



SURAT TUGAS

Nomor : 337/C-4/FTKE/USAKTI/II/2025

Dasar : Surat Tugas Program Studi Teknik Perminyakan

Dekan Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti

MENUGASKAN

Kepada : Prayang Sunny Yulia, S.T., M.T.
Sebagai : Dosen-Pembina
Untuk : Pembuatan Bahan Ajar "Modul Teknik Produksi Panas Bumi"
Hari/Tanggal : 01 Januari 2025 s.d 31 Januari 2025
Pukul : -
Tempat : Universitas Trisakti
Tingkat : Lokal

Demikian Surat Tugas ini untuk dilaksanakan dengan seksama dan penuh tanggung jawab serta melaporkan hasilnya kepada Dekan Fakultas Teknologi Kebumihan dan Energi Universitas Trisakti.

Apabila dikemudian hari terdapat kekeliruan atau kesalahan dalam Surat Tugas ini, akan diubah dan diperbaiki sebagaimana mestinya.

Jakarta, 6 Januari 2025
Dekan



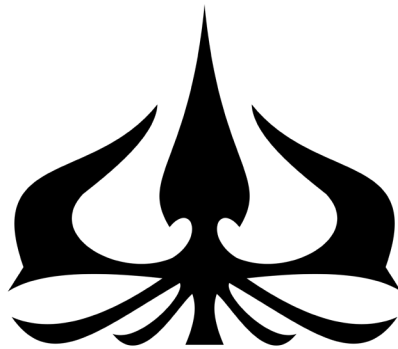
Ditandatangani secara elektronik oleh
Dr. Ir. Suryo Prakoso, S.T., M.T.
NIK 2907/USAKTI

Dr. Ir. Suryo Prakoso, S.T., M.T.
NIK : 2907/USAKTI

**MODUL MATA KULIAH
TEKNIK PRODUKSI PANAS BUMI**

OLEH:

PRAYANG SUNNY YULIA, S.T., M.T.



UNIVERSITAS TRISAKTI

**PROGRAM STUDI TEKNIK PERMINYAKAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KEBUMIHAN DAN ENERGI
UNIVERSITAS TRISAKTI
JAKARTA
2025**

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur serta terima kasih kepada Allah Subhaanahu Wata'ala atas berkat dan karunia-Nya lah sehingga Modul penuntun “Praktikum Analisa Batuan Reservoir” ini dapat selesai dengan baik dan tepat waktu.

Tujuan dari penulisan buku ini adalah agar mahasiswa dapat memahami dan mengerti tentang sifat dan karakteristik daripada batuan dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam penulisan buku ini masih banyak kekurangan, karena keterbatasan pengetahuan dan kemampuan, untuk itu kritik dan saran sangat diharapkan demi kesempurnaan buku ini. Dengan adanya buku ini diharapkan agar buku ini dapat menjadi penuntun untuk mahasiswa maupun pihak - pihak umum yang ingin belajar tentang analisa batuan reservoir.

Jakarta, Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL.....	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR	v
BAB I PERALATAN LOGGING	1
BAB II FASILITAS PRODUKSI UAP	5
BAB III DESAIN SEPARATOR	8
BAB IV TEKNOLOGI PEMBERSIHAN UAP	11
BAB V FASILITAS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI	13
BAB VI POLA ALIRAN FLUIDA GEOTHERMAL	16
BAB VII KEHILANGAN TEKANAN PADA PEMIPAAN DI PERMUKAAN.....	19
BAB VIII PEMODELAN SUMUR.....	22
BAB IX ASPEK LINGKUNGAN.....	25
BAB X ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS).....	28
BAB XI CO ₂ PLUME GEOTHERMAL.....	31
DAFTAR PUSTAKA.....	34

DAFTAR TABEL

Tabel 1. 1 Jenis Logging dan Fungsinya.....	4
Tabel 6. 1 Pola Aliran dan Kualitas Uap.....	16

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Go Devil Logging	1
Gambar 1. 2 Caliper Logging	2
Gambar 1. 3 Sipnner	3
Gambar 2. 1 Well Head	6
Gambar 3. 1 Vertical Cyclone Separator.....	9
Gambar 5 1 Surface-type Condensor	14
Gambar 6.1. Pola Aliran Fluida.....	17
Gambar 10. 1. Skema EGS	28
Gambar 11. 1 Skema CPG	32

BAB I

PERALATAN LOGGING

Pengantar

Logging adalah kegiatan pengukuran kondisi sumur panas bumi setelah pengeboran. Tujuannya untuk memperoleh data kondisi lubang sumur, kondisi casing, distribusi tekanan, temperatur, serta potensi produksi sumur. Data-data ini sangat penting untuk perencanaan produksi dan pemeliharaan sumur panas bumi agar operasi berjalan aman dan efisien.

Jenis Peralatan Logging

1. Go-Devil Logging

- Alat dummy survey berupa logam berat.
- Digunakan untuk mendeteksi:
 - Maximum Clear Depth (MCD)
 - Lokasi hambatan di dalam sumur.

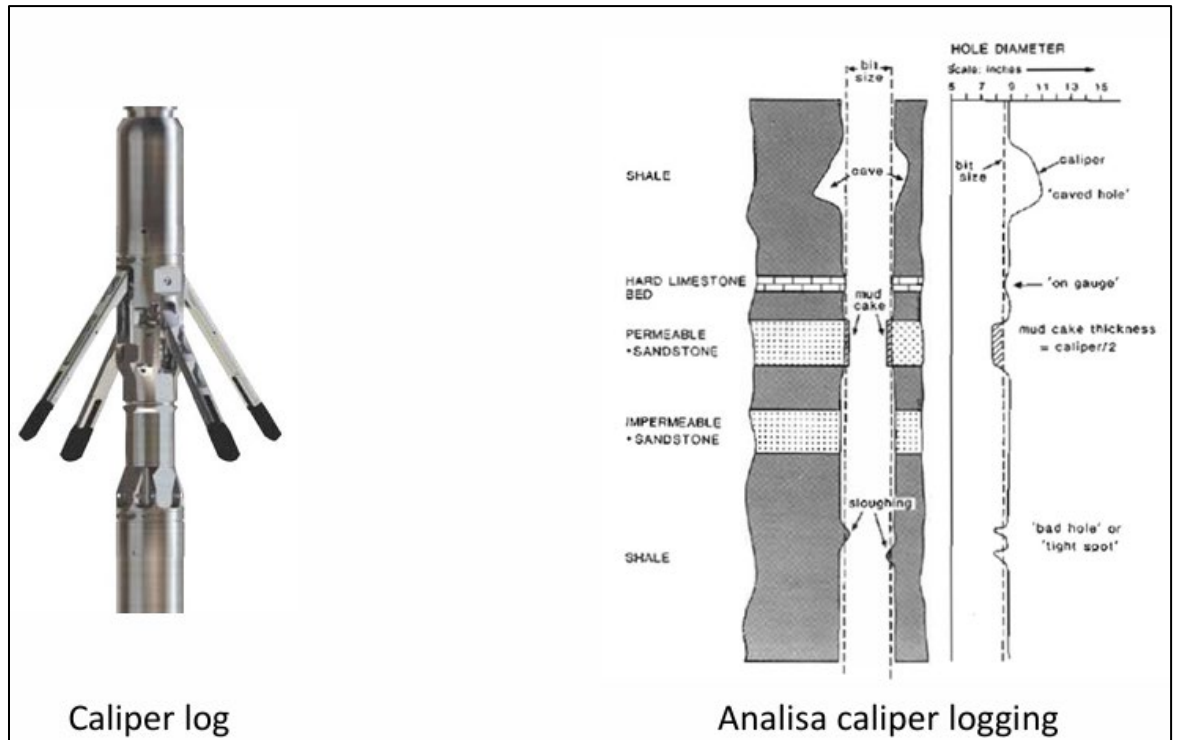


Gambar 1.1. Go Devil Logging

2. Caliper Logging

- Mengukur diameter lubang sumur secara vertikal.
- Penting untuk mendeteksi deformasi casing akibat:

- Korosi
- Deposisi mineral
- Scaling



Gambar 1.2. Caliper Logging

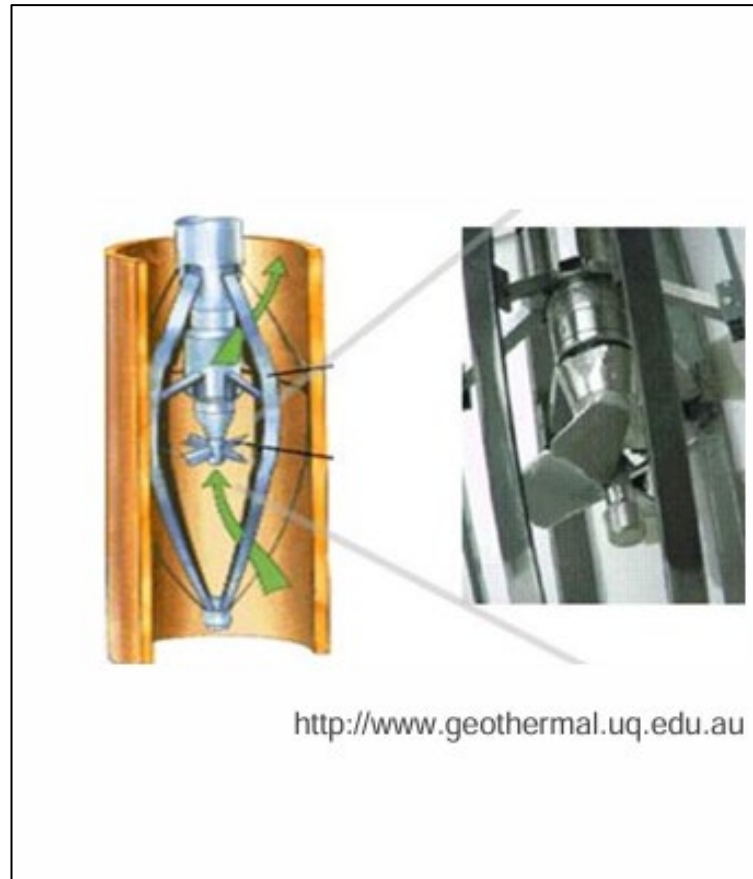
3. PT Logging (Pressure-Temperature Logging)

- Mengukur tekanan (Pressure) dan temperatur (Temperature) di sepanjang lubang sumur.
- Data profil P&T sangat penting:
 - Menentukan kondisi reservoir
 - Mengevaluasi zona produktif
 - Mengetahui kondisi operasi sumur

4. PTS Logging (Pressure-Temperature-Spinner Logging)

- Alat spinner digunakan untuk:
 - Mengukur kecepatan fluida di dalam sumur
 - Mendapatkan data flow rate

- Mendeteksi interzonal flow
- Mengidentifikasi zona kehilangan fluida



Gambar 1.3. Spinner

5. Downhole Sampling (DHS)

- Alat ini mengambil sampel fluida di kedalaman tertentu.
- Data kimia sangat penting:
 - Mendeteksi komposisi fluida
 - Analisis scaling potensial
 - Identifikasi kandungan gas berbahaya seperti H_2S

Teknologi Logging Modern

- Alat modern dapat bekerja pada suhu hingga 350 °C.
- Sistem e-line memungkinkan data logging dikirim secara real-time ke permukaan.

- Penggunaan Dewar Flask melindungi elektronik logging dari kerusakan suhu tinggi.

Tabel 1.1. Jenis Logging dan Fungsinya

Jenis Logging	Fungsi Utama
Go-Devil Logging	Dummy survey, cek hambatan di lubang sumur
Caliper Logging	Ukur diameter lubang sumur, deteksi deformasi casing
PT Logging	Profil tekanan & temperatur sumur
PTS Logging	Profil tekanan, temperatur, laju aliran (flow rate)
Downhole Sampling	Pengambilan sampel fluida di kedalaman tertentu

BAB II

FASILITAS PRODUKSI UAP

Pengantar

Pada sistem panas bumi, setelah fluida panas bumi berhasil diproduksi dari sumur, langkah berikutnya adalah mengolah fluida tersebut di permukaan agar menjadi energi listrik. Rangkaian fasilitas di permukaan ini disebut **Steam Above Ground System (SAGS)**.

SAGS memiliki fungsi utama:

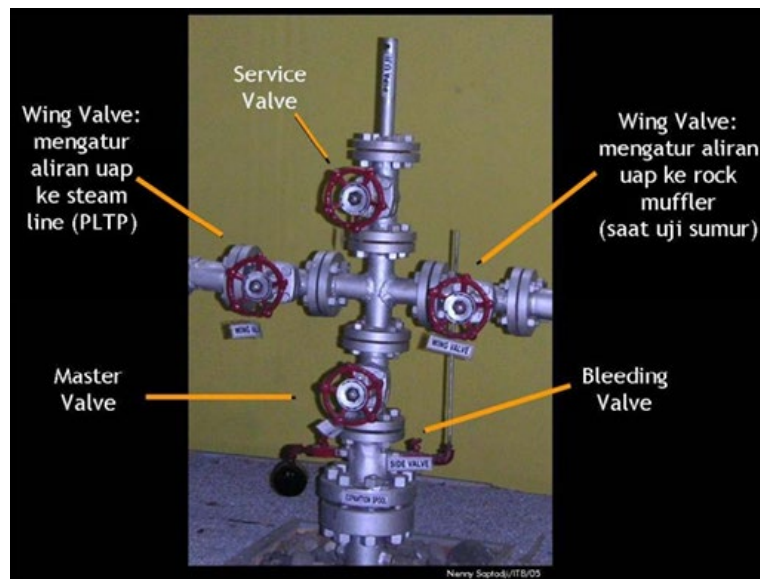
- Mengumpulkan fluida dari sumur-sumur produksi
- Memisahkan fase cair (brine) dan fase gas (uap)
- Mengalirkan uap kering ke turbin
- Membuang atau menginjeksi brine ke dalam sumur injeksi

Keandalan SAGS sangat berpengaruh terhadap kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi.

Komponen Wellhead

Wellhead adalah titik sambungan antara sumur produksi dengan fasilitas permukaan. Beberapa komponen penting pada wellhead antara lain:

- Master Valve
→ Katup utama untuk membuka atau menutup sumur secara total.
- Service Valve
→ Katup yang berfungsi mengatur laju aliran fluida dari sumur ke separator.
- Bypass Valve
→ Digunakan untuk mengalirkan fluida langsung ke silencer saat kondisi darurat atau uji sumur.
- Bleed Valve
→ Digunakan melepaskan sedikit tekanan gas agar sumur tetap dalam kondisi panas saat shut-in.



Gambar 2.1. Well Head

Anchor Casing

- **Anchor casing** adalah bagian casing (pipa) yang terdapat di permukaan hingga beberapa meter di bawah tanah.
- Tidak disemen penuh agar mampu menahan ekspansi pipa akibat perubahan temperatur.
- Harus tahan terhadap korosi karena kontak langsung dengan fluida panas bumi yang mengandung H_2S , CO_2 , atau komponen korosif lainnya.

Rumus menghitung ketebalan anchor casing:

$$t = \frac{P \times D}{2 \times \sigma_f}$$

Keterangan:

- t = ketebalan minimum pipa (mm atau inch)
- P = tekanan kerja maksimum (MPa atau psi)
- D = diameter luar pipa (mm atau inchi)
- σ_f = tegangan operasi (MPa atau psi)

Silencer

- Silencer adalah peralatan untuk meredam kebisingan yang terjadi saat uap geothermal dibuang ke atmosfer, misalnya saat uji produksi.
- Bunyi uap panas bumi yang dibuang ke udara dapat mencapai **120 dB**, setara suara jet engine.
- Silencer mampu menurunkan kebisingan menjadi di bawah 85 dB agar tidak melanggar standar kebisingan lingkungan.

Fungsi SAGS Lainnya

Selain memisahkan uap dan brine, SAGS juga bertugas:

- Menangani masalah korosi dengan menggunakan pipa yang sesuai standar ASTM A335 P22.
- Menghindari erosi akibat kecepatan aliran fluida yang tinggi.
- Menyediakan titik sampling untuk analisis kimia fluida panas bumi.

BAB III

DESAIN SEPARATOR

Pengantar

Salah satu komponen paling penting dalam fasilitas permukaan panas bumi adalah separator. Separator digunakan untuk memisahkan fluida panas bumi dua fasa (cair dan uap). Tujuan utama pemisahan ini adalah agar uap kering yang bebas dari droplets air dapat masuk ke turbin uap pembangkit listrik.

Jika uap masih mengandung droplets cairan, maka:

- Turbin akan mengalami erosi pada sudu (blade)
- Efisiensi pembangkit listrik turun
- Peralatan cepat aus atau rusak

Fungsi Separator

- Memisahkan uap jenuh (saturated steam) dari cairan panas bumi (brine)
- Menghindari kerusakan turbin akibat droplet air
- Mengontrol kondisi tekanan dan temperatur fluida sebelum masuk ke turbin

Jenis Separator

Ada dua jenis separator yang paling umum digunakan di sistem panas bumi, yaitu:

1. Vertical Cyclone Separator

- Fluida panas bumi masuk separator dengan kecepatan tinggi secara tangensial.
- Gaya sentrifugal memisahkan cairan ke dinding separator, sedangkan uap naik ke atas.
- Efisiensi sangat tinggi ($\geq 99.9\%$).
- Cocok digunakan untuk debit fluida besar.
- Ukuran separator relatif lebih ramping dibanding horizontal separator.



Gambar 3.1. Vertical Cyclone Separator

2. Horizontal Separator

- Pemisahan fluida terjadi secara gravitasi.
- Brine jatuh ke dasar separator, sedangkan uap mengalir di atas permukaan cairan.
- Digunakan pada sistem panas bumi berbasis teknologi Russia/Iceland.
- Tidak seefisien cyclone separator untuk aliran fluida sangat besar.

Parameter Desain Separator

Beberapa parameter penting yang harus diperhitungkan dalam mendesain separator:

- **Tekanan Separator**
Tekanan pemisahan mempengaruhi temperatur jenuh (saturation temperature). Semakin tinggi tekanan, semakin tinggi temperatur saturasi uap.
- **Holding Time**
Waktu yang diperlukan cairan untuk mengendap sebelum keluar separator.
- **Terminal Velocity (V_t)**
Kecepatan di mana droplet cairan jatuh ke bawah akibat gravitasi, harus lebih tinggi daripada kecepatan fluida ke atas agar pemisahan efektif.

Rumus kecepatan terminal (contoh pendekatan Stokes):

$$V_t = \frac{(\rho_L - \rho_V) \times g \times D}{18 \times \mu_L}$$

Keterangan:

- V_t = kecepatan terminal (m/s)
- ρ_L = densitas cairan (kg/m³)
- ρ_V = densitas uap (kg/m³)
- g = percepatan gravitasi (9.81 m/s²)
- D = diameter droplet (m)
- μ_L = viskositas dinamik cairan (Pa.s)
-

Pengendalian Scaling

- Salah satu masalah terbesar separator adalah terjadinya **silica scaling**.
- Jika tekanan separator terlalu rendah, kandungan silica akan mengendap, menyumbat pipa, dan mengurangi efisiensi sistem.
- Karena itu tekanan separator diatur pada kondisi optimum agar silica tetap larut dalam brine.

BAB IV

TEKNOLOGI PEMBERSIHAN UAP

Pengantar

Uap yang dihasilkan dari sumur panas bumi tidak murni. Selain mengandung uap air, ia juga membawa berbagai kotoran padat (solid particles), gas non-condensable (NCG), dan senyawa kimia yang bisa merusak peralatan turbin dan kondensor. Oleh sebab itu, perlu dilakukan teknologi pembersihan uap agar uap yang masuk ke turbin berkualitas tinggi.

Tantangan dalam Pembersihan Uap

Beberapa masalah yang sering muncul akibat uap panas bumi adalah:

- **Silica Spitballs** → Silika mengendap dalam bentuk partikel padat yang bisa menyumbat jalur uap.
- **Gas Non-Condensable (NCG)** seperti CO_2 , H_2S → Menurunkan efisiensi kondensor.
- **Korosi** → Gas asam seperti HCl menyebabkan korosi pada pipa dan turbin.
- **Kontaminasi logam berat** → Fluida panas bumi kadang mengandung boron, arsenic, merkuri.

Steam Washing

Salah satu teknologi paling banyak digunakan adalah Steam Washing atau pencucian uap.

- Cara kerjanya: uap jenuh yang keluar separator disemprot dengan air bersih sebelum dialirkan ke turbin.
- Fungsi:
 - Mengendapkan partikel padat
 - Mengurangi carry-over impurities
- Air untuk washing harus bebas:
 - Silika
 - Oksigen
 - Partikel solid

Jika air pencuci mengandung oksigen, justru akan menimbulkan pitting corrosion pada peralatan baja.

Penggunaan Inhibitor Kimia

- **Amines**
Digunakan sebagai inhibitor korosi pada sistem steam di bawah 200°C.
Fungsinya membentuk lapisan pelindung pada permukaan logam.
- **Soda Api (NaOH)**
Digunakan untuk mengontrol pH uap agar tidak terlalu asam akibat gas HCl.

Penggunaan inhibitor harus dikontrol agar tidak menimbulkan kontaminasi lingkungan.

Crystallizer-Clarifier

Teknologi lain yang mulai banyak digunakan adalah crystallizer-clarifier untuk menangani scaling.

- Fungsinya memisahkan:
 - Iron silicate
 - Barite
 - Fluorite
- Fluida panas bumi dialirkan ke tangki crystallizer, di mana sebagian solid terendapkan. Cairan jernih kemudian dipisahkan melalui clarifier.

Teknologi ini cukup mahal tetapi efektif mengurangi risiko scaling di jalur pipa dan peralatan pembangkit.

BAB V

FASILITAS PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PANAS BUMI

Pengantar

Tujuan utama teknologi panas bumi adalah mengubah energi panas bumi menjadi energi listrik. Proses ini terjadi di fasilitas pembangkit listrik tenaga panas bumi (Geothermal Power Plant). Komponen utama pembangkit mencakup:

- Turbin uap
- Generator
- Kondensor
- Cooling tower
- Sistem pengolah gas non-kondensable (NCG)

Keandalan setiap komponen sangat berpengaruh pada efisiensi pembangkitan listrik.

Turbin Uap

Turbin berfungsi mengubah energi panas (enthalpy uap) menjadi energi mekanik rotasi yang kemudian memutar generator.

- Prinsip kerja turbin panas bumi isentropik (idealnya tanpa kehilangan energi).
- Namun, kenyataannya selalu ada kehilangan energi akibat gesekan, kebocoran uap, dan lain-lain.
- Efisiensi isentropik turbin didefinisikan sebagai:

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}}$$

Keterangan:

- η = efisiensi isentropik
- h = enthalpy

Generator

- Mengubah energi mekanik turbin menjadi listrik.
- Harus dirancang tahan kondisi lingkungan panas bumi:
 - Suhu tinggi
 - Kelembaban tinggi
 - Potensi gas korosif

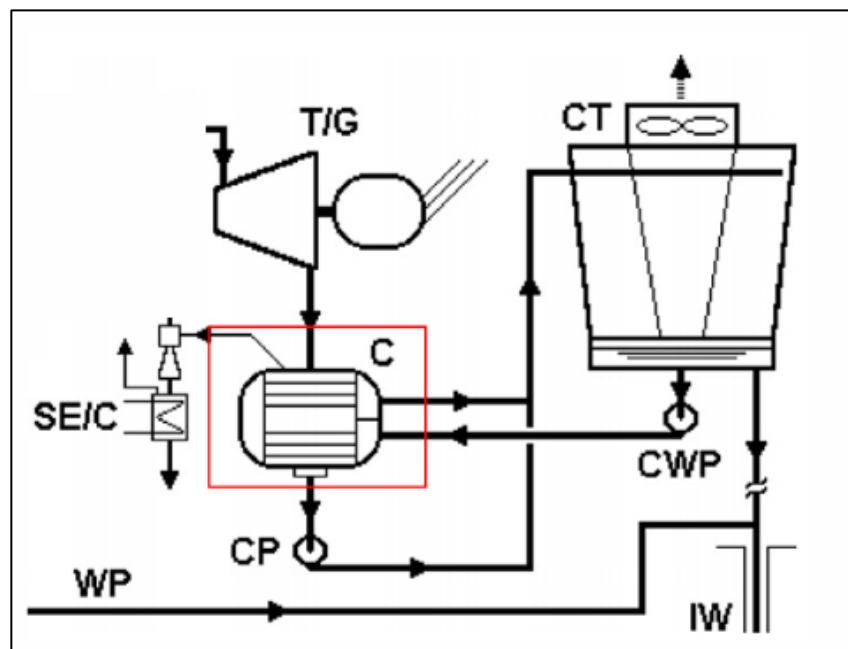
Kondensor

Kondensor berfungsi mengubah uap bekas turbin kembali menjadi air (kondensat), agar dapat:

- Menjaga vacuum pada sisi keluaran turbin
- Meningkatkan efisiensi turbin
- Mempermudah penanganan air kondensat

Surface Condenser sering digunakan karena memisahkan fluida pendingin dengan uap geothermal, sehingga:

- Tidak terjadi kontaminasi
- Brine geothermal tetap bisa diinjeksikan



Gambar 5.1. Surface-type Condenser

Cooling Tower

- Digunakan untuk mendinginkan air kondensat atau air pendingin kondensor.
- Dua jenis:
 - **Mechanical Draft Cooling Tower** → dilengkapi kipas mekanik.
 - **Natural Draft Cooling Tower** → memanfaatkan aliran udara alami (menara hyperbolic).

Cooling tower sangat penting menjaga suhu air pendingin agar proses kondensasi berjalan efisien.

Gas Extractor (NCG System)

Geothermal steam sering mengandung gas non-condensable (NCG) seperti CO₂, H₂S, metana.

- NCG mengurangi vacuum di kondensor → menurunkan efisiensi turbin.
- Digunakan gas extractor (vacuum pump atau steam ejector) untuk mengeluarkan gas ini.

Gas-gas NCG kemudian:

- Dibuang ke atmosfer (dengan batas emisi tertentu)
- Atau diolah lebih lanjut demi mengurangi dampak lingkungan

BAB VI

POLA ALIRAN FLUIDA GEOTHERMAL

Pengantar

Fluida panas bumi yang keluar dari sumur biasanya dua fasa (uap dan cairan) dengan kondisi tekanan dan temperatur tinggi. Pola aliran fluida sangat memengaruhi perancangan sistem pemipaan karena berdampak pada:

- Pressure drop (penurunan tekanan)
- Vibrasi pipa
- Risiko erosi pipa
- Efisiensi transportasi energi

Pola aliran fluida geothermal sangat mirip pola aliran fluida dua fasa pada industri minyak dan gas.

Pola Aliran Vertikal

Pada pipa vertikal, pola aliran fluida geothermal umumnya terbagi sebagai berikut:

Tabel 6.1. Pola Aliran dan Kualitas Uap

Pola Aliran	Kualitas Uap (x)
Bubbly	0.0 – 0.02
Slug	0.02 – 0.2
Churn	~0.1
Annular	> 0.1

- **Bubbly Flow** → gelembung uap tersebar dalam cairan. Terjadi saat kualitas uap sangat rendah.
- **Slug Flow** → gelembung besar uap terbentuk bergantian dengan plug cairan.
- **Churn Flow** → aliran campur aduk, terjadi pada perubahan dari slug ke annular.
- **Annular Flow** → lapisan cairan tipis di dinding pipa, uap mengalir kencang di tengah pipa.

Pola Aliran Horizontal

Pada pipa horizontal, pola aliran fluida juga berbeda, misalnya:

- Stratified Flow → cairan mengalir di dasar pipa, uap di bagian atas.
- Slug Flow → paling dihindari karena:
 - Menyebabkan water hammer (tekanan mendadak)
 - Berpotensi merusak pipa
- Annular Flow → kondisi di mana uap tinggi kualitasnya, cairan hanya tipis melekat pada dinding pipa.

Superficial Velocity

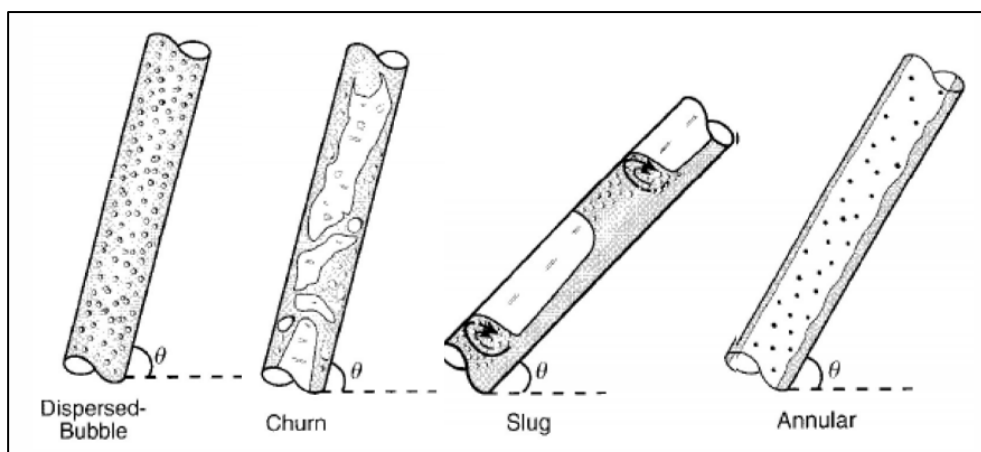
Kecepatan fluida **seolah-olah** seluruh pipa diisi hanya oleh salah satu fasa (liquid atau gas) disebut **superficial velocity** (v_s):

$$v_s = \frac{Q}{A}$$

Keterangan:

- v_s = superficial velocity (m/s)
- Q = laju aliran volumetrik (m^3/s)
- A = luas penampang pipa (m^2)

Konsep superficial velocity digunakan untuk menghitung pressure drop dan menentukan pola aliran yang terjadi.



Gambar 4.1. Pola Aliran Fluida

Pengendalian Pola Aliran

- Slug flow perlu dihindari dengan:
 - Mendesain diameter pipa lebih besar
 - Menaikkan kecepatan fluida untuk menghindari terbentuknya slug
- Sistem pemipaan geothermal harus dirancang agar tekanan tetap di atas tekanan jenuh untuk mencegah flashing tiba-tiba yang bisa memicu slug flow.

BAB VII

KEHILANGAN TEKANAN PADA PEMIPAAN DI PERMUKAAN

Pengantar

Fluida panas bumi mengalir dari sumur menuju fasilitas pembangkit listrik melalui jaringan pipa permukaan. Dalam perjalanan ini, terjadi kehilangan tekanan (pressure drop) yang harus diperhitungkan agar desain sistem pemipaan aman dan efisien.

Jika pressure drop terlalu besar:

- Fluida mungkin mengalami flashing mendadak
- Debit uap ke turbin menurun
- Efisiensi sistem turun
- Potensi erosi pada pipa meningkat

Faktor Penyebab Kehilangan Tekanan

Kehilangan tekanan pada sistem pemipaan panas bumi disebabkan oleh beberapa faktor:

- Gesekan antara fluida dan dinding pipa
- Perubahan arah aliran (elbow, tee, reducer)
- Perubahan elevasi pipa (head loss)
- Aliran dua fasa (steam-water) yang lebih kompleks dibanding aliran satu fasa

Perhitungan Kehilangan Tekanan – Single Phase

Untuk aliran **satu fasa**, pressure drop di pipa dihitung dengan persamaan Darcy-Weisbach:

$$\frac{dP}{dL} = \frac{f \times \rho \times v^2}{2 \times D}$$

Keterangan:

- dP/dL = kehilangan tekanan per satuan panjang (Pa/m)
- f = faktor gesekan Darcy
- ρ = densitas fluida (kg/m³)
- v^2 = kecepatan aliran fluida (m/s)
- D = diameter dalam pipa (m)

Perhitungan Kehilangan Tekanan – Two Phase

Pada aliran **dua fasa** (uap dan cairan), perhitungan lebih kompleks karena melibatkan interaksi dua fluida yang berbeda densitasnya. Digunakan metode koreksi, salah satunya Lockhart-Martinelli correlation:

$$\Delta P_{TP} = \phi^2 \times \Delta P_{single}$$

- ΔP_{TP} = pressure drop two-phase
- ϕ^2 = faktor koreksi untuk aliran dua fasa
- ΔP_{single} = pressure drop satu fasa (cair atau gas)

Metode Populer

Beberapa metode yang sering digunakan dalam menghitung pressure drop aliran dua fasa pada pipa geothermal:

1. **Hagedorn & Brown**
 - Cocok untuk sumur geothermal karena mempertimbangkan perubahan densitas fluida dengan kedalaman.
2. **Beggs & Brill**
 - Banyak digunakan pada industri minyak-gas dan geothermal. Memperhitungkan berbagai pola aliran.
3. **Duns & Ros**
 - Dirancang khusus untuk vertical wells. Berguna memprediksi tekanan dalam casing sumur.

Pengendalian Kehilangan Tekanan

Beberapa cara untuk meminimalkan pressure drop dalam sistem geothermal:

- Memilih diameter pipa optimal agar kecepatan fluida tidak terlalu tinggi.
- Mengurangi jumlah belokan atau sambungan pipa.
- Menjaga aliran dalam pola yang stabil (hindari slug flow).
- Menghindari flashing mendadak dengan kontrol tekanan yang baik.

Pentingnya Perhitungan Pressure Drop

Desain sistem pemipaan harus memastikan:

- Tekanan fluida tetap di atas tekanan saturasi → mencegah flashing prematur.

- Energi panas bumi tersalurkan maksimal ke turbin.
- Sistem tetap aman tanpa risiko overpressure atau erosi pipa.

BAB VIII

PEMODELAN SUMUR

Pengantar

Sumur panas bumi adalah sarana utama untuk menyalurkan energi panas bumi dari reservoir ke permukaan. Agar pengoperasian sumur efisien dan aman, perlu dilakukan pemodelan sumur (well modeling) untuk memprediksi kinerja sumur dalam kondisi operasi tertentu.

Pemodelan sumur membantu:

- Merencanakan operasi produksi sumur
- Memprediksi debit uap (steam flow rate)
- Memastikan tekanan operasi aman
- Mengoptimasi desain fasilitas permukaan

Tujuan Pemodelan Sumur

Beberapa tujuan penting pemodelan sumur panas bumi:

- Membuat profil tekanan (Pressure Profile) dari reservoir ke wellhead.
- Menentukan profil temperatur (Temperature Profile) sepanjang sumur.
- Menghitung debit fluida yang dapat diproduksi secara stabil.
- Memprediksi pola aliran fluida di dalam sumur.
- Menghitung kehilangan tekanan (pressure drop) di sumur.
- Memprediksi risiko flashing di dalam sumur.

Komponen Data yang Dibutuhkan

Untuk membuat model sumur, diperlukan data-data berikut:

- **Data Reservoir**
 - Tekanan reservoir
 - Temperatur reservoir
 - Kedalaman reservoir
 - Permeabilitas batuan
- **Data Sumur**
 - Diameter casing & tubing
 - Data casing program

- Data log tekanan & temperatur
- Data aliran fluida
- **Data Fluida**
 - Komposisi fluida
 - Massa jenis (densitas)
 - Viskositas
 - Kandungan gas non-kondensable

Software Pemodelan Sumur

Beberapa software populer yang sering digunakan untuk pemodelan sumur panas bumi:

- **TOUGH2**
 - Software reservoir simulator yang mampu memodelkan aliran multi-fasa dan transfer panas.
- **WellSim**
 - Software komersial khusus pemodelan sumur geothermal.
 - Dapat memprediksi debit produksi, pressure profile, temperature profile.
- **TETRAD**
 - Digunakan untuk reservoir modeling, termasuk simulasi sumur geothermal.

Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Sumur

- Kedalaman sumur
- Tekanan reservoir
- Temperatur reservoir
- Kandungan NCG (Non-Condensable Gas)
- Scaling di dalam sumur
- Diameter casing & tubing

Semua faktor ini dimasukkan ke dalam simulasi untuk memperkirakan debit produksi optimum.

Manfaat Pemodelan Sumur

- Menghindari **flashing** yang terlalu dini di sumur.

- Meningkatkan umur sumur.
- Mengoptimasi desain fasilitas permukaan.
- Meminimalkan biaya operasi.

BAB IX

ASPEK LINGKUNGAN

Pengantar

Industri panas bumi termasuk energi terbarukan yang **lebih ramah lingkungan** dibanding bahan bakar fosil. Namun, pengoperasian proyek panas bumi tetap memiliki dampak lingkungan yang perlu dikelola secara serius.

Beberapa isu lingkungan yang perlu diperhatikan antara lain:

- Gas buang yang bersifat korosif atau beracun (H_2S , CO_2)
- Kebisingan dari fasilitas permukaan
- Potensi pencemaran air tanah akibat brine
- Risiko deformasi tanah (land subsidence)

Emisi Gas Non-Condensable (NCG)

Fluida panas bumi mengandung gas-gas yang tidak mengembun (NCG), misalnya:

- **Karbon dioksida (CO_2)**
 - Gas rumah kaca → berkontribusi pada pemanasan global.
- **Hidrogen sulfida (H_2S)**
 - Berbau menyengat seperti telur busuk.
 - Bersifat toksik dalam konsentrasi tinggi.
- **Metana (CH_4)**
 - Gas rumah kaca yang lebih kuat dari CO_2 .

Gas-gas ini harus dikontrol agar tidak melebihi batas emisi yang ditetapkan regulasi lingkungan.

Kebisingan

Kegiatan panas bumi, terutama blow test atau discharge test sumur, menghasilkan suara keras (hingga 120 dB) setara suara jet engine.

Pengendalian kebisingan dilakukan dengan:

- **Silencer** → alat peredam suara yang mengurangi kebisingan hingga di bawah 85 dB.
- Pengaturan waktu operasi → menghindari aktivitas bising pada malam hari.

Pencemaran Brine

Brine (air panas sisa produksi) bisa mengandung:

- Silika
- Boron
- Asam sulfat
- Logam berat (Arsenic, Mercury)

Jika tidak ditangani benar, brine bisa mencemari tanah atau air tanah. Oleh karena itu:

- Brine harus diinjeksikan kembali ke reservoir melalui sumur injeksi.
- Pemerintah mengatur bahwa tidak boleh ada pembuangan brine ke permukaan atau badan air alami.

Risiko Subsidence (Penurunan Tanah)

Penurunan tekanan reservoir akibat ekstraksi fluida panas bumi bisa menimbulkan **subsidence**:

- Permukaan tanah turun
- Kerusakan infrastruktur (jalan, pipa)
- Potensi kerusakan ekosistem

Untuk menghindari ini, perusahaan geothermal wajib melakukan:

- Reinjeksi brine untuk menjaga tekanan reservoir.
- Pemantauan permukaan tanah secara periodik.

Pengendalian Aspek Lingkungan

Langkah-langkah mitigasi dampak lingkungan:

- Penggunaan gas scrubber untuk H₂S dan CO₂.
- Monitor emisi gas secara online (Continuous Emission Monitoring System - CEMS).
- Perencanaan pemipaan brine yang aman.
- Membuat buffer zone di sekitar fasilitas panas bumi.
- Penyuluhan kepada masyarakat sekitar proyek.

Keuntungan Panas Bumi Bagi Lingkungan

- **Zero Emission Potential** → dengan reinjeksi brine, emisi CO₂ bisa ditekan sangat rendah.
- Tidak menghasilkan abu terbang (fly ash) seperti PLTU batubara.
- Tidak menghasilkan limbah radioaktif.
- Dapat menjadi **base load power plant** → mendukung stabilitas jaringan listrik.

Dengan pengelolaan yang baik, panas bumi merupakan salah satu sumber energi **paling bersih** dan **berkelanjutan** di dunia.

BAB X

ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)

Pengantar

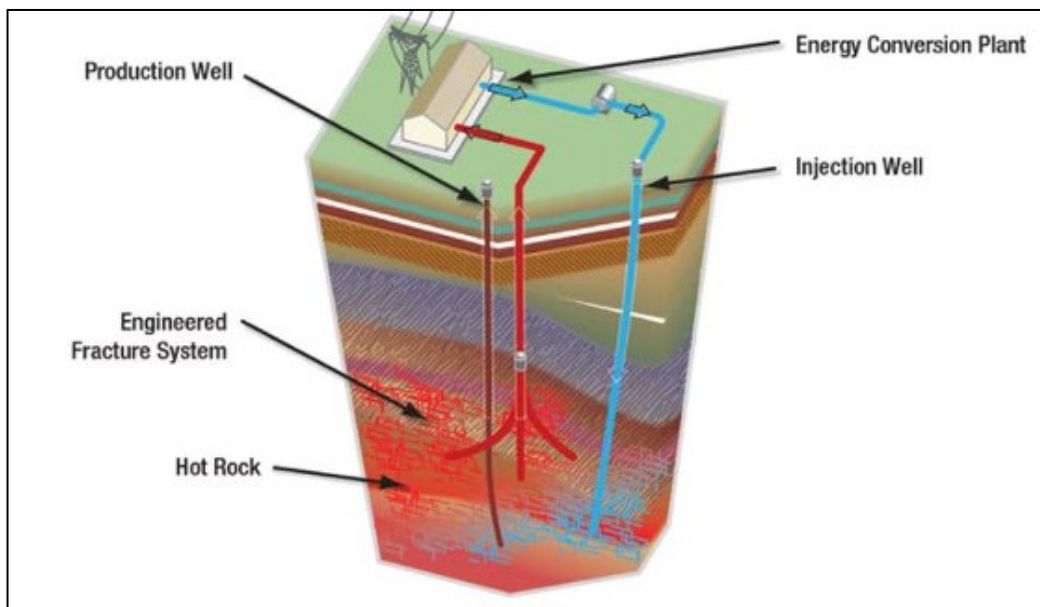
Energi panas bumi umumnya diambil dari reservoir yang sudah memiliki fluida alami (air panas atau uap) dan permeabilitas yang baik. Namun, tidak semua lokasi memiliki kondisi geologi seperti itu. Enhanced Geothermal System (EGS) dikembangkan untuk mengekstraksi energi panas dari batuan kering panas (Hot Dry Rock – HDR) yang secara alami tidak memiliki cukup fluida atau permeabilitas.

EGS membuka potensi panas bumi di lokasi-lokasi yang sebelumnya dianggap tidak ekonomis.

Definisi EGS

EGS adalah teknologi panas bumi yang melibatkan:

- Rekayasa rekahan (hydraulic fracturing) untuk membuka jalur aliran di dalam batuan panas.
- Menginjeksikan fluida (biasanya air) ke dalam batuan panas.
- Fluida memanaskan saat mengalir melalui rekahan buatan.
- Air panas diproduksi kembali ke permukaan → digunakan untuk pembangkitan listrik.



Gambar 10.1. Skema EGS

Proses EGS

1. **Pemboran Dua Sumur** (Injection Well & Production Well)
 - Sumur injeksi: menginjeksikan air dingin ke bawah tanah.
 - Sumur produksi: mengalirkan air panas ke permukaan.
2. **Hydraulic Fracturing**
 - Membuka rekahan (fracture) di batuan panas.
 - Meningkatkan permeabilitas agar air bisa mengalir.
3. **Heat Extraction**
 - Air menyerap panas dari batuan → naik ke permukaan sebagai fluida panas.
4. **Pembangkit Listrik**
 - Sama seperti sistem geothermal konvensional, menggunakan uap atau fluida panas untuk memutar turbin.

Keunggulan EGS

- **Potensi sangat besar**
Hampir semua area dengan suhu batuan tinggi bisa dikembangkan menjadi sumber panas bumi meskipun tidak memiliki reservoir alami.
- **Tidak tergantung kondisi alami reservoir**
EGS memanfaatkan panas batuan, bukan fluida alami.
- **Penyebaran lokasi lebih luas**
EGS dapat diaplikasikan di banyak negara yang sebelumnya tidak memiliki potensi geothermal konvensional.

Tantangan EGS

- **Biaya investasi sangat tinggi**
 - Hydraulic fracturing mahal.
 - Perlu teknologi khusus.
- **Risiko Seismik (Induced Seismicity)**
 - Proses fracturing dapat memicu mikro-gempa.
 - Membutuhkan studi seismik mendetail.
- **Kehilangan heat transfer**
 - Jika rekahan tidak stabil, sirkulasi fluida tidak efisien.

Aplikasi EGS

Beberapa proyek EGS yang pernah dilakukan:

- **Soultz-sous-Forêts, Prancis** → salah satu proyek EGS paling terkenal di Eropa.
- **Cooper Basin, Australia** → target batuan panas kering pada kedalaman 4-5 km.
- **Basel, Swiss** → sempat dihentikan karena memicu gempa mikro.

Walau penuh tantangan, EGS adalah **masa depan teknologi geothermal** karena membuka peluang memanfaatkan panas bumi di seluruh dunia.

BAB XI

CO₂ PLUME GEOTHERMAL

Pengantar

CO₂ Plume Geothermal (CPG) adalah konsep teknologi panas bumi generasi terbaru yang memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) sebagai fluida kerja (working fluid) untuk mengekstraksi panas dari reservoir geothermal.

Konsep ini menggabungkan dua manfaat besar:

- **Pembangkit listrik panas bumi.**
- **Penyimpanan CO₂ (Carbon Sequestration).**

Teknologi ini dianggap sebagai salah satu solusi mitigasi perubahan iklim sambil memanfaatkan energi terbarukan.

Konsep Dasar CPG

Berbeda dengan geothermal konvensional yang menggunakan air atau uap, CPG menggunakan CO₂ superkritis sebagai fluida kerja. Prosesnya sebagai berikut:

1. **CO₂ Diinjeksikan ke Reservoir**
 - Pada tekanan tinggi, CO₂ berubah menjadi fluida superkritis (supercritical CO₂ – scCO₂).
 - scCO₂ bersifat sangat mobile dan memiliki kapasitas panas tinggi.
2. **CO₂ Menyerap Panas dari Batuan**
 - CO₂ mengalir melalui pori batuan dan mengambil panas reservoir.
3. **CO₂ Diproduksi ke Permukaan**
 - scCO₂ naik ke permukaan membawa energi panas.
4. **Energi Panas Dikonversi ke Listrik**
 - Panas CO₂ digunakan memanaskan working fluid sekunder atau langsung dipakai memutar turbin (depending on design).
5. **CO₂ Disirkulasikan atau Disimpan**
 - Sebagian CO₂ dipakai ulang.
 - Sebagian lain bisa disimpan permanen dalam reservoir → **Carbon Sequestration**.

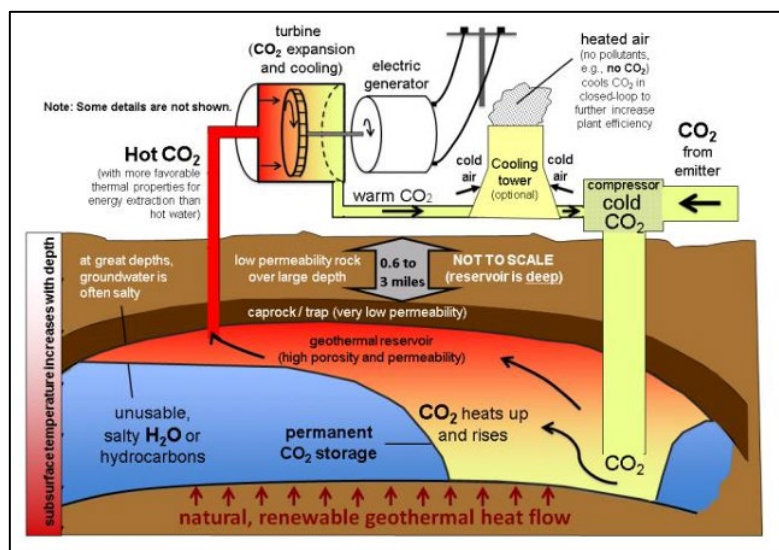
Keunggulan CO₂ sebagai Working Fluid

- **Densitas Rendah & Viskositas Rendah**
→ scCO₂ lebih mudah mengalir dibanding air di reservoir batuan.
- **Kapasitas Panas yang Baik**
→ Membawa energi panas lebih efisien.
- **Tekanan Operasi Rendah**
→ Mengurangi risiko korosi peralatan permukaan.
- **Sekaligus Menyimpan CO₂**
→ Mengurangi emisi gas rumah kaca.

Tantangan Teknologi CPG

Meskipun sangat menjanjikan, teknologi ini menghadapi beberapa kendala:

- **Korosi**
 - CO₂ dalam kondisi lembab dapat menghasilkan asam karbonat → menimbulkan korosi pada peralatan baja.
- **Desain Peralatan Khusus**
 - Turbin dan heat exchanger perlu dirancang untuk CO₂ superkritis.
- **Biaya Investasi Tinggi**
 - Teknologi masih dalam tahap riset dan pilot project.
- **Kendala Regulasi**
 - Proses penyimpanan CO₂ di reservoir geothermal harus memenuhi peraturan ketat.



Gambar 11.1. Skema CPG

Proyek Pilot CPG

Beberapa penelitian dan proyek pilot:

- **Illinois Basin, AS**
 - Uji coba menyuntikkan CO₂ ke batuan pasir panas dalam.
- **MIT Study (2016)**
 - Menyimpulkan CPG bisa menghasilkan energi panas bumi sekaligus menyimpan CO₂ secara permanen.
- **SaskPower, Kanada**
 - Studi potensi pemanfaatan CO₂ di ladang minyak tua untuk kombinasi EOR dan CPG.

Manfaat Bagi Lingkungan

- Menghasilkan energi panas bumi yang bersih.
- Menyimpan CO₂ sehingga mengurangi efek rumah kaca.
- Potensi efisiensi lebih tinggi dibanding geothermal konvensional karena sifat CO₂ superkritis.

Masa Depan CPG

Walaupun masih dalam tahap riset, banyak ahli menyebut CO₂ Plume Geothermal sebagai salah satu teknologi kunci energi bersih abad ke-21 karena menggabungkan panas bumi dengan teknologi mitigasi perubahan iklim.

DAFTAR PUSTAKA

- DiPippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*. 3rd Edition. Butterworth-Heinemann.
- Grant, M. A., & Bixley, P. F. (2011). *Geothermal Reservoir Engineering*. 2nd Edition. Academic Press.
- Saptadji, N. M. (2001). *Teknik Panas Bumi*. Bandung: ITB Publisher.
- Saptadji, N. M. (2020). *Teknik Panas Bumi*. Bandung: ITB Publisher.
- Zarrouk, S. J., & Purnanto, H. (2015). *Geothermal Well Test Analysis*. Geothermics, Vol. 55.
- Watson, A. (2016). *Geothermal Engineering*. Wiley & Sons.
- MIT Energy Initiative. (2016). *The Future of Geothermal Energy*. Massachusetts Institute of Technology.
- Energy Information Administration (EIA). (2020). *Geothermal Explained*. U.S. Department of Energy.
- BINE Information Service (2013). *Geothermal Electricity Generation*. Bonn, Germany.
- Geothermal Resources Council. (2017). *Steam Washing in Geothermal Power Plants*. www.geothermalresourcescouncil.org
- Sabs Well Services. (2022). *Go-Devil Logging Tools*. www.sabs-wellservices.com
- Novianto Geophysicist Blog. (2018). *Caliper Log in Geothermal*. novianto-geophysicist.blogspot.com
- University of Queensland Geothermal Centre of Excellence. (2017). *Geothermal Well Logging*. www.geothermal.uq.edu.au