaca sama sekali. Siklus emisi GHG 50g CO₂/kWh yang mana 4 kali lebih sedikit dibandingkan PLTS, dan 20 kali lebih sedikit dibandingkan natural gas. PLTP rata-rata mengkonsumsi air lebih sedikit pada setiap 10 energi yang dihasilkan dibandingkan dengan kebanyakan teknologi penghasil listrik yang lain.

2.3 Penggunaan *Open Loop System* pada Sumur Panas Bumi

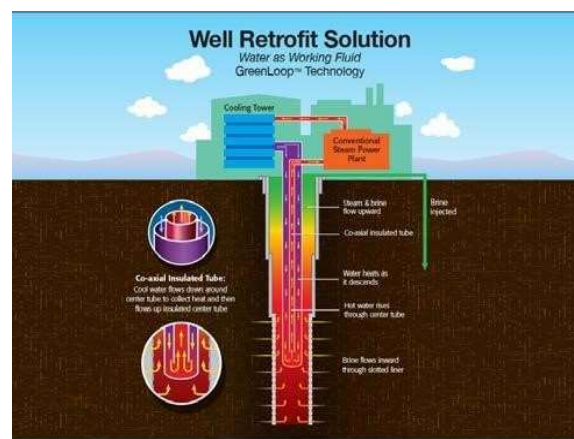
Sistem *open loop* (konvensional) memanfaatkan energi panas bumi dengan mengambil fluida geotermal—uap atau air panas—langsung dari reservoir bawah permukaan. Fluida ini dialirkan ke permukaan untuk menggerakkan turbin yang terhubung ke generator sehingga menghasilkan listrik. Setelah panasnya dimanfaatkan, fluida diinjeksikan kembali melalui sumur terpisah guna menjaga keberlanjutan pasokan dan tekanan reservoir. Meski efektif, pendekatan ini menghadapi kendala berupa korosi dan pembentukan kerak (*scaling*) akibat sifat kimia fluida, serta potensi pelepasan gas berbahaya ke lingkungan.

2.4 Penggunaan *Closed Loop System* pada Sumur Panas Bumi

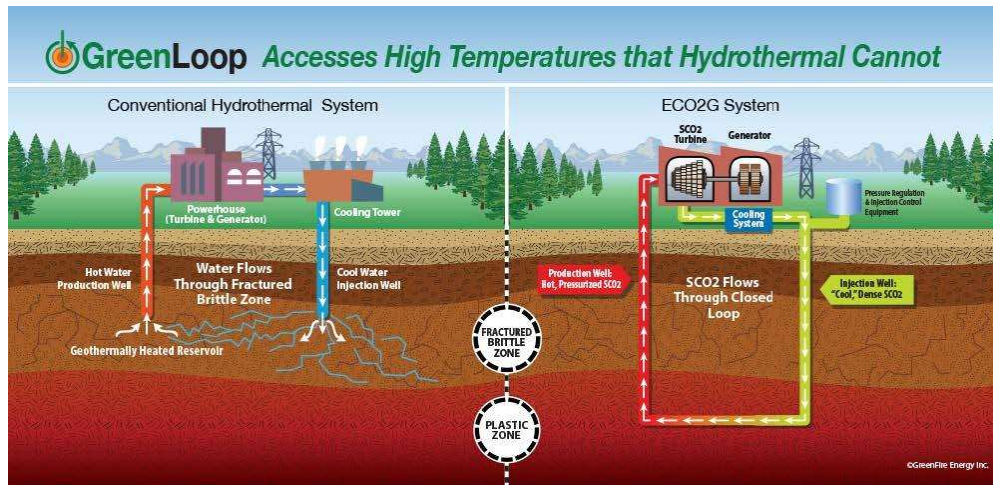
Sistem panas bumi umumnya dibagi menjadi *open loop* dan *closed loop* (Wang Song, 2020). Berbeda dari sistem konvensional yang bergantung pada permeabilitas batuan, *closed loop* memindahkan panas melalui sirkuit tertutup. Fluida kerja disirkulasikan di dalam rangkaian pipa—misalnya u-loop atau koaksial—untuk menyerap panas dari batuan dan kemudian kembali ke permukaan untuk dimanfaatkan dalam pembangkitan listrik. (Beckers dkk., 2022)

Pada konfigurasi sumurnya, *closed loop* umumnya menggunakan pipa konsentris yang dilengkapi *vacuum insulated tubing* (VIT) sehingga panas dari formasi ditransfer terutama lewat konduksi ke fluida di dalam sumur. Kemajuan teknologi industri minyak dan gas memungkinkan pengeboran sangat dalam (hingga >9.750 m), beroperasi pada suhu hingga 500°F (260°C) dan tekanan 30.000 psi, serta penerapan sumur berarah dan multi-lateral untuk memperluas area kontak panas. (Muir, 2020)

Secara keseluruhan, *closed loop* menawarkan sumber energi yang bersih, berkelanjutan, dan efisien, membantu menurunkan emisi gas rumah kaca serta menyediakan pilihan energi terbarukan yang aman dan kompetitif secara biaya. Gambar 2.2 menampilkan skema pergerakan fluida pada sumur panas bumi, yang mengilustrasikan cara kerja sistem ini dalam memanfaatkan energi panas bumi secara efisien. Dengan dampak lingkungan yang lebih rendah, sistem ini berpotensi mendukung pemenuhan kebutuhan energi global secara lebih ramah lingkungan.



Gambar 2. 2 Skema pergerakan fluida pada sumur panas bumi (Sumber:Green Fire Energy)



Gambar 2. 3 Perbedaan *closed loop* dan *open loop* geothermal system
(Sumber:Green Fire Energy)

Dalam sistem *closed loop*, fluida kerja yang digunakan—biasanya berupa air atau campuran dengan *antifreeze*—mengalir di dalam jaringan pipa tertutup yang ditanam di dalam tanah atau perairan. Fluida ini tidak pernah bersentuhan langsung dengan tanah maupun air tanah. Panas bumi ditransfer melalui konduksi dari tanah menuju pipa, lalu diserap oleh fluida kerja untuk kemudian dimanfaatkan. Karena bersifat tertutup, sistem ini relatif lebih aman, tidak mencemari lingkungan, dan dapat beroperasi stabil dalam jangka panjang, meskipun efisiensinya bisa sedikit lebih rendah dibandingkan sistem terbuka.

Sementara itu, pada sistem *open loop*, sumber air tanah digunakan secara langsung sebagai fluida kerja. Air dipompa dari akuifer atau sumur, dialirkan melalui heat pump untuk mengambil panasnya, lalu dibuang kembali ke tanah atau ke badan air lainnya. Cara ini umumnya lebih efisien karena memanfaatkan suhu air tanah yang konstan. Namun, *open loop* memiliki tantangan berupa potensi dampak lingkungan, seperti risiko kontaminasi atau penurunan muka air tanah, serta memerlukan izin dan pengawasan yang lebih ketat.

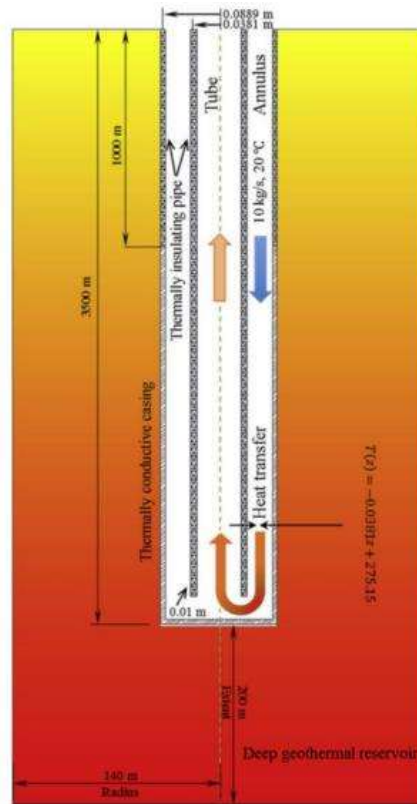
2.5 Modeling Borehole Heat Exchanger

Peneliti menggunakan pemodelan borehole heat exchanger untuk menggambarkan kondisi sumur dan fenomena yang terjadi di dalam sistem. Mereka memanfaatkan berbagai perangkat lunak guna menganalisis perpindahan panas dan aliran, sehingga hasilnya mendekati kondisi nyata di lapangan. Peneliti memilih model reservoir berdasarkan karakteristiknya, apakah bersifat konvektif atau konduktif, karena karakteristik tersebut memengaruhi kinerja perpindahan panas.

2.5.1 Penelitian Tentang Pengaruh Sifat Termal Material Terhadap Performa *Borehole Heat Exchanger* Dengan Metode Simulasi Numerik

Penelitian ini mengevaluasi kinerja perpindahan panas pada sumur minyak nonaktif di Western Canadian Basin. Simulasi numerik dilakukan dengan COMSOL Multiphysics dan divalidasi menggunakan Persamaan Ramey. Dalam pemodelan, batuan formasi diasumsikan homogen. Ukuran geometri yang dipakai meliputi jari-jari casing borehole heat exchanger 0,1778 m (7 inci) dan diameter pipa berinsulasi 0,0762 m (3 inci).

Peneliti juga berasumsi tidak ada aliran fluida dari reservoir ke permukaan sehingga sumber panas murni berasal dari batuan di sekitar casing. Air murni (H₂O) digunakan sebagai fluida kerja. Skema dan pendekatan model mengacu pada Hu, Banks, Wu, dan Liu (2020), sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 4 Skema pergerakan fluida pada sumur panas bumi (Sumber:Green Fire Energy)

2.5.2 Penelitian Tentang Pengaruh Variasi Diameter *Inner Pipe* pada *Borehole Heat Exchanger* Dengan Transfer Kalor

Pada penelitian ini dilakukan analisa terkait peningkatan permorma transfer calor pada borehole heat exchanger sumur panas bumi dengan variasi diameter *inner pipe*. Tujuan variasi diameter *inner pipe* adalah untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas. Diameter *inner pipe* pada *borehole heat exchanger* (BHE) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai transfer kalor dan efisiensi termal sistem. Peningkatan diameter pipa cenderung meningkatkan laju aliran fluida, yang dapat menurunkan resistansi termal antara fluida kerja dan dinding pipa, sehingga meningkatkan kapasitas transfer kalor (Pan dkk., 2020).

Namun, diameter yang lebih besar juga dapat mengurangi kecepatan aliran fluida, yang berpotensi menurunkan turbulensi dan mengurangi efisiensi perpindahan panas konvektif di dalam pipa. Sebaliknya, jika diameter pipa lebih

kecil, kecepatan fluida meningkat, menciptakan kondisi aliran turbulen yang lebih baik untuk perpindahan panas. Efisiensi termal sistem sangat bergantung pada keseimbangan antara minimisasi resistansi termal dan optimalisasi laju aliran fluida. Oleh karena itu, pemilihan diameter *inner pipe* yang tepat harus mempertimbangkan aspek perpindahan panas guna mencapai kinerja optimal dari sistem *borehole heat exchanger*.

2.5.3 Penelitian Tentang Pengaruh Variasi Diameter *Inner Pipe* pada Borehole Heat Exchanger Dengan Nilai Pressure Drop

Penelitian ini menganalisis hubungan pengaruh diameter *inner pipe* pada borehole heat exchanger dengan nilai pressure drop. Diameter *inner pipe* pada *borehole heat exchanger* (BHE) memiliki pengaruh langsung terhadap nilai *pressure drop* dalam sistem. Jika diameter pipa lebih kecil, kecepatan aliran fluida akan meningkat, menyebabkan gesekan yang lebih besar dengan dinding pipa, sehingga meningkatkan *pressure drop*. Peningkatan *pressure drop* ini mengakibatkan kebutuhan daya pompa yang lebih tinggi untuk mempertahankan laju aliran fluida yang diinginkan. Sebaliknya, jika diameter pipa lebih besar, luas penampang aliran bertambah, yang menurunkan kecepatan fluida dan mengurangi gesekan, sehingga *pressure drop* menjadi lebih kecil (Chen & Tomac, 2023). Meskipun *pressure drop* yang lebih rendah dapat mengurangi konsumsi energi pompa, diameter pipa yang terlalu besar juga dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas akibat berkurangnya turbulensi. Oleh karena itu, pemilihan diameter *inner pipe* harus mempertimbangkan keseimbangan antara *pressure drop* dan efisiensi perpindahan panas agar sistem bekerja secara optimal.

2.6 Pemilihan Fluida Kerja Organik

Pemilihan fluida kerja yang tepat sangat krusial untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber panas bersuhu rendah hingga menengah, karena kinerja dan keandalan sistem bergantung pada kecocokan fluida dengan kondisi operasi yang ditargetkan. Penentuan fluida perlu evaluasi menyeluruh atas sifat