

DASAR-DASAR DAN APLIKASI

REKAYASA PANAS BUMI



*Ana Nur Octaviani
Nanang Ruhyat*

Rekayasa Panas Bumi:

Dasar-dasar dan Aplikasi

Ana Nur Octaviani
Nanang Ruhyat

Jakarta, 24 Juni 2024

Rekayasa Panas Bumi:

Dasar-dasar dan Aplikasi

Jakarta, 2024. Ana Nur Octaviani, Nanang
Ruhyat

Desain Sampul : Ana Nur Octaviani, Nanang
Ruhyat

Penata Isi : Ana Nur Octaviani, Nanang Ruhyat

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ke dalam bentuk apapun, secara elektronik maupun mekanis, termasuk fotokopi, merekam, atau dengan teknik perekaman lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit. Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Apabila di dalam buku ini terdapat kesalahan cetak/produksi atau kesalahan informasi, mohon hubungi penerbit

Kata Pengantar

Rekayasa Panas Bumi: Dasar-dasar dan Aplikasi

Di tengah krisis energi global dan perubahan iklim yang semakin memprihatinkan, kebutuhan akan sumber energi yang bersih, berkelanjutan, dan andal menjadi semakin mendesak. Dalam konteks ini, energi panas bumi muncul sebagai salah satu solusi potensial untuk menjawab tantangan tersebut.

Buku ini hadir untuk memberikan pemahaman yang komprehensif tentang energi panas bumi, mulai dari definisi, potensi, hingga pemanfaatannya. Pembaca akan diajak menyelami berbagai aspek terkait panas bumi, termasuk:

- Sumber dan potensi energi panas bumi di Indonesia
- Teknologi pemanfaatan panas bumi untuk pembangkit listrik dan non-listrik
- Keberlanjutan dan dampak lingkungan dari energi panas bumi
- Peran dan prospek pengembangan energi panas bumi di masa depan

Buku ini dipersembahkan bagi para peminat energi, akademisi, praktisi, dan masyarakat luas yang ingin memahami lebih dalam tentang energi panas bumi dan potensinya dalam mendorong masa depan energi yang lebih hijau dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penyusunan buku ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan banyak pihak. Kami ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- Para pakar dan narasumber yang telah memberikan kontribusi dan masukan berharga
- Tim editor dan proofreader yang telah bekerja keras dalam penyempurnaan naskah
- Penerbit yang telah memfasilitasi penerbitan buku ini

Semoga buku ini dapat menjadi sumber informasi yang bermanfaat dan mendorong pengembangan energi panas bumi di Indonesia.

Jakarta

Penulis

Daftar Isi

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Pengantar	2
B. Bentuk Panasbumi di Permukaan	8
BAB II SISTEM PANASBUMI	19
A. Terjadinya sistem panasbumi	20
B. Jenis-jenis Energi dan Sistim Panasbumi	25
C. Sistim Panasbumi di Indonesia	28
D. Model Sistim Panasbumi	31
BAB III PEMANFAATAN FLUIDA PANAS BUMI	38
A. Fluida Panasbumi Untuk Pembangkit Listrik	39
B. Fluida Panasbumi Untuk Sektor Non-Listrik	55
BAB IV SIFAT BATUAN DAN FLUIDA PANASBUMI	62
A. Sifat Batuan	63
B. Jenis dan Sifat Fluida	67
C. Fluida Dua Fasa di Dalam Batuan Reservoir	77
D. Geokimia Fluida Panasbumi	81
BAB V FASILITAS PRODUKSI PANASBUMI	87
A. Fasilitas Produksi Uap	88
B. Fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi	102
C. Prinsip Pertukaran Energi Panas di dalam APK	111
D. Studi Kasus Perhitungan APK	119
DAFTAR PUSTAKA	123

BAB I

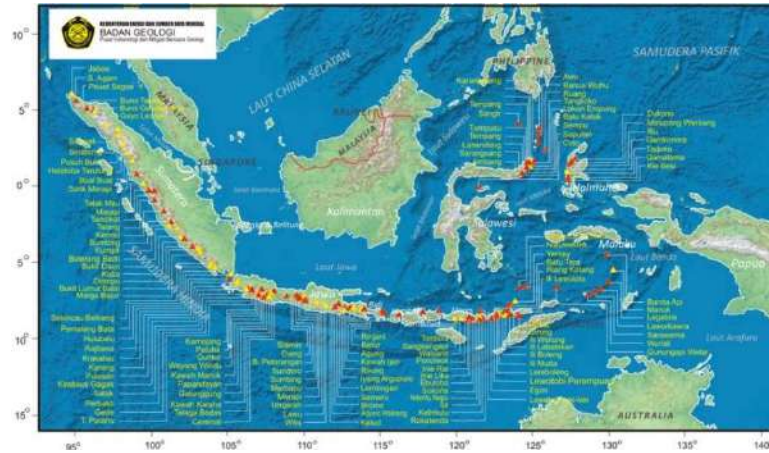
PENDAHULUAN

A. Pengantar

Energi panas bumi (*geothermal energy*) merupakan sumber energi terbarukan berupa energi panas yang dihasilkan dan disimpan di dalam inti bumi. Dengan meningkatnya permintaan energi dan kelangkaan sumber energi fosil, negara-negara lain mengurangi ketergantungan mereka terhadap energi fosil dengan memanfaatkan energi panas bumi untuk menghasilkan energi listrik. Energi panas bumi merupakan energi terbarukan (*clean energy*) yang lebih ramah lingkungan dibandingkan energi fosil. Meskipun energi panas bumi dapat dimanfaatkan secara langsung dan tidak langsung, namun pemanfaatan energi panas bumi di Indonesia secara umum belum optimal.

Kondisi geologi Indonesia menjadikan energi panas bumi sebagai sumber daya alam yang layak untuk diteliti dan dikembangkan. Indonesia terletak di persimpangan tiga lempeng dunia: lempeng Eurasia, lempeng Indo-Australia, dan lempeng Pasifik. Jika ketiga lempeng ini bertemu maka Indonesia berada di ring of fire. Zona ini berarti Indonesia memiliki banyak gunung berapi aktif yang tersebar di Pulau Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, dan Sulawesi. Rangkaian gunung berapi ini merupakan cikal bakal potensi panas bumi.

Menurut UU Nomor 21 Tahun 2014, pemanfaatan panas bumi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu pemanfaatan langsung dan pemanfaatan tidak langsung. Pemanfaatan langsung mengacu pada kegiatan yang memanfaatkan energi panas bumi secara langsung, seperti kegiatan pariwisata, agribisnis, dan industri, sedangkan pemanfaatan tidak langsung mengacu pada pembangkit listrik. Indonesia mempunyai potensi panas bumi terbesar yaitu 40% potensi dunia, dengan sekitar 265 lokasi terletak di sepanjang sabuk vulkanik yang tersebar di Pulau Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, dan Maluku.



Gambar 1.1
(Sumber : PVMBG, Badan Geologi, KESDM)

Berdasarkan data dari Badan Geologi potensi Panas Bumi Indoensia mencapai 23.9 GW (Gigawatt). Pemanfaatan dari Panas Bumi tersebut mencapai 2130 MW (Megawatt) atau setara dengan 8,9% dari potensi Panas Bumi yang dimiliki Indonesia. Pemanfaatan energi Panas Bumi di Indonesia masih difokuskan secara tidak langsung yaitu untuk sumber pembangkit tenaga listrik yang lebih dikenal dengan PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi). Berbeda dengan pembangkit listrik PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap) yang bersumber dari Batubara, PLTP memanfaatkan uap yang terpanaskan oleh Panas Bumi untuk menggerakkan turbine pembangkit listrik. Sehingga Panas Bumi termasuk energi ramah lingkungan karena sumber utamanya adalah uap air.

Energi panas bumi adalah sumber daya energi domestik dengan biaya, keandalan, dan lingkungan keunggulan dibandingkan sumber energi konvensional. Ini berkontribusi baik untuk pasokan energi, dengan pembangkit tenaga listrik dan penggunaan panas langsung. Saat memeriksa siklus hidup penuh perkembangan energi panas bumi, dampak lingkungannya secara keseluruhan jauh lebih rendah daripada

bahan bakar fosil konvensional dan pembangkit listrik tenaga nuklir. Selain itu, mereka mungkin memiliki lebih rendah dampak dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya seperti matahari, biomassa, dan angin pada setara basis keluaran energi

Ketika digunakan untuk menghasilkan listrik, ini berarti bahwa energi panas bumi adalah beban dasar, cocok untuk menghasilkan energi pada tingkat yang konstan, berbeda dengan output variabel angin dan matahari, dan output puncak tenaga air dan beberapa bio-power. Energi panas bumi potensi ada di mana-mana, ramah lingkungan dan hanya sedikit dikembangkan (IGA).

Hal ini terutama karena sumber energi panas bumi terkandung di bawah tanah, dan Peralatan konversi energi permukaan relatif kompak, membuat jejak keseluruhan. Seluruh sistem kecil. Pembangkit listrik tenaga panas bumi yang beroperasi dengan sirkulasi loop tertutup juga. Memberikan manfaat lingkungan dengan memiliki gas rumah kaca minimal dan emisi lainnya. Menjadi sumber daya asli, panas bumi – seperti sumber daya terbarukan lainnya – dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil impor. Masalah lingkungan utama untuk Energi panas bumi dikaitkan dengan penggunaan air tanah dan kontaminasi, dengan terkait kekhawatiran tentang kegempaan atau subsidensi yang diinduksi sebagai akibat dari injeksi dan produksi air. Masalah kebisingan, keselamatan, dampak visual, dan penggunaan lahan yang terkait dengan pengeboran dan produksi Operasi juga penting tetapi sepenuhnya dapat dikelola.

Energi panas bumi, yaitu ketersediaan jangka panjang dan besarnya panas yang terkandung di dalamnya interior bumi, biasanya dianggap sebagai sumber yang bersih dan terbarukan pada rentang waktu Sistem teknologi paling banyak digunakan di seluruh dunia sebagai sumber yang efektif untuk pasokan energi yang berkelanjutan, karena pemulihan reservoir entalpi tinggi akan sepenuhnya pulih ke keadaan pra-eksploitasi

setelah periode penutupan yang diperpanjang atau bahkan pada saat yang sama situs dari mana fluida atau panas diekstraksi di hampir semua proyek panas bumi di seluruh dunia.

Selain itu, dampak lingkungan dari pembangkit listrik tenaga panas bumi dan penggunaan langsung adalah umumnya kecil, dapat dikendalikan, atau diabaikan dan harga produksi energi panas bumi adalah menguntungkan dibandingkan dengan semua sumber energi lainnya.

Panas Bumi di Indonesia

Pengembangan energi panas bumi di Indonesia sudah dimulai pada tahun 1970an. Namun rencana pengembangan energi panas bumi digantikan oleh pengembangan bahan bakar fosil dan sehingga menjadi tidak optimal. Hal ini sangat disayangkan karena Indonesia merupakan salah satu negara dengan potensi panas bumi terbesar di dunia.

Pengembangan energi panas bumi dimulai di Indonesia pada tahun 1918 atas saran J.B. John. Van Dijk pada masa penjajahan Belanda. Proyek energi panas bumi pertama ini akan menggunakan sumber energi panas bumi yang terletak di Kawah Kamojang di Jawa Barat. Dari lima sumur yang dibor hingga tahun 1928, baru tahun 1926 yang menghasilkan uap di kawah Kamojang, dan uap tersebut berasal dari Sumur Kamojang No. 3 (KMJ-3) yang kedalamannya 66 meter. Dan hingga saat ini, KMJ-3 masih menghasilkan uap kering bersuhu tinggi. Suhu 140 °C dan tekanannya 2,5 atm. Sejak tahun 1928 hingga tahun 1963, kegiatan pengembangan panas bumi terhenti dan baru dilanjutkan pada tahun 1964. Pada tahun 1972, pemerintah mulai serius menangani Kawah Kamojang dengan melakukan survei geokimia, geofisika, dan geologi (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2009).

Saat ini, terdapat tiga cara untuk menghasilkan energi dari energi panas bumi: uap kering, *flash*, dan energi biner. Sistem uap kering menggunakan uap panas bumi secara langsung

untuk menggerakkan turbin, yang selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik. Dalam sistem *flash*, air panas, biasanya pada suhu di atas 2000 derajat Celcius, diambil dari permukaan bumi, direbus saat naik ke permukaan, lalu air panas dan uap panas dipisahkan dan dikirim ke turbin. Sebaliknya, pada pembangkit listrik biner, air panas dialirkan melalui penukar panas untuk merebus cairan organik yang menggerakkan turbin. Uap panas dan sisa cairan panas bumi yang dikompresi menggunakan ketiga metode di atas diinjeksikan kembali ke dalam batuan panas untuk menghasilkan panas kembali.

Pada upacara pembukaan KTT Proyek Iklim Asia-Pasifik di Jakarta, Al Gore memperkirakan Indonesia bisa menjadi negara adidaya dengan memanfaatkan energi panas bumi sebagai sumber listrik. Benar atau tidaknya prediksi ini bergantung pada respons kebijakan dan strategi pemerintah terhadap pengembangan panas bumi di masa depan.

Menurut laporan Badan Energi Internasional (IEA), potensi penggunaan energi panas bumi untuk listrik atau produksi panas global diperkirakan meningkat setidaknya sepuluh kali lipat pada tahun 2050. Di sisi lain, menurut laporan "Peta Jalan Teknologi: Panas Bumi dan Listrik" yang dipresentasikan pada konferensi Eurelectric yang diadakan di Swedia pada tahun 2011, penggunaan energi panas bumi menyumbang sekitar 3,5% dari pembangkitan listrik dunia dan sekitar 3,9% dari energi pemanas dunia pada 2050.

Semakin meningkatnya pertumbuhan ekonomi maka kebutuhan pasokan listrik pun semakin meningkat. Namun sektor energi Indonesia saat ini masih menghadapi kendala dalam memenuhi kebutuhan listrik negara. Untuk memenuhi kebutuhan listrik, pemerintah meluncurkan proyek pembangkit listrik 10.000 MW pada tahun 2006. Sebagai bagian dari proyek ini, beberapa pembangkit listrik baru dibangun di berbagai wilayah untuk menggantikan batu bara sebagai bahan bakar.

Namun peningkatan penggunaan batu bara telah meningkatkan ketergantungan Indonesia terhadap bahan bakar fosil (hingga saat ini 80% listrik Indonesia berasal dari bahan bakar fosil) dan memperburuk kondisi lingkungan yang ada. Situasi ini mendorong pemerintah untuk mempertimbangkan upaya pengembangan sumber energi alternatif, termasuk penggunaan energi panas bumi.

Upaya peningkatan pemanfaatan energi panas bumi tertuang dalam Peta Jalan Pengembangan Energi Panas Bumi 2004-2025. Pada tahun 2008, pemerintah menargetkan pemanfaatan energi panas bumi mencapai 2.000 MW, 6.000 MW pada tahun 2020, dan 9.500 MW pada tahun 2025. Selain itu, dalam peta jalan tersebut, pemerintah juga telah menetapkan target pasar, produk, teknologi, serta penelitian dan pengembangan untuk periode 2005 hingga 2025 agar energi panas bumi dapat dimanfaatkan secara praktis.

B. Bentuk Panasbumi di Permukaan

Berbeda dengan sistem minyak dan gas, keberadaan sumber daya panas bumi bawah permukaan sering ditunjukkan dengan adanya fenomena panas bumi di permukaan (manifestasi permukaan panas bumi), seperti sumber air panas atau kolam lumpur termal yang ada, geyser, fitur panas bumi, dll, dimana sekitar sumber air panas, kolam air panas banyak digunakan oleh penduduk setempat untuk mandi, mandi, mencuci, memasak, dan keperluan lainnya. Fenomena panas bumi di permukaan bumi diduga akibat difusi panas dari di bawah permukaan bumi atau adanya retakan yang memungkinkan fluida panas bumi (uap dan air panas) mengalir ke permukaan bumi.



Gambar 1.2 Bentuk Panas Bumi di Permukaan

Gambar 1.2 atas menunjukkan jenis-jenis fenomena panas bumi yang ada di permukaan bumi. area dengan fitur panas bumi permukaan biasanya merupakan area pertama yang dicari dan dikunjungi selama tahap eksplorasi. Berdasarkan karakteristik fenomena panas bumi di permukaan bumi dan komposisi kimia air, berbagai prediksi dapat dilakukan mengenai sistem panas bumi di bawah permukaan bumi, seperti jenis dan suhu

reservoir. Untuk penjelasannya, fenomena panas bumi di lapangan Kamojang ditunjukkan pada gambar 1.3 berikut.



*Gambar 1.3 Panas bumi di lapangan Kamojang
(Sumber : Antara News)*

Tanah hangat (*Warm Ground*)

Keberadaan sumber daya panas bumi bawah tanah antara lain dapat dibuktikan dengan adanya tanah yang suhunya lebih tinggi dibandingkan suhu tanah di sekitarnya. Hal ini terjadi melalui perpindahan panas konduktif dari batuan bawah tanah ke batuan permukaan.

Armstead (1983) mengklasifikasikan wilayah di bumi berdasarkan besarnya gradien suhunya sebagai berikut:

- Area tidak panas (non-thermal area)
Suatu wilayah diklasifikasikan sebagai wilayah tidak beriklim sedang jika gradien suhu di wilayah tersebut adalah: Sekitar 10-40°C/km.

- Area Panas (Thermal area)
Area panas dibagi menjadi dua bagian:
 - Wilayah semi termal, yaitu wilayah dengan gradien suhu sekitar 70-80 °C/km.
 - Daerah hipertermal, yaitu daerah dengan gradien suhu yang sangat tinggi. Sebagai contoh, di Lanzarote (Kepulauan Canary) , kekuatan gradien suhu sangat besar sehingga kekuatan dinyatakan dalam °C/cm, bukan °C/km.

Laju aliran panas (Q) dapat ditentukan dari data konduktivitas termal (K) batuan bagian atas dan data gradien suhu (dT/dz) dekat permukaan . Secara matematis, besarnya aliran panas akibat konduksi dapat dinyatakan sebagai:

$$Q = - K (dT/dz) \quad (1.1)$$

Tanah hangat umumnya terjadi di atas atau di wilayah sekitar sumber daya panas bumi. Energi panas bumi lainnya memancarkan lebih banyak panas, misalnya di daerah tempat keluarnya uap panas atau mengepulkan tanah, atau di daerah dekat kolam air panas. Pertumbuhan tanaman biasanya tidak terganggu kecuali gradien suhu melebihi 25-30°C/km.

Keberadaan tanah hangat dapat ditentukan dengan mengukur gradien suhu hingga kedalaman 1 hingga 2 meter. Pengukuran suhu biasanya dilakukan dengan mengebor lubang hingga kedalaman 1 hingga 2 meter. Suhu di permukaan dan kedalaman 1 meter biasanya diukur dengan termometer atau termokopel. Dari data tersebut dapat dihitung besarnya gradien suhu pada titik pengamatan.

Untuk mendapatkan gambaran menyeluruh tentang suhu di wilayah Anda, Anda perlu melakukan pengukuran di beberapa lokasi. Peta suhu (T-map) dibuat dari data yang diperoleh. Jika lapisan tanah atas yang hangat terletak di daerah yang terjadi perubahan musim, maka perlu dilakukan kompensasi terhadap fluktuasi suhu. Studi di atas harus dilakukan di semua wilayah di mana fenomena panas bumi permukaan terjadi. Contoh:

- Pengukuran di El Tatio (Chili).
Pengukuran suhu di kawasan ini dilakukan pada kedalaman 2 meter, dan pengukuran meliputi area seluas 20 km². Penelitian tersebut dilakukan dalam kurun waktu 1, tahun.
- Pengukuran di lapangan Kamojang (Jawa Barat).
Pengukuran suhu dilakukan pada kedalaman 0,7 meter pada jarak tetap di sepanjang jalan raya dan trotoar. Hal ini dilakukan agar uap panas dapat menutupi seluruh area yang keluar ke permukaan (*steam bed*). Dengan demikian, survei dilakukan di wilayah dengan luas 1,5 kilometer persegi. Penelitian ini selesai dalam waktu kurang lebih tiga minggu.

Survei yang dilakukan di El Tatio mungkin memakan waktu terlalu lama, sedangkan survei yang dilakukan di Camojan mungkin terlalu singkat.

Permukaan Tanah Beruap (*Steaming Ground*)

Di beberapa daerah, uap (*steam*) bersuhu tinggi keluar dari permukaan tanah. Jenis manifestasi panas bumi ini disebut *steaming ground*. Uap panas diasumsikan berasal dari lapisan tipis dekat permukaan bumi yang berisi air panas dengan suhu paling sedikit sama dengan titik didihnya. Suhu permukaan sangat bergantung pada laju aliran uap (*steam flow rate*).

Elder (1966) mengelompokkan *steaming ground* berdasarkan aliran panas seperti terlihat pada di bawah ini

Tabel 1 *Steaming Ground* menurut Elder, 1966

Tingkat Kekuatan	Laju Aliran Panas (J/s.m²)
Sangat Kuat	500-5000
Kuat	50-500
Lemah	<50

Secara umum, intensitas termal suatu area tanah beruap diperkirakan berdasarkan besarnya gradien suhu. Pemetaan suhu dilakukan dengan membagi luas menjadi beberapa blok

yang berukuran sama. Jarak antara satu lokasi pengukuran dengan lokasi pengukuran lainnya (pusat blok) kurang lebih 20 meter. Suhu dapat diukur menggunakan termometer tipe strip bimetal . Jika Anda melakukan pengukuran suhu secara menyeluruh, Anda dapat membuat peta suhu pada skala umum, yaitu 1: 200 atau 1: 100, dan kemudian jumlah kehilangan panas atau *heat loss* dapat dihitung.

Metode lain untuk memetakan permukaan beruap adalah dengan menggunakan radiasi infra merah di udara. Metode pengukuran ini adalah yang tercepat dari metode pengukuran, namun sangat mahal. Karena suhu di wilayah tersebut umumnya sangat tinggi (gradien suhu umumnya di atas 300 °C/m), tanah yang beruap sangat berbahaya bagi organisme hidup. Pada umumnya tanaman tidak tumbuh di daerah yang tanahnya beruap karena suhunya yang terlalu tinggi.

Mata Air Panas Atau Hangat (*Hot or Warm Spring*)

Sumber air panas/mata air hangat juga menunjukkan adanya sumber daya panas bumi di bawah tanah. Sumber air panas ini terbentuk dari air panas yang mengalir dari bawah permukaan bumi melalui celah-celah bebatuan. Istilah ``hangat" digunakan bila suhu air di bawah 50°C, dan istilah ``panas" digunakan bila suhu air di atas 50°C.

Sifat air permukaan sering digunakan untuk memperkirakan jenis reservoir bawah permukaan.

- Mata air panas asam biasanya merupakan fenomena permukaan dalam sistem panas bumi berbasis uap.
- Mata air panas yang netral biasanya merupakan perwujudan dari sistem panas bumi yang didominasi air dan umumnya jenuh dengan silika.
- Bila laju aliran air panas tidak terlalu tinggi, teras silika keperakan (teras sinter silika atau platform sinter) umumnya membentuk sekitar sumber air panas. Teras

travertine terbentuk ketika air hidrotermal mengandung karbonat yang tinggi.

- Namun, di beberapa daerah, misalnya di kaki pegunungan, terdapat sumber air panas netral yang merupakan ekspresi permukaan sistem panas bumi yang didominasi uap.

Kolam Air Panas (*Hot Pools*)

Keberadaan kolam-kolam air hangat di alam menandakan adanya sumber daya panas bumi di bawah permukaan bumi. Kolam air panas ini terbentuk ketika air panas mengalir dari bawah tanah melalui celah-celah bebatuan. Perpindahan panas dari permukaan air ke atmosfer menyebabkan terjadinya penguapan pada permukaan air. Kehilangan panas ke atmosfer sebanding dengan luas kolam, suhu permukaan, dan kecepatan angin.

Kolam air panas dibagi menjadi tiga bagian: Kolam tenang (*calm pools*), Kolam yang mendidih (*boiling pools*), Kolam aktif bergolak (*ebullient pools*).

Temperatur kolam yang tenang umumnya berada di bawah suhu didih (*boiling point*). Aliran air umumnya sangat rendah di sini. Pada kolam mendidih, kolam mendidih sering digolongkan sebagai sumber air panas termal atau sumber air panas karena suhu merupakan suhu titik didih kolam mendidih dan sering kali disertai dengan letusan air panas. Pada kolam aktif, atau kolam hidrotermal turbulen, terjadi ledakan kuat yang terjadi secara tidak teratur dan disebabkan oleh keluarnya uap panas pada kedalaman di bawah permukaan air. Ledakan kecil juga dapat disebabkan oleh adanya gas yang tidak dapat terkondensasi seperti CO₂.

Air panas dapat disuplai dari reservoir air panas jauh di bawah permukaan atau dari air tanah yang dibawa ke suhu tinggi dengan memanaskan dengan uap panas.

- Air yang berasal dari reservoir panas bumi hampir selalu bersifat netral. Selain itu, airnya umumnya bening dan berwarna kebiruan.
- Jika air tersebut berasal dari air tanah dan dipanaskan melalui pemanasan dengan uap panas, maka air yang terdapat pada kolam termal umumnya bersifat asam. Sifat asam ini disebabkan oleh oksidasi H_2 pada uap panas. Kolam air panas yang bersifat asam biasanya berwarna keruh dan kehijauan. Genangan air panas yang bersifat asam dapat terbentuk di atas tangki air panas.



*Gambar 1.4 Kolam Air Panas di Lapangan Orakei Korako
New Zealand
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

Telaga Hidrotermal (Hot Lakes)

Telaga hidrotermal pada dasarnya adalah genangan air panas, tetapi karena permukaan airnya yang besar, maka lebih tepat dikatakan telaga. Umumnya jika luasnya lebih dari 100 meter persegi disebut telaga. Telaga hidrotermal sangat jarang ditemukan di alam karena terbentuk oleh letusan hidrotermal yang sangat besar.

Salah satu contohnya adalah Telaga Waimangu di Selandia Baru. Ketika konveksi terjadi di telaga, suhu umumnya tidak bervariasi menurut kedalaman. Telaga hidrotermal dapat terjadi di daerah yang reservoirnya didominasi air atau di daerah yang reservoirnya didominasi uap. Mata air panas yang mendekati titik didih di dasar telaga sangatlah berbahaya dan dapat menjadi lokasi letusan hidrotermal.



*Gambar 1.5 Telaga Waimangu
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

Fumarole

Fumarol adalah lubang kecil tempat keluarnya uap kering bersuhu tinggi (uap kering) atau uap bersuhu tinggi yang mengandung tetesan air (uap basah).

- Jika uapnya mengandung gas H_2S , fenomena permukaan disebut solfatar. Fumarol, yang mengeluarkan uap dengan kecepatan tinggi, terkadang ditemukan di area di mana terdapat sistem yang didominasi uap. Uap mungkin mengandung SO_2 , yang hanya stabil pada suhu sangat tinggi ($>500\text{ }^{\circ}C$).
- Fumarol yang mengeluarkan uap dengan kandungan asam borat yang tinggi biasa disebut soffioni.

Hampir semua fumarol, yang merupakan fitur permukaan dalam sistem yang didominasi air, mengeluarkan uap panas dan

lembab. Suhu uap biasanya di bawah 100°C. Fumarol jenis ini sering disebut fumarol basah. Di wilayah dengan sistem yang didominasi uap, terdapat fumarol basah dan kering, atau fumarol yang mengeluarkan uap pada suhu tinggi, yaitu sekitar 100-150 °C. Fumarol jenis ini sangat langka di alam, salah satu dari contohnya adalah fumarol di Ketetahi (Selandia Baru). Kecepatan asap jenis ini umumnya sangat cepat (>100 ms).

Geyser

Geyser didefinisikan sebagai sumber air panas yang sewaktu-waktu (pada interval waktu yang tidak pasti) menggelembung ke udara dan ketinggian air sangat bervariasi dari kurang dari satu meter hingga ratusan meter. Interval waktu antar semburan air (erupsi) pun bervariasi, mulai dari beberapa detik hingga beberapa hari. Waktu munculnya gelembung air ke permukaan juga sangat bervariasi, mulai dari hitungan detik hingga jam. Geyser merupakan manifestasi sistem tata kelola air.



*Gambar 1.6 Geyser
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

Kolam lumpur termal (Mud Pools)

Kolam lumpur termal juga merupakan fitur panas bumi permukaan. Kolam lumpur termal biasanya mengandung gas

yang tidak dapat terkondensasi (CO_2) bersama dengan sejumlah kecil uap panas. Lumpur berbentuk cair akibat kondensasi pada tumpukan panas. Sedangkan ledakan disebabkan oleh emisi CO_2 .



*Gambar 1.7 Kolam Lumpur
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

Silika Sinter

Silika sinter adalah endapan silika pada permukaan keperakan. Ini biasanya ditemukan di dekat sumber air panas atau lubang geyser yang mengeluarkan air netral. Umumnya bila debit air panas tidak terlalu besar maka akan terbentuk teras silika keperakan (silica sinter teras atau sinter platform) di sekitar sumber air panas. Badan sinter silika adalah manifestasi permukaan dari sistem panas bumi berbasis air.



*Gambar 1.8 Silika Sinter
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

Batuan Yang Mengalami Alterasi

Alterasi hidrotermal adalah suatu proses yang terjadi melalui reaksi batuan asal dengan fluida panas bumi. Batuan yang terbentuk akibat alterasi hidrotermal bergantung pada beberapa faktor, yang terpenting adalah suhu, tekanan, jenis batuan, asal usul, komposisi fluida (terutama pH) dan waktu reaksi (Browne, 1984). Proses konversi hidrotermal terjadi melalui reaksi batuan dengan air seperti klorida (air klorida dalam) dari reservoir panas bumi yang terletak jauh di bawah permukaan, dengan sedimen (misalnya kuarsa) dan Dapat menyebabkan pertukaran unsur batuan. Jika dicampur dengan cairan dan timbal, menghasilkan mineral seperti klorit, adularia, dan epidot. Airnya bersifat asam dan terjadi pada kedalaman yang relatif dangkal dan ketinggian yang relatif tinggi, mengubah batuan asli menjadi mineral lempung dan melepaskan mineral lainnya. Mineral hidrotermal yang terdapat di daerah permukaan biasanya berupa kaolin, altolit, belerang, residu silika dan gipsium



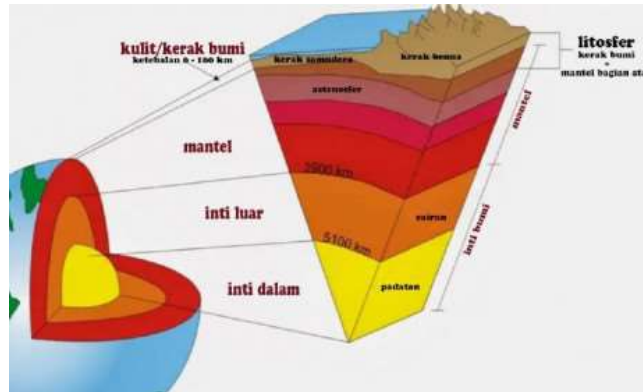
*Gambar 1.9 Alterasi Hidrotermal
(Photo: Danang Indarto, 2013)*

BAB II

SISTEM PANASBUMI

A. Terjadinya Sistem Panas Bumi

Secara umum, Bumi terdiri dari tiga lapisan utama: kerak bumi, mantel, dan inti bumi. Kerak bumi merupakan bagian terluar bumi. Ketebalan kerak bumi berbeda-beda, namun umumnya lebih tebal di bawah daratan (benua) dibandingkan di bawah lautan.

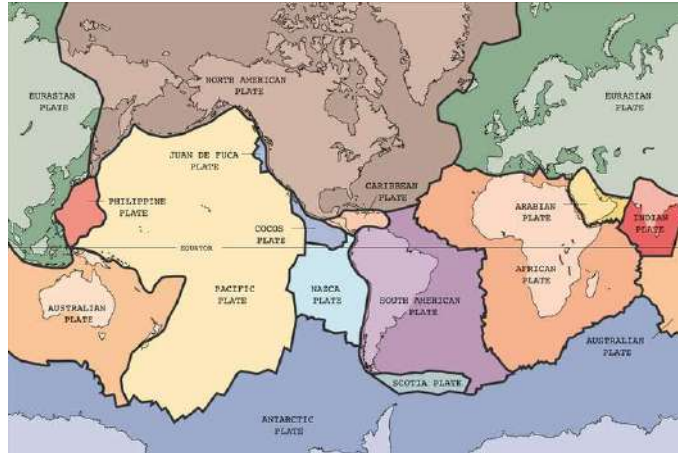


*Gambar 2.1 Lapisan Bumi
(Sumber: Medcom)*

Di bawah daratan, kerak bumi umumnya memiliki ketebalan sekitar 35 kilometer, namun di bawah lautan tebalnya hanya sekitar 5 kilometer. Batuan yang terdapat pada lapisan ini merupakan batuan keras dengan massa jenis kurang lebih 2,7 hingga 3 g/cm³. Di bawah kerak bumi terdapat lapisan tebal yang disebut mantel, yang diperkirakan tebalnya sekitar 2900 km.

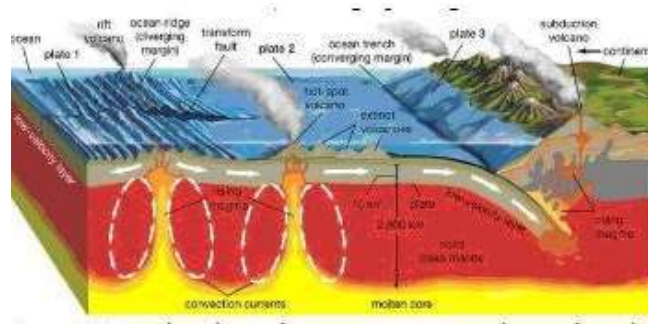
Bagian atas cangkang bumi juga tersusun dari batuan keras. Bagian terdalam bumi adalah inti bumi, yang tebalnya kira-kira 3450 kilometer. Lapisan ini mempunyai suhu dan tekanan yang sangat tinggi, sehingga merupakan lelehan yang sangat panas, dan kepadatannya diperkirakan sekitar 10,2-11,5 g/cm³. Suhu di pusat bumi diperkirakan mencapai sekitar 6.000°F.

Kerak bumi dan bagian atas kulit terluar bumi disebut litosfer (80 - 200 km). Bagian cangkang bumi yang berada tepat di bawah litosfer terdiri dari batuan lunak, namun lebih padat dan lebih panas. Bagian kulit terluar bumi ini disebut astenosfer (200-300 km). Di bawah lapisan ini, bagian bawah cangkang bumi, terdiri dari bahan cair, kental, panas dengan massa jenis kira-kira 3,3 hingga 5,7 g/cm³. Investigasi menunjukkan bahwa litosfer bukanlah permukaan utuh, melainkan terdiri dari serangkaian pelat tipis dan kaku.



*Gambar 2.2 Lempengan-Lempengan Tektonik
(Sumber: Kompas)*

Lempeng ini merupakan bongkahan batu setebal 40 hingga 90 mil (64 hingga 145 km) yang mengapung di astenosfer. Lempeng-lempeng ini bergerak perlahan dan terus menerus. Di beberapa tempat, lempeng-lempeng tersebut saling menjauh, dan di tempat lain, lempeng-lempeng tersebut saling bertabrakan, sehingga salah satu lempeng berada di bawah lempeng.



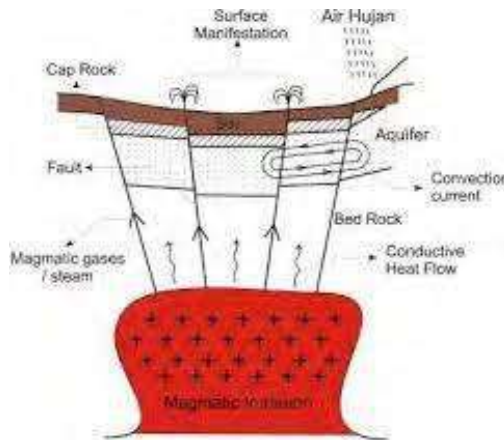
*Gambar 2.3 Gambaran Pergerakan Lempeng-lempeng Tektonik
(Sumber: Anti Gempa)*

Panas dan panas gesekan di dalam astenosfer menyebabkan tepi lempeng meleleh dan mencapai suhu tinggi (proses magmatisasi). Kehadiran material panas ribuan kilometer di bawah permukaan bumi menyebabkan aliran panas dari sumber panas ke permukaan. Hal ini menghasilkan gradien suhu rata-rata $300\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ dari tanah ke permukaan. Pada batas antara dua lempeng (dalam daerah subduksi), aliran panas umumnya lebih besar dari nilai rata-rata ini.

Hal ini membuat gradien suhu di wilayah lebih besar dari gradien suhu rata-rata dan bahkan di satu tempat di Lanzarote (Kepulauan Canary) gradien suhunya sangat tinggi, mencapai $70\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Besarannya tidak lagi dan ditampilkan dalam $0\text{C}/\text{cm}$, bukan $0\text{C}/\text{km}$. Sistem panas bumi pada dasarnya terbentuk dari perpindahan panas dari sumber panas ke lingkungan yang terjadi secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi melalui batuan, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi melalui kontak antara air dan sumber panas.

Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya disebabkan oleh gaya apung. Air selalu cenderung bergerak ke bawah karena gravitasi. Namun, ketika air bersentuhan dengan sumber panas, terjadi perpindahan panas sehingga membuat air menjadi lebih

panas dan ringan. Keadaan ini menyebabkan air panas bergerak ke atas dan air dingin bergerak ke bawah sehingga terjadilah sirkulasi air atau konveksi.



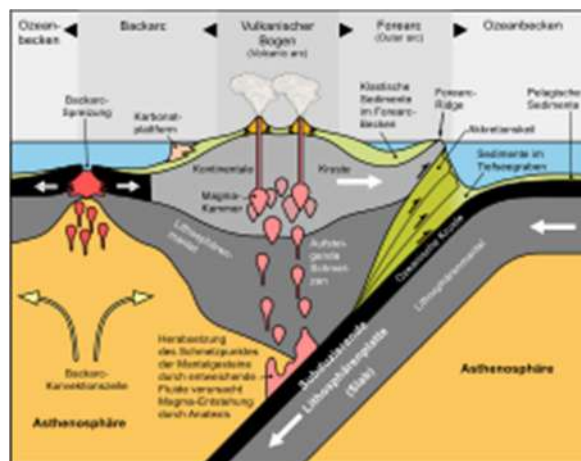
*Gambar 2.4 Perpindahan Panas Di Bawah Permukaan
Armstead, 1978*

Keberadaan dan karakteristik sumber energi panas bumi di Indonesia dijelaskan oleh Budihardi (1998) sebagai berikut: Indonesia mempunyai tiga lempeng yang saling berinteraksi: Lempeng Pasifik, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Eurasia. Tabrakan ketiga lempeng tersebut berperan sangat penting dalam terciptanya sumber energi panas bumi di Indonesia. Tabrakan antara lempeng Indo-Australia di selatan dan lempeng Eurasia di utara telah menciptakan zona subduksi 160-210 km di bawah Jawa-Nusatgara dan kedalaman sekitar 100 km (Rocks et. al, 1982) di bawah Pulau Sumatera.

Artinya proses magmatisasi di bawah Sumatera lebih dangkal dibandingkan di bawah Jawa atau Nusa Tenggara. Jenis magma yang dihasilkan berbeda-beda tergantung kedalamannya. Pada kedalaman yang lebih dalam, jenis magma yang dihasilkan menjadi lebih basa dan cair, dengan kandungan gas magmatik yang lebih tinggi, mengakibatkan letusan gunung berapi yang lebih dahsyat dan, pada akhirnya, endapan gunung berapi menjadi lebih tebal dan tersebar luas.

Oleh karena itu, reservoir panas bumi di Jawa umumnya terletak lebih dalam dan terletak pada batuan vulkanik, sedangkan reservoir panas bumi di Sumatera terletak pada kedalaman yang lebih dangkal pada batuan sedimen. Sistem panas bumi di Sumatera umumnya berhubungan dengan aktivitas gunung berapi. Rhyominitis ansian disebabkan oleh sumber magma yang lebih asam dan kental, sedangkan di Jawa, Nusa Tenggara, dan Sulawesi umumnya dikaitkan dengan vulkanisme basaltik andesitik dengan sumber magma Masu yang lebih cair.

Fitur panas bumi di ujung utara Sulawesi serupa dengan di Pulau Jawa. Karena sistem subduksi lain, tekanan atau kompresi akibat tumbukan miring antara lempeng Indo-Australia dan lempeng Eurasia membentuk patahan regional yang membentang di sepanjang Sumatera, sehingga menghasilkan mata air panas bumi yang terkait dengan gunung berapi muda. Selanjutnya, sistem panas bumi di Pulau Sumatera didominasi oleh sistem sesar regional yang secara umum berkaitan dengan sistem sesar Sumatera, sedangkan sistem panas bumi dari Pulau Jawa hingga Sulawesi didominasi oleh sistem sesar lokal. Mereka terbentuk oleh pergerakan massa batuan bawah permukaan selama letusan gunung berapi yang dahsyat dan besar.



Gambar 2.5 Proses Subduksi
(Sumber : Wikipedia)

Perbedaan Karakteristik Antara Prospek Panas Bumi Di
Jawa-Bali Dan Sumatera (Budihardi, 1998)

KRITERIA	JAWA - BALI	SUMATERA
Geologi Umum -Litologi -Ketebalan batuan vulkanik -Asosiasi struktur	Andesitik – Basaltik Tebal (>2500 m) Patahan local Kaldera depresi	Riolitik – Andestik Tipis (+/- 1200 m) Patahan regional Sumatera dan patahan sekundernya
-Manifestasi Permukaan	Fumarol suhu tinggi, solfatara, mud pool, air panas mendidih, batuan alterasi intensif dan kurang tersebar luas.	Fumarol suhu tinggi dengan steam jet, solfatara, maya air panas mendidih, batuan alterasi sangat intensif dan tersebar luas.

Reservoir panas bumi di Sumatera biasanya mengandung batuan sedimen yang telah mengalami beberapa pergerakan tektonik dan patahan setidaknya sejak Tersier hingga zaman modern. Hal ini menyebabkan terbentuknya pori-pori dan permeabilitas sekunder pada batuan sedimen dominan, yang pada akhirnya menyebabkan permeabilitas reservoir panas bumi yang besar, lebih besar dibandingkan dengan permeabilitas ladang panas bumi di Jawa dan Sulawesi.

Survei geologi yang dilakukan oleh Direktorat Jenderal Vulkanologi menemukan endapan mineral di Indonesia yang tersebar di Sumatera, Jawa, Sulawesi, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan Irian Jaya.

B. Jenis-jenis Energi dan Sistem Panas Bumi

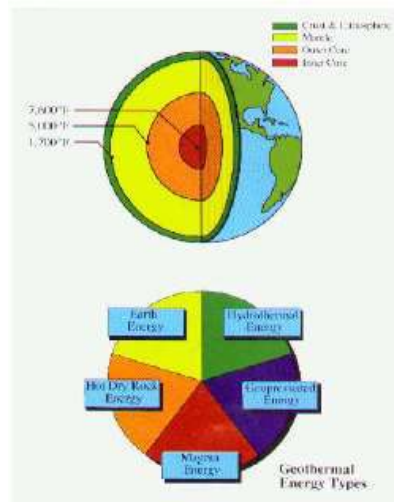
Energi panas bumi dibagi menjadi lima kategori seperti yang ditunjukkan pada gambar. Di antara seluruh sumber energi yang disebutkan di atas, energi dari sistem hidrotermal merupakan yang paling banyak digunakan. Karena pori-pori batuan dalam

sistem hidrotermal mengandung air atau uap, atau keduanya, maka reservoir umumnya tidak terlalu dalam untuk digunakan secara ekonomis. Sistem hidrotermal diklasifikasikan menjadi dua jenis: sistem satu fasa atau sistem dua fasa, berdasarkan jenis fluida produksi dan jenis isi fluida primer.

Dalam sistem fase tunggal, sistem umumnya mengandung air pada suhu antara 90 dan 1800 °C, dan tidak terjadi perebusan selama penggunaan. Contoh sistem ini adalah ladang panas bumi di Tianjin (Cina) dan Waiwera (Selandia Baru).

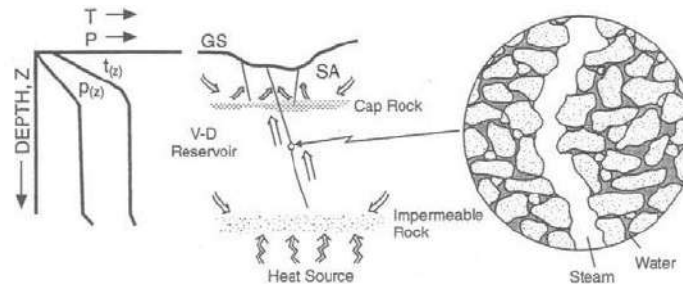
Ada dua jenis sistem dua fasa. yaitu:

1. Sistem dominan uap, yaitu sistem panas bumi yang sumurnya menghasilkan uap kering atau basah karena rongga batuan pada reservoir sebagian besar terisi uap panas. Dalam sistem yang didominasi uap, air diperkirakan mengisi pori-pori batuan, sedangkan uap mengisi rongga, saluran terbuka, atau retakan. Karena jumlah air yang terkandung dalam pori-pori relatif kecil, saturasi air pada sama dengan atau sedikit lebih besar dari saturasi air gabungan (S_{wc}) pada , dan air terperangkap dan terangkut dalam pori-pori batu.



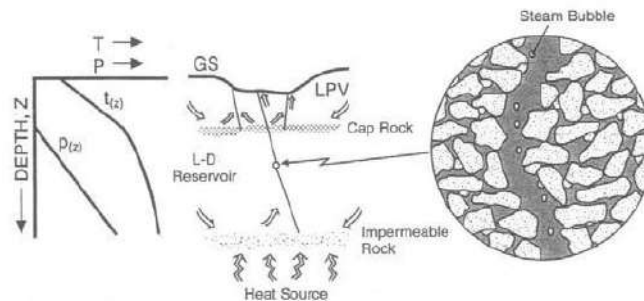
Gambar 2.6 Jenis-jenis Energi Panasbumi

Lapangan Kamojang dan Darajat masuk dalam kategori ini karena sumur umumnya menghasilkan uap kering. Di lapangan Kamojang, 35% batuan reservoir diperkirakan mengandung air (saturasi air = 35%), dan rongga lainnya mengandung uap. Selain itu, di Lapangan Darajat diperkirakan 33 batuan reservoir mengandung air di dalam sistem dominasi uap tekanan dan temperatur umumnya relatif tetap terhadap kedalaman seperti diperlihatkan pada Gambar



Gambar 2.7 Sistem Dominasi Uap

2. Sistem yang didominasi air adalah sistem panas bumi , dimana sumur menghasilkan fluida dua fasa berupa campuran uap air. Dalam sistem yang didominasi air, air dianggap mengisi rongga dan membuka saluran serta retakan. Lapangan Awibengkok termasuk dalam lapangan jenis ini karena umumnya merupakan sumur penghasil uap dan air. Seperti dapat dilihat dari Gambar, Profil tekanan dan suhu bervariasi secara signifikan terhadap kedalaman.



Gambar 2.8 Sistem Dominasi Air

Dalam sistem berbasis air, baik tekanan maupun suhu tidak konstan terhadap kedalaman. Dibandingkan dengan suhu reservoir minyak, suhu reservoir panas bumi relatif sangat tinggi, dan dapat mencapai 350 °C. Hochstein (1990) mengklasifikasikan sistem panas bumi menjadi tiga jenis berdasarkan suhu:

- Sistem panas bumi suhu rendah, yaitu sistem yang reservoirnya berisi fluida dengan suhu di bawah 125 °C.
- Sistem/reservoir mesofilik, yaitu sistem yang reservoir berisi cairan dengan suhu antara 125 °C dan 225 °C.
- Sistem/reservoir suhu tinggi, yaitu sistem dimana reservoir berisi cairan dengan suhu di atas 225 °C.

Sistem panas bumi juga sering diklasifikasikan berdasarkan entalpi fluida: sistem entalpi rendah, entalpi sedang, dan sistem entalpi tinggi. Kriteria yang dijadikan dasar klasifikasi sebenarnya bukan berdasarkan nilai entalpi, melainkan berdasarkan suhu, mengingat entalpi merupakan fungsi suhu, klasifikasi sistem panas bumi yang umum digunakan tercantum dalam tabel berikut.

Klasifikasi Sistem Panasbumi
Berdasarkan Temperatur

	Muffer & Cataldi (1978)	Benderiter & Corny (1990)	Haenel, Rybach & Stegna (1988)	Hochstein (1990)
Sistim panasbumi entalphi rendah	<90°C	<100°C	<150°C	<125°C
Sistim panasbumi entalphi sedang	90-150°C	100-200°C	-	125-225°C
Sistim panasbumi entalphi tinggi	>150°C	>200°C	>150°C	>225°C

C. Sistem Panasbumi di Indonesia

Karakteristik lanskap panas bumi Indonesia digambarkan oleh Budihardi (1998) sebagai berikut: Daerah panas bumi di sepanjang jalur kebakaran Gunung Api di Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara, Maluku, dan ujung utara Sulawesi umumnya mengalami suhu tinggi yang signifikan terkait dengan aktivitas

gunung api muda. Di wilayah ini, eksplorasi panas bumi dapat dibagi menjadi dua kategori. Salah satunya adalah eksplorasi panas bumi yang terkait dengan gunung berapi yang saat ini aktif (baru-baru ini), dan yang lainnya adalah eksplorasi panas bumi yang terkait dengan gunung berapi Kuarter yang tidak lagi aktif.

- Prospek panas bumi yang terkait dengan gunung berapi yang aktif saat ini umumnya memiliki suhu tinggi, tingkat gas magmatik yang cukup tinggi, dan permeabilitas bawah permukaan yang relatif rendah. Area eksplorasi tidak luas dan hanya terbatas di sekitar kawah.
- Kategori kedua dari prospek panas bumi yang terkait dengan aktivitas gunung berapi Kuarter menunjukkan prospek lapisan penutup yang luas dan permeabilitas reservoir yang lebih besar yang disebabkan oleh pengembangan struktur geologi yang matang.

Survei pengintaian yang dilakukan Pertamina di hampir seluruh wilayah panas bumi di Indonesia menunjukkan hal-hal sebagai berikut:

- Sistem panas bumi yang terkait dengan gunung berapi yang berumur kurang dari 400.000 tahun umumnya memiliki cukup panas untuk mengoperasikan pembangkit listrik komersial (bersuhu tinggi).
- Prospek panas bumi yang terkait dengan gunung berapi tua umumnya menunjukkan suhu $<200^{\circ}\text{C}$

Di wilayah lain seperti Sulawesi Tengah, Tenggara, Sulawesi Selatan, dan Irian Jaya, fenomena termal permukaan disebabkan oleh sumber panas yang dipanaskan oleh sistem vulkanik purba atau dihasilkan oleh energi mekanik dari sesar yang berasal dari air hujan yang dipanaskan. Prospek panas bumi yang terkait dengan sistem ini ditandai dengan suhu fluida reservoir rendah.

Dari sistem panas bumi yang ada di Indonesia, dapat dibagi menjadi dua kategori: sistem berbasis uap dan sistem berbasis hidrotermal.

Sistem dominasi uap adalah sistem yang sangat jarang terjadi ketika kandungan fase uap reservoir panas bumi lebih dominan dibandingkan dengan fase air. Biasanya retakan tersebut terisi uap, dan pori batuan tersebut masih mengandung air. Reservoir air hangatnya biasanya berada meter di bawah reservoir yang didominasi uap.

Dua lapangan yang terbukti menganut sistem aturan uap adalah ladang Kamojang dan Darajat, keduanya terletak di Pulau Jawa. Kedua lapangan panas bumi ini dicirikan oleh suhu reservoir (Kamojan) antara 230 °C dan 246 °C dan antara 230 °C dan 250 °C (Darajat), dan kedalaman puncak rata-rata reservoir panas bumi Kamojang adalah 800 m hingga 1200 m. terletak kurang lebih 700 meter hingga 1000 meter dari lapangan Darajat.

Secara umum, reservoir yang didominasi uap di Indonesia memiliki suhu reservoir yang hampir seragam antara 230 °C dan 250 °C, dan kedalaman reservoir bagian atas yang relatif dangkal yaitu 700 m hingga 1200 m. Kita dapat menyimpulkan bahwa reservoir tersebut jauh lebih dangkal dibandingkan lapisan yang berbasis air.

Sistem dominan air merupakan sistem panas bumi yang tersebar luas di seluruh dunia, dimana reservoirnya mengandung air dalam jumlah yang sangat besar, namun sering terjadi "mendidih" di bagian atas reservoir sehingga menyebabkan terbentuknya lapisan uap dengan temperatur dan tekanan yang tinggi.

Sistem tersebut mencakup lapangan panas bumi yang dikembangkan atau sedang dikembangkan, terdiri dari lapangan panas bumi sebagai berikut: Dieng, G. Salak, Patuha, Bali,

Karaha, Wayang Windu, Uluburu, Sibayak, dan Sarullah. Survei termal di wilayah lain di dunia menunjukkan sistem air panas.

Temperatur reservoir dalam sistem ini sangat bervariasi dan kenaikan tekanan dikendalikan oleh tekanan hidrostatik, seringkali mencapai lebih dari 300 °C reservoir biasanya diisi dengan air hidrotermal NaCl. Di area penyediaan air panas yang disebutkan di atas, suhu penyimpanan bervariasi antara 200 °C dan maksimum 347 °C. Sumur produksi yang masuk ke reservoir hidrotermal lapangan ini menghasilkan cairan dua fasa, sehingga diperlukan separator untuk memisahkan keduanya.

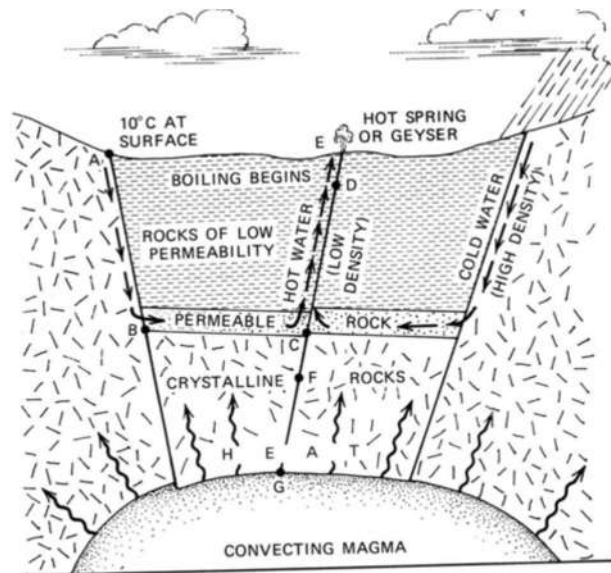
Air limbah yang dihasilkan diinjeksikan kembali ke dalam reservoir untuk alasan lingkungan dan untuk menjaga volume cairan di dalam reservoir. Kedalaman penyimpanan puncak wilayah panas bumi ini bervariasi antara 1000 dan 1500 m untuk wilayah panas bumi Sumatera (Sibayak, Sarula, Uruber), dan 1500 m untuk wilayah panas bumi di Jawa, Bali, dan Sulawesi 2500 m.

D. Model Sistem Panasbumi

Deskripsi sistem panas bumi (sistem hidrotermal) dalam suatu wilayah biasanya menggambarkan setidaknya lima komponen: sumber panas yang ditemukan di wilayah tersebut, reservoir dan suhunya, sumber air, dan fitur permukaan panas bumi yang dilakukan oleh Komponen lain yang terwakili dengan baik dalam model tersebut meliputi sebaran batuan di bawah permukaan serta jenis dan arah aliran air. Model sistem panas bumi yang disebut "model konseptual" dikembangkan berdasarkan hasil geologi, hidrologi, geofisika, geokimia dan analisis data sumur.

Setiap sistem hidrotermal mempunyai sifat yang unik, berbeda tidak hanya pada fitur permukaannya tetapi juga pada sifat reservoirnya. Keunikan setiap sistem merupakan hasil interaksi berbagai faktor, antara lain ukuran dan bentuk batuan sumber panas, struktur geologi, permeabilitas, topografi, dan hidrologi permukaan (suhu dan infiltrasi). Beberapa contoh model

sederhana ditunjukkan pada penjelasan dengan gambar dibawah ini.

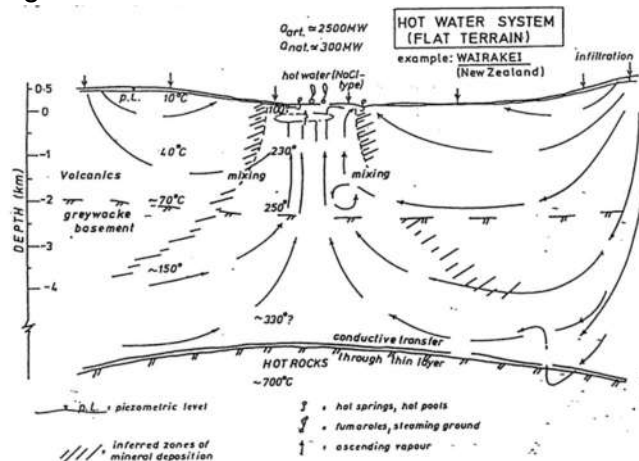


Gambar 2.9 Model Sistem Panasbumi dari White (1967)

Gambar 2.9 yang dengan jelas menggambarkan gagasannya tentang sirkulasi fluida dalam sistem hidrotermal. Dia berhipotesis bahwa fluida panas bumi berasal dari air permukaan (air meteor) mengalir ke batuan bawah permukaan melalui rekahan atau batuan permeabel. Di bawah air, batu panas menjadi panas saat Anda menyentuhnya. Karena air panas lebih ringan dibandingkan air dingin, maka air panas cenderung bergerak ke atas.

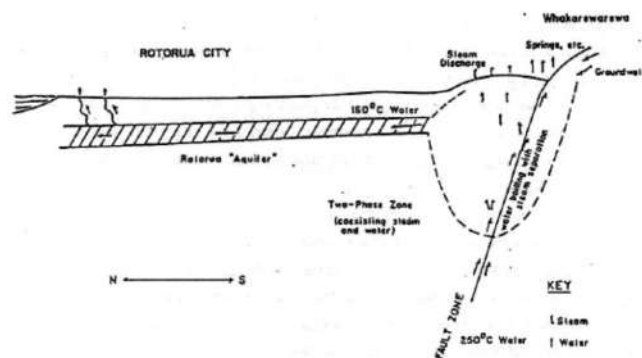
Jika struktur geologi memungkinkan, air mengalir melalui retakan dan batuan permeabel dan muncul di permukaan sebagai mata air panas seperti geyser. Perubahan fasa dapat terjadi di tengah jalan, yaitu ketika suhu air mencapai suhu jenuh atau titik didihnya. Jika ini terjadi, cairan menjadi campuran uap dan air. Jika suhu air lebih tinggi dari suhu saturasi pada kedalaman tertentu, hanya akan ada satu fase dalam sistem, yaitu fase uap. Teori di atas dengan jelas

menunjukkan bahwa fenomena panas bumi permukaan pada dasarnya merupakan ekspresi permukaan dari sistem konvektif yang sangat besar.



Gambar 2.10 Model Sistem Panasbumi di Lapangan Wairakei (Hochstein, 1981)

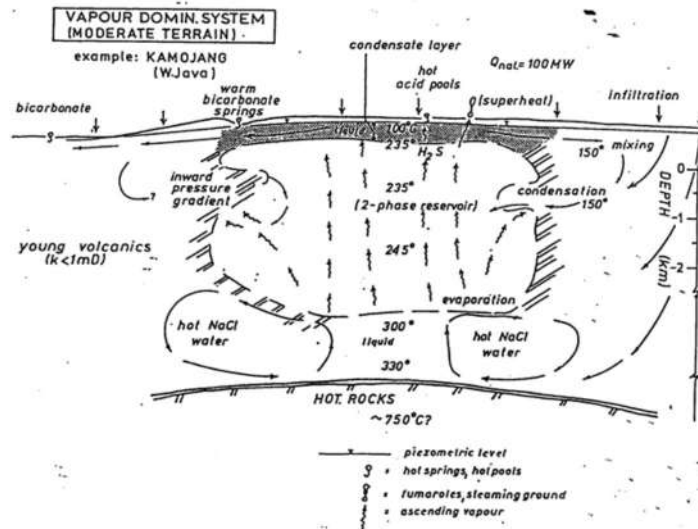
Gambar 2.10 menunjukkan model sistem panas bumi untuk ladang minyak Wairakei NZ, ladang minyak kedua di dunia, yang cairannya digunakan untuk menghasilkan listrik. Sistem panas bumi lokal adalah sistem yang didominasi air dengan suhu antara 220 - 230 °C.



Gambar 2.11 Model Sistem Panasbumi di Lapangan Rotorua-New Zealand (Donaldson & Grant, 1981)

Gambar 2.11 menunjukkan model sistem panas bumi untuk Rotorua (Selandia Baru) berdasarkan Donaldson & Grant (1981). Mereka memperkirakan sumber energi dan cairan panas bumi terletak di bawah tanah di kawasan Whakarewarewa, kawasan dengan jenis fitur permukaan berbeda. Suhu air hidrotermal di Waduk diperkirakan 230-250°C. Airnya bergerak ke atas dan berputar secara horizontal di bawah kota Rotorua, namun ada juga yang terus bergerak ke atas melalui celah-celah dan muncul sebagai geyser, sumber air panas, area beruap dll di area yang disebut Whakarewarewa.

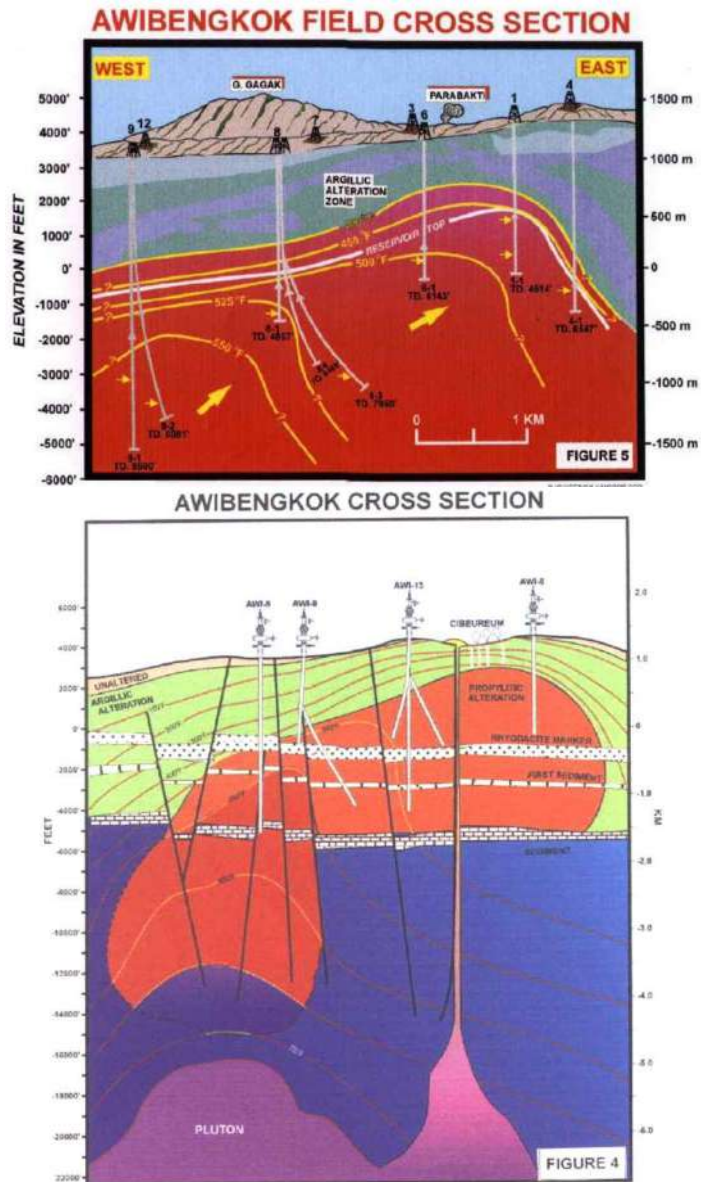
Sejak tahun 1900 penduduk kota Rotorua telah menggunakan air panas bumi untuk mencuci, mandi dan memasak, serta untuk air panas dan pemanas ruangan di rumah dan hotel mereka. Sekitar 1000 sumur telah dibor di Rotorua pada kedalaman 150 hingga 200 meter. Sebelum tahun 1980, tidak ada undang-undang yang mengatur pengeboran sumur dan penggunaan cairan panas bumi di kota tersebut, sehingga sumur tersebut menembus kisaran suhu air sekitar 100 hingga 150 °C. Sejak pertengahan tahun 1980an, pemerintah secara bertahap menutup sejumlah sumur pertambangan di kota tersebut, karena kelebihan produksi cairan panas bumi sejak awal abad ke-20 telah mengurangi aktivitas beberapa geyser di lokasi yang sering dikunjungi dipimpin. Saat ini, Kota Rotorua yang berpenduduk jiwa hanya memiliki 200 sumur produksi.



Gambar 2.12 Model Model Sistem Panasbumi di Lapangan Kamojang (Hochstein, 1975)

Gambar 2.12 menunjukkan sistem panas bumi di wilayah Kamojang. sumur yang dibor di wilayah ini menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Area merupakan sistem yang didominasi uap dengan suhu antara 235-245 °C.

Dari data analisis jenis batuan dan air, Hochstein (1975) memperkirakan terdapat lapisan air terkondensasi yang cukup tebal di ujung atas waduk, dengan kedalaman sekitar 150–500 m. Ketebalan lapisan ini bervariasi, namun biasanya sekitar 350 hingga 650 μm , kecuali di daerah dengan fenomena panas bumi, dimana lapisan kondensat hanya setebal 150 hingga 180 μm . Suhu lapisan bawah adalah 100–230°C. Sistem panas bumi di wilayah Darajat (kurang lebih 10 km dari Kamojan) juga merupakan sistem berbasis uap. Suhu reservoir juga kurang lebih sama yaitu antara 235–247 °C. Jenis kenampakan panas bumi yang terdapat pada kawasan ini adalah fumarol, sumber air panas yang bersifat asam dengan kandungan SO_4^{2-} tinggi, serta sumber air panas yang mengandung HCO_3^- dan SO_4^{2-} dalam jumlah tinggi.



Gambar 2.13 Model Sistim Panasbumi di Lapangan Awibengkok Gunung Salak (Gunung Salak Geothermalroject Guide Book, 1996)

Dua gambar diatas menunjukkan model sistem panas bumi di lapangan Sarak Awibengkok Gunung. Sumur yang dibor di area ini menunjukkan bahwa sistem panas bumi di Lapangan merupakan sistem berbasis air dengan suhu berkisar antara 220-315 °C

Seperti ditunjukkan pada Gambar-gambar model sistem panasbumi sebelumnya, setiap sistem termal memiliki berbagai karakteristik unik, namun menurut Henley dan Ellis (1983), sistem hidrotermal suhu tinggi pada dasarnya memiliki dua model prototipe sistem hidrotermal model. Hal ini terjadi di daerah datar (datar) dan daerah pegunungan (pegunungan). Pada sistem hidrotermal di daerah dangkal, air berasal dari permukaan (air meteor). Suhu tinggi yang mengandung sejumlah kecil air, klorin, gas, dan ion terlarut lainnya diekstraksi dari magma bawah tanah. Pemisahan fasa gas yang terjadi di dekat permukaan bumi mengakibatkan terbentuknya fumarol di permukaan bumi. Pencampuran air kondensat (hasil kondensasi uap air) dan air tanah membentuk air sulfat dan air bikarbonat. Pencampuran berbagai jenis air pada kedalaman dangkal menghasilkan air dengan komposisi yang sangat berbeda. Limpasan atau air hidrotermal (mata air panas) yang muncul ke permukaan adalah air klorida, dan jarang sekali air bikarbonat . Contoh sistem jenis ini adalah sistem Panasbuni di Taupo Volcanic Zone, Selandia Baru. Pada dasarnya proses yang terjadi pada sistem hidrotermal di wilayah pegunungan adalah sama.

Perbedaan utamanya adalah mata air klorida biasanya terdapat beberapa kilometer jauhnya dari bagian utama sistem panas bumi (terutama di cekungan upwelling panas). Letak bagian utama sistem antara lain ditunjukkan oleh fumarol dan alterasi batuan. Contoh sistem ini adalah sistem panas bumi Tongonan, Palipinon, Bacon Manito (Filipina), dan Ahuachapan di El Sabador. Dari sudut pandang iklim, kedua model ini cocok untuk sistem yang terjadi di wilayah dengan curah hujan tinggi, seperti Selandia Baru, Indonesia, dan Filipina.

BAB III

PEMANFAATAN FLUIDA PANAS BUMI

A. Fluida Panas Bumi Untuk Pembangkit Listrik

Sebelum abad ke-20, cairan panas bumi hanya digunakan untuk mandi, mencuci, dan memasak. Saat ini, penggunaan fluida panas bumi telah menjadi sangat terdiversifikasi untuk pembangkit listrik dan keperluan lain di sektor non-listrik, yaitu pemanas ruangan, rumah kaca, ladang pertanian, pengeringan hasil pertanian dan peternakan, serta pengeringan kayu. Bab ini menjelaskan berbagai kegunaan dari fluida panas bumi.

Fluida panas bumi bersuhu tinggi ($>225^{\circ}\text{C}$) telah lama digunakan untuk pembangkit listrik di beberapa negara. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, dengan berkembangnya teknologi, penggunaan cairan panas bumi bersuhu sedang ($150\text{--}225^{\circ}\text{C}$) menjadi mungkin untuk pembangkit listrik.

Selain suhu, faktor-faktor berikut biasanya dipertimbangkan ketika menentukan apakah sumber daya panas bumi cocok untuk digunakan sebagai pembangkit listrik:

1. Karena sumber daya ini mempunyai kapasitas penyimpanan panas atau panas yang besar, mampu menghasilkan uap dalam waktu yang cukup lama, kurang lebih 25 hingga 30 tahun.
2. Karena sumber daya panas bumi menghasilkan cairan dengan pH mendekati netral, laju korosi relatif rendah dan peralatan produksi tidak cepat terkorosi. Selain itu, cairan cenderung membentuk skala yang relatif kecil.
3. Reservoirnya tidak terlalu dalam, biasanya kedalamannya tidak lebih dari 3 km.
4. Sumber daya panas bumi terletak pada wilayah yang relatif mudah dijangkau.
5. Sumber daya panas bumi terdapat pada wilayah yang potensi terjadinya letusan hidrotermal relatif rendah. Produksi cairan panas bumi dapat meningkatkan kemungkinan letusan hidrotermal.

Negara pertama yang menggunakan uap panas bumi untuk menghasilkan listrik adalah Italia. Sumur di lokasi menghasilkan uap panas kering, yang sangat cocok untuk pembangkit listrik. Pusat Panas Bumi (PLTP) pertama dibangun pada tahun 1913 di Larderello dengan kapasitas terpasang 250 kW. Pada tahun 1940, kapasitas listrik PLTP ditingkatkan menjadi 130 MW. PLTP pertama di dunia sempat hancur pada Perang Dunia II, namun kemudian dibangun kembali dengan kapasitas 500 MW. Selandia Baru adalah negara kedua yang menggunakan cairan panas bumi di pembangkit listriknya.

PLTP kedua di dunia terletak di Wairakei dan dikembangkan secara bertahap antara tahun 1958 dan 1963, sehingga fasilitas pembangkit PLTP Wairakei berkapasitas 192 MW. Berbeda dengan sumur di lapangan Larderello Italia yang menghasilkan uap kering (*dry steam*), sumur di lapangan Wairakei menghasilkan fluida dua fasa yaitu uap air. Uap dan air dari sumur produksi dipisahkan di separator dan uap dialirkan ke turbin untuk menghasilkan listrik. Amerika Serikat mulai menggunakan energi panas bumi antara tahun 1960 dan 1970. Lapangan Geyser dikembangkan dan uapnya digunakan untuk menghasilkan listrik. Kapasitas daya terpasang PLTP ini sangat besar yakni 1000MW. Mirip dengan ladang Larderello, sumur di ladang Geyser juga menghasilkan uap kering. Cairan panas bumi umumnya hanya digunakan untuk pembangkit listrik di negara lain setelah tahun 1979. Karena meningkatnya permintaan energi dan kenaikan harga minyak, terutama pada tahun 1973 dan 1979, negara lainnya mengurangi ketergantungan mereka pada minyak dengan metode pemanfaatan cairan panas bumi.

Hal ini dibuktikan dengan peningkatan kinerja sistem panas bumi pada tahun-tahun berikutnya. Sejak tahun 1979 hingga akhir tahun 1986, kapasitas energi panas bumi global meningkat dari 1759 MW menjadi 4733 MW. Namun seperti halnya eksplorasi minyak bumi, pengembangan sumber daya panas bumi memerlukan modal yang besar dan mempunyai risiko yang

tinggi, sehingga saat ini banyak negara yang belum mengembangkan sumber daya panas bumi. Sumber daya panas bumi biasanya terletak di daerah pegunungan yang sulit diakses.

Di negara-negara yang mempunyai sumber energi lain, sumber daya panas bumi harus bersaing ketat dengan sumber energi lain. Di Indonesia, upaya eksplorasi sumber energi panas bumi pertama kali dilakukan pada tahun 1918 di dekat kawah Kamojang. Antara tahun 1926 dan 1929 telah dilakukan pengeboran lima sumur eksplorasi sebanyak buah, dan hingga saat ini salah satunya, yaitu sumur KMJ-3, masih menghasilkan panas kering atau uap kering.

Pecahnya Perang Dunia pada tahun dan Perang Kemerdekaan Indonesia mungkin menjadi salah satu penyebab terhentinya kegiatan eksplorasi di kawasan ini pada tahun .Karena kekurangan dana, kegiatan eksplorasi panas bumi di Indonesia baru dimulai pada tahun 1972. Otoritas Gunung Api Pertamina, dengan dukungan pemerintah Perancis dan Selandia Baru, melakukan survei pendahuluan di seluruh Indonesia. Menurut studi tersebut, Indonesia memiliki 217 proyek panas bumi di sepanjang jalur vulkanik, dimulai dari Sumatera bagian barat, proyek mencapai Jawa, Bali, dan Nusa Tenggara, serta ke utara hingga Maluku dan Sulawesi.

Sumber daya panas bumi yang ditemukan di Indonesia mempunyai potensi yang besar jika dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik karena umumnya merupakan sistem hidrotermal dengan suhu tinggi ($>2250^{\circ}\text{C}$). Hanya di antaranya yang bersuhu sedang ($150\text{--}2250^{\circ}\text{C}$). Indonesia memiliki banyak ladang panas bumi yang menjanjikan, namun hanya sedikit yang dikembangkan dalam skala besar dan cairannya digunakan untuk menghasilkan listrik. Pembangkit tersebut antara lain Kamojang (140 MWe), Awibengk Sarak (330 MWe), Darajat (55 MWe), dan Lapangan Wayan Windu (110 MWe). Selain itu, terdapat dua PLTP kecil berkapasitas MWe, satu berkapasitas

2,5 MWe yang berlokasi di lapangan Lahendong (provinsi Sulawesi Utara) dan satu lagi berkapasitas 2,5 MWe yang berlokasi di lapangan Sibayak (provinsi Sulawesi Utara). Itu adalah pembangkit listrik Sumatra).

Perkembangan proyek energi panas bumi di Indonesia relatif lambat, apalagi Indonesia memiliki banyak sumber energi lain seperti air, minyak, gas, dan batu bara yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik. Selain itu, harga listrik dari uap panas bumi dinilai lebih mahal, apalagi jika dibandingkan dengan harga listrik dari batu bara. Pakar energi panas bumi meyakini hal ini terjadi karena biaya penanganan polusi batu bara tidak diperhitungkan. Karena dampak polusi dari batubara lebih besar dibandingkan dengan energi panas bumi, maka harga listrik dari energi panas bumi menjadi kompetitif dan bahkan lebih rendah dibandingkan harga listrik dari batubara jika biaya penanganan polusi juga diperhitungkan. Harga listrik dari panas bumi kalah bersaing dengan harga listrik dari minyak tanah yang masih bersubsidi.

Energi panas bumi yang relatif ramah lingkungan dan tersebar luas di seluruh kepulauan Indonesia (kecuali Kalimantan), ternyata merupakan salah satu sumber energi yang cocok digunakan untuk pembangkit listrik di masa depan, guna memenuhi sebagian kebutuhan listrik dalam negeri yang terus meningkat satu.

Jenis Sistem Tenaga Panas Bumi Fluida

Panas bumi yang dilepaskan ke permukaan bumi mengandung energi panas yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Hal ini dimungkinkan oleh sistem konversi energi fluida panas bumi (*Geothermal Power Cycle*) yang mengubah energi panas dari fluida menjadi energi listrik.

Pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP) pada dasarnya sama dengan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), hanya saja pada PLTU uap dihasilkan di permukaan bumi dengan

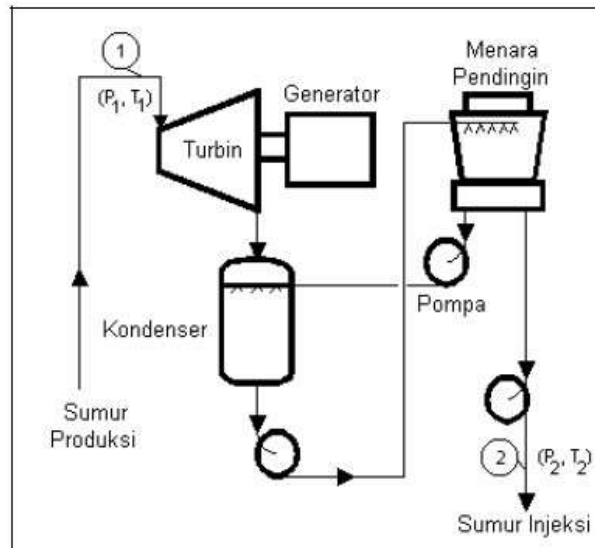
menggunakan boiler, sedangkan pada PLTP uap dihasilkan dalam penyimpanan panas bumi. Perbedaannya adalah karena disuplai dari lapisan. Ketika fluida kepala sumur berada dalam fasa gas, uap langsung dialirkan ke turbin, yang mengubah energi panas bumi menjadi energi kinetik dan memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik.

Ketika fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa (fasa gas dan cair), terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan di dalam fluida tersebut. Hal ini dimungkinkan dengan melewati cairan melalui pemisah untuk memisahkan fase uap dari fase cair. Sebagian uap yang dihasilkan di separator dikirim ke turbin. Banyak sistem pembangkit listrik tenaga fluida panas bumi telah diterapkan di lapangan, termasuk:

- a. *Direct Dry Steam*
- b. *Separated Steam*
- c. *Single Flash Steam*
- d. *Double Flash Steam*
- e. *Multi Flash Steam*
- f. *Brine/Freon Binary Cycle*
Brine/Isobutane Binary Cycle
- g. *Combined Cycle*
- h. *Hybrid/fossil-geothermal conversion system*

Siklus Uap Kering (*Direct Dry Steam Cycle*)

Tergantung pada tekanan dan suhu, fluida panas bumi dapat berada dalam fase cair, fase uap, atau campuran keduanya. Jika fluida kepala sumur berada dalam fasa uap, maka uap dapat langsung dialirkan ke turbin. Turbin mengubah energi panas bumi menjadi energi mekanik, yang memutar generator untuk menghasilkan energi listrik.

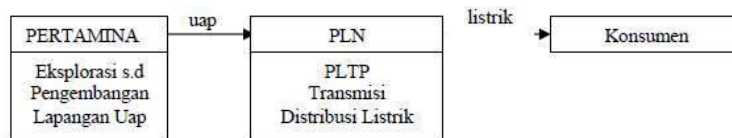


Gambar 3.1 Skema Instalasi Pembangkit Listrik Uap Kering.

Sistem konversi uap kering ke cair merupakan sistem konversi yang paling sederhana dan hemat biaya. Uap dari turbin dibuang ke atmosfer (turbin pembuangan atmosfer) atau dikirim ke kondensor untuk dikondensasi (turbin kondensasi). Dari kondensor, air yang terkondensasi dialirkan ke menara pendingin atau menara pendingin dan diinjeksikan ke bawah tanah. Sekitar dua kali air kondensasi ini dialirkan ke kondensor.

Pembangkit listrik yang menggunakan turbin gas buang atmosferik menggunakan listrik sekitar dua kali lebih banyak per kilowatt (pada tekanan masuk yang sama), sehingga banyak energi dan biaya yang terbuang. Output daya pembangkit listrik Kamojang pada dasarnya sama seperti pada. Hal ini dikarenakan sumur di ladang minyak Kamojang menghasilkan uap kering (suhu di reservoir 240 °C). Blok I berkapasitas 30 MW dioperasikan pada tanggal 7 Februari 1983. Unit II dan III masing-masing 55 MW diresmikan masing-masing pada tanggal 29 Juli 1987 dan 13 September 1987 sehingga menambah total kapasitas terpasang PLTP Kamojang menjadi 140 MW. Pengembangan ladang Camojan terus

berlanjut. Produksi uap dari 26 sumur dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan uap PLTP Kamojang. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi Kamojang Pola usaha Unit 1 sampai dengan 3 adalah sebagai berikut:

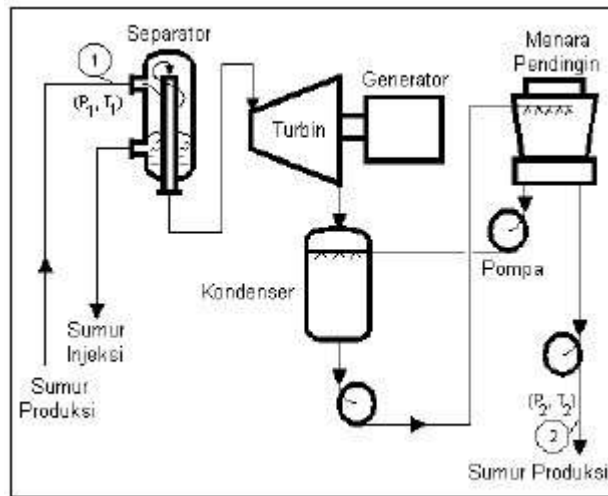


Proses pembangkitan tenaga listrik di ladang minyak Darajat yang terletak sekitar 10 km dari ladang minyak Kamojang pada dasarnya sama dengan proses produksi uap kering (suhu penyimpanan 235-2470 °C) dari sumur ladang minyak . Pengembangan ladang minyak Darajat dimulai pada tahun 1984 dengan ditandatanganinya Perjanjian Operasi Bersama antara pemerintah Indonesia dan Amoseas Ltd. PLTP Darajat mulai beroperasi pada September 1994 dengan kapasitas terpasang 55 MW.

Siklus Uap Hasil Pemisahan (*Separated Steam Cycle*)

Ketika fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran dua fluida fasa (fasa gas dan cair), terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan di dalam fluida. Hal ini dimungkinkan dengan melewati cairan melalui pemisah untuk memisahkan fase uap dari fase cair. Sebagian uap yang dihasilkan di separator dikirim ke turbin. Karena uap yang digunakan dipisahkan , maka sistem konversi energi ini disebut siklus uap terpisah .

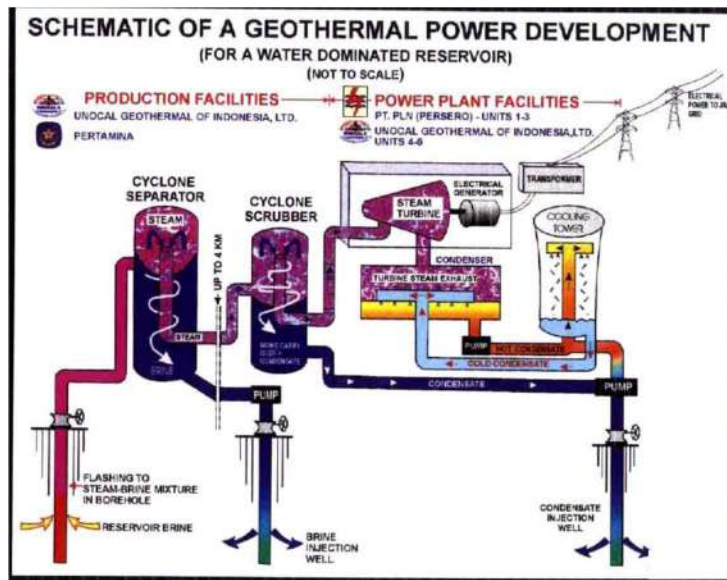
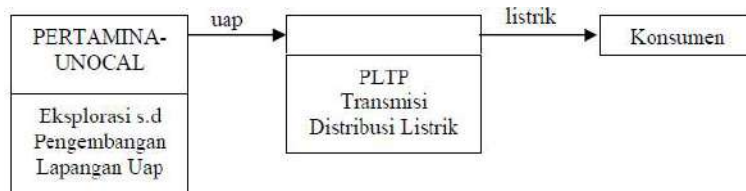
Gambar dibawah ini menunjukkan proses pembangkitan listrik dari lapangan panas bumi yang menghasilkan fluida dua fasa, campuran uap dan air. Fluida dari sumur dipisahkan menjadi fase uap dan air di separator, uap dikirim ke turbin, dan air diinjeksikan ke bawah tanah.



Gambar 3.2 Skema Diagram Pembangkit Listrik Untuk Fluida Dominasi Air

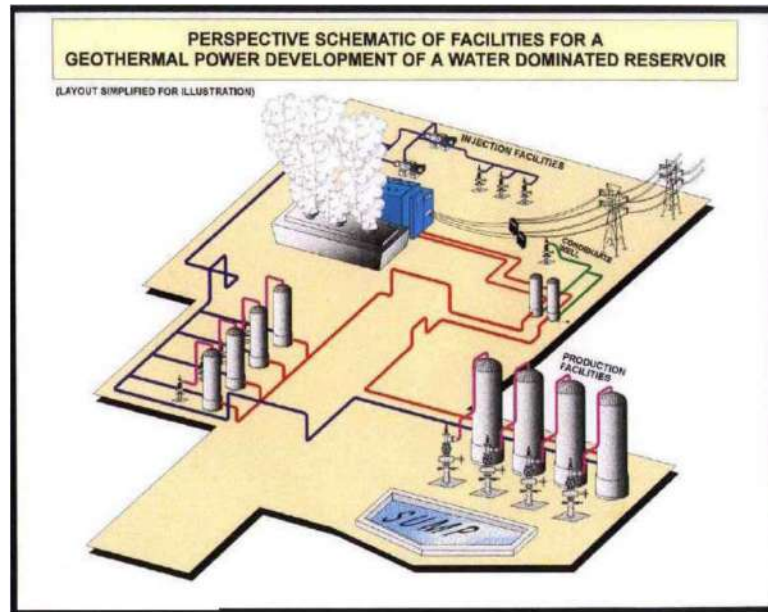
Proses pembangkitan listrik di lapangan Awibengkok-Gunung Sarak pada dasarnya sama, yaitu sumur-sumur di dalam lapangan tersebut menghasilkan fluida dua fase yaitu uap dan air (suhu reservoir 220-2300°C). Pembangunan PLTP di pembangkit listrik ini dimulai pada tahun 1990. Unit pertama PLTP Gunung Sarak sebanyak dengan kapasitas terpasang 55 MW dan mulai beroperasi pada Maret 1994. Sedangkan unit kedua juga sebanyak unit dengan kapasitas terpasang 55 MW. hanya unit yang ditugaskan pada bulan Juni 1994. Kapasitas pembangkit listrik PLTP yang terpasang di Gunung Sarak ditingkatkan menjadi 330 MW. Unit 3, 4, 5, dan 6 Pembangkit masing-masing berkapasitas 55 MWe.

Pola pemanfaatan panas bumi pada blok 1 s/d 3 Blok Awibengkok adalah sebagai berikut:

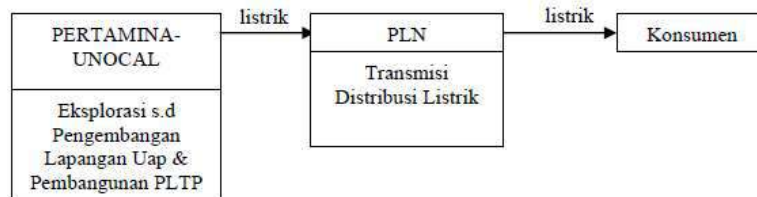


Gambar 3.3 Skema Diagram Pembangkit Listrik di Lapangan Awibengkong-Gunung Salak

Sedangkan untuk unit 4 s.d 6 adalah sebagai berikut:

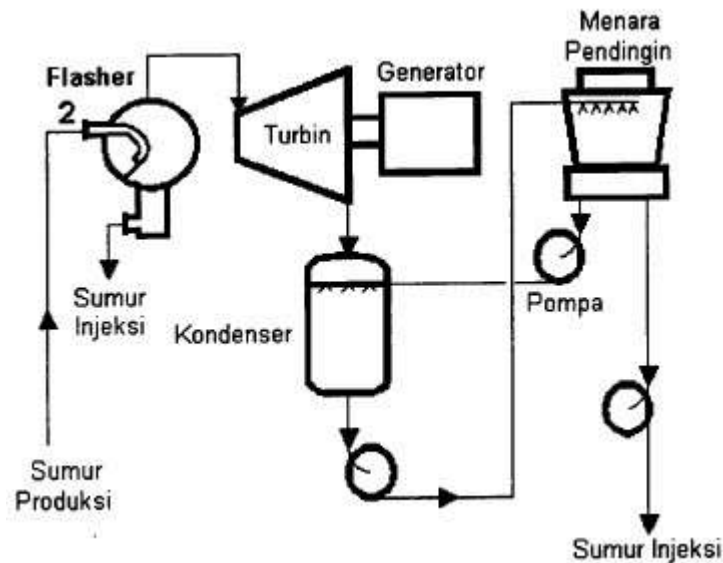


*Gambar 3.4 Skema Fasilitas Produksi di Lapangan
Awibengkok-Gunung Salak*



Siklus Uap Hasil Penguapan (*Single Flash Steam*)

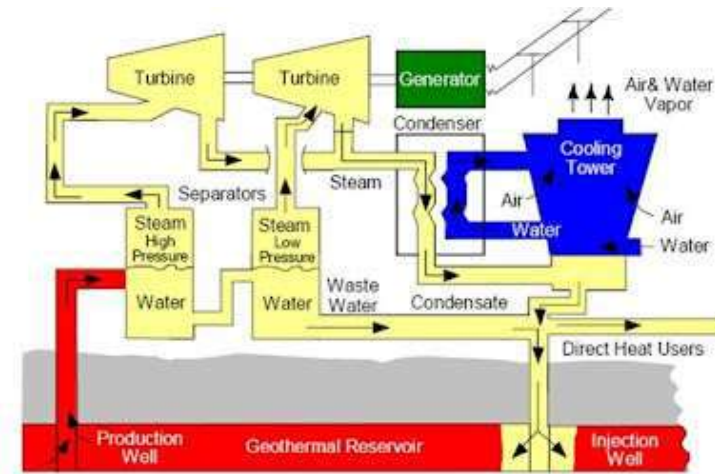
Sistem ini digunakan ketika fluida kepala sumur jenuh dengan air (fluida jenuh). Cairan tersebut dikirim ke flasher untuk menguap. Banyaknya uap yang dihasilkan bergantung pada tekanan flasher. Uap yang dihasilkan dialirkan ke turbin.



Gambar 3.5 Skema Diagram Pembangkit Listrik dengan Siklus "Single Flash Steam"

Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan (*Double Flash Steam*)

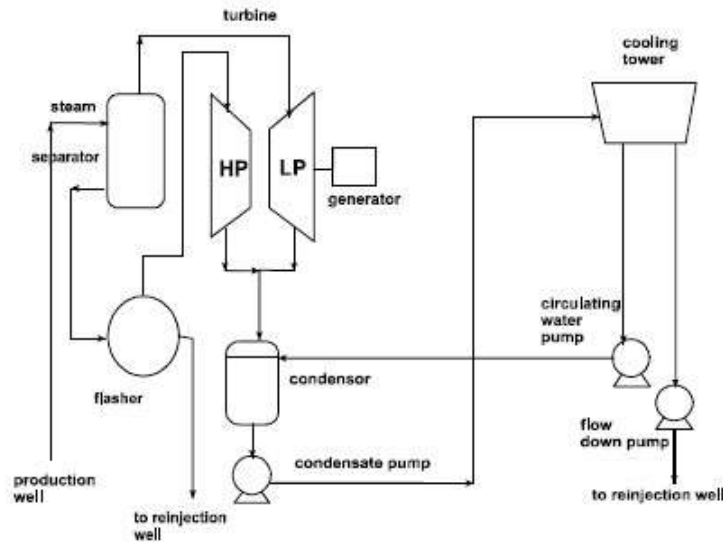
Sistem ini menggunakan dua pemisahan cairan, separator dan flasher, serta konfigurasi dengan dua turbin, turbin HP dan turbin LP, disusun secara tandem (ganda), seperti pada gambar. Contoh ladang yang menggunakan sistem konversi seperti antara lain Hatchobara (Jepang) dan Krafla (Islandia).



Gambar 3.6 Skema Diagram Pembangkit Listrik dengan Siklus Double Flash Steam

Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan dengan Dua Turbin Terpisah (*Flashing Multi Flash Steam*)

Sistem konversi energi ini mirip dengan sistem double-flash, hanya saja kedua turbin dengan tekanan berbeda ditempatkan terpisah. Uap bertekanan tinggi bersuhu yang mengandung air dipisahkan dalam separator sehingga diperoleh uap kering yang digunakan untuk menggerakkan turbin bertekanan tinggi. Turbin mengubah energi panas bumi menjadi energi kinetik, yang memutar generator menghasilkan energi listrik. Suhu dan tekanan air yang dipisahkan di separator lebih rendah dibandingkan kondisi fluida di kepala sumur. Air ini dikirim ke flasher untuk menghasilkan uap. Uap yang dihasilkan dikirim ke turbin bertekanan rendah dan sisa air dikirim ke kondensor.

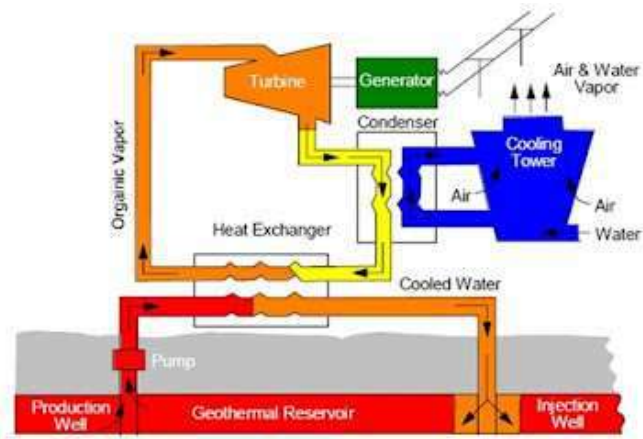


Gambar 3.7 Skema Diagram Pembangkit Listrik Untuk Sistem Multi Flash Steam

Binary Cycle

Umumnya fluida panas bumi yang digunakan untuk pembangkit listrik adalah fluida dengan suhu 200°C , namun dimungkinkan juga untuk menghasilkan listrik secara tidak langsung dengan memanaskan bahan organik dengan fluida panas bumi bersuhu sedang ($100\text{--}200^{\circ}\text{C}$). Dalam kasus cairan dengan titik didih rendah, Uap dari cairan organik ini digunakan untuk menggerakkan bilah turbin dan menghasilkan listrik.

Fluida organik dipanaskan oleh fluida panas bumi melalui alat penukar panas atau heat exchanger. Oleh karena itu, fluida panas bumi tidak digunakan secara langsung dan hanya panas yang diekstraksi sedangkan fluida itu sendiri diinjeksikan ke dalam reservoir. Dua bidang yang menggunakan siklus konversi energi jenis ini adalah Palantuka, Semenanjung Kamchatka (USSR), dan Otake (Jepang). Lapangan Lahendon juga memiliki pembangkit listrik tenaga panas bumi biner berkapasitas 2,5 MW.

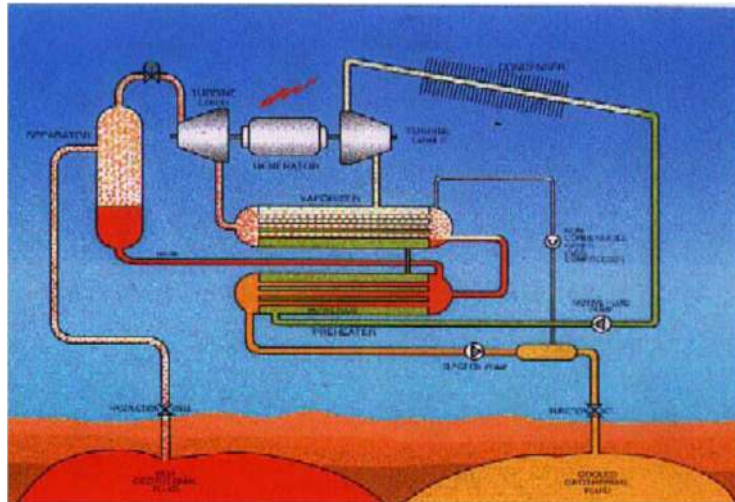


(Source: Geo-Heat Center, Alyssa Kagel, 2008)

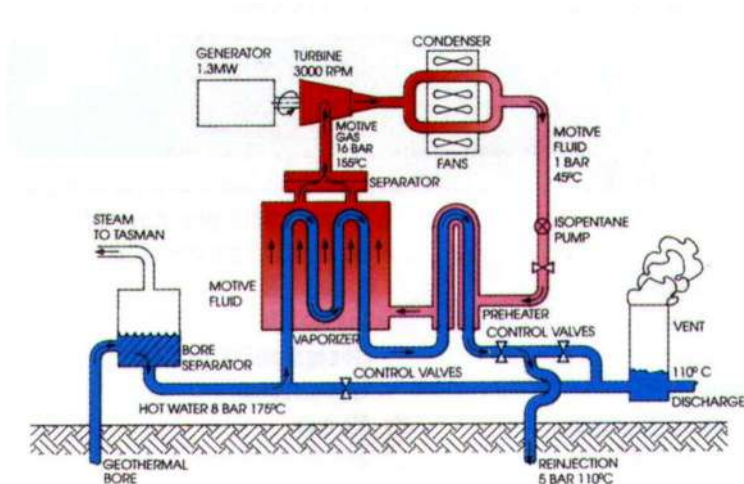
Gambar 3.8 Skema Diagram Pembangkit Listrik Untuk Sistem Binary Cycle

Combined Cycle

Seperti ditunjukkan pada kedua gambar dibawah ini sistem siklus gabungan digunakan untuk pembangkit listrik di beberapa industri guna meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi panas bumi. Fluida panas bumi dari lubang bor dipisahkan fasanya dalam pemisah. Uap hasil separator dikirim ke PLTP (Turbin I) sebelum cairan diinjeksikan ke dalam reservoir , dimana cairan tersebut digunakan untuk memanaskan cairan organik yang titik didihnya rendah. Uap dari cairan organik digunakan untuk menggerakkan turbin (Turbin II).



Gambar 3.9 Skema Diagram Pembangkit Listrik Untuk Sistim Combined Cycle dari Ormat



Gambar 3.10 Skema Diagram Pembangkit Listrik Untuk Sistim Siklus Kombinasi

Well Head Generating Unit

Dalam beberapa tahun terakhir, unit pembangkit kepala sumur yang dikenal sebagai "well head generating unit" semakin banyak digunakan di lapangan. Sesuai dengan namanya ,

perangkat ini dipasang di dekat kepala sumur. Ada dua tipe unit pembangkit kepala sumur yaitu:

1. Turbin tekanan balik atau turbin tanpa kondensor (*exhaust atmosferik*). Turbin ini tidak dilengkapi kondensor. Uap dari lubang sumur atau pemisah dikirim langsung ke turbin, digunakan untuk menghasilkan listrik, dan kemudian dilepaskan langsung ke atmosfer. Unit pembangkitan jenis ini sering disebut sebagai "monoblok".
2. Turbin dengan kondensor (unit kondensor). Turbin ini dilengkapi dengan kondensor. Uap yang keluar dari turbin diubah menjadi kondensat di kondensor.

Unit pembangkit kepala sumur atau unit pembangkit kepala sumur banyak digunakan karena alasan berikut:

1. Unit produksi kepala sumur dapat dioperasikan lebih cepat yaitu dalam waktu kurang dari 1-2 bulan. Sedangkan "Sistem pusat", sebaliknya, biasanya hanya bertahan 6 hingga 7 tahun sejak pengeboran awal
2. Penyebaran unit pembangkit listrik lubang bor berkapasitas kecil akan memungkinkan perusahaan swasta di negara ini untuk berpartisipasi dalam proyek energi panas bumi.
3. Dengan menggunakan unit pembangkit listrik yang lebih kecil, investor dapat memperoleh kembali dananya lebih cepat. Hal ini disebabkan oleh alasan pertama yang disebutkan di atas: unit genset berkapasitas lebih kecil memerlukan waktu pemasangan lebih sedikit dan dapat beroperasi lebih cepat dibandingkan genset unit berkapasitas lebih besar.
4. Unit produksi sumur juga dapat digunakan pada daerah dengan topografi yang sangat kompleks karena jika menggunakan unit tersebut, pipa aliran uap jauh lebih pendek dibandingkan pada pembangkit listrik pusat.
5. Jika tekanan di akumulator turun lebih cepat dari yang diharapkan, turbin masih dapat beroperasi pada tekanan

yang lebih rendah dan menghasilkan daya yang sama yaitu , meskipun dengan efisiensi yang lebih rendah.

6. Unit produksi kepala sumur dapat dipindahkan ke lokasi sumur lain dalam waktu 1-2 bulan.

B. Fluida Panasbumi Untuk Sektor Non-Listrik

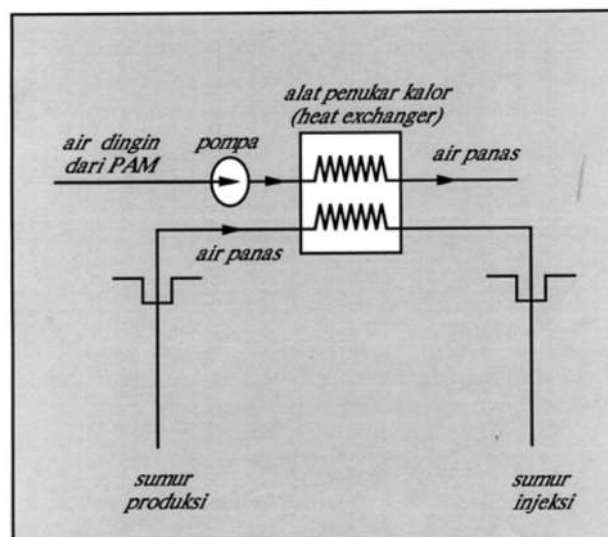
Selain pembangkit listrik, fluida panas bumi juga digunakan di sektor non-listrik seperti pemanas ruangan/distrik di beberapa negara. Pengeringan pemanas rumah kaca (green house heating), pemanasan lahan pertanian (soil heating), pengeringan hasil pertanian dan peternakan, kayu, kertas, dan lain-lain.

Penggunaan Fluida Panasbumi Untuk Sektor Non-Listrik



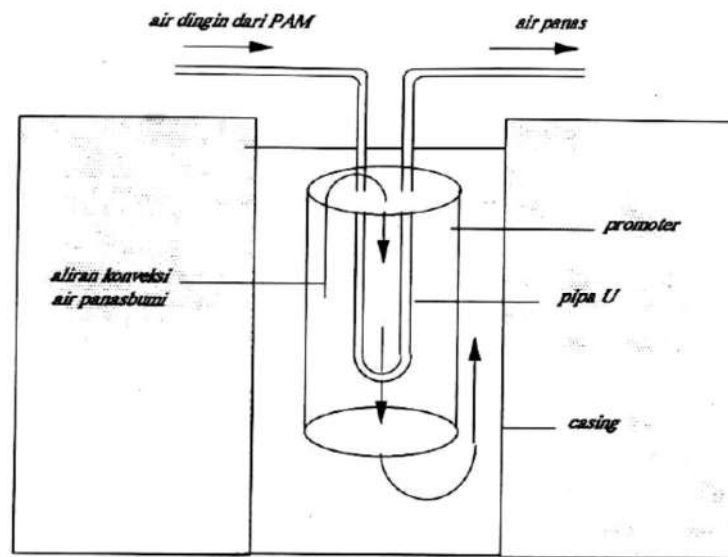
Di Islandia, air panas bumi telah digunakan untuk memenuhi kebutuhan air panas penduduk setempat sejak awal abad ke-20. Selain itu, air panas bumi digunakan untuk memanaskan rumah sakit, sekolah, dan kawasan pemukiman. Pada tahun 1980an, sekitar dua pertiga dari penduduk Islandia memperoleh manfaat dari energi panas bumi.

Sejak awal abad ke-20, penduduk kota Rotorua, Selandia Baru, telah menggunakan air panas bumi untuk memenuhi kebutuhan air panas dan pemanas ruangan, serta untuk mencuci, mandi, dan memasak. Sekitar 1000 sumur telah dibor di Kota Rotorua. Kolam renang hotel di kota ini juga menggunakan air panas bumi. Sejak pertengahan 1980-an, pemerintah secara bertahap menutup sejumlah besar sumur produksi di kota tersebut, karena kelebihan produksi cairan panas bumi sejak awal abad ke-20 telah mengurangi aktivitas beberapa geyser di tempat-tempat yang banyak dikunjungi wisatawan. Saat ini Kota Rotorua baru memiliki 200 sumur produksi.



Gambar 3.10 Skema Proses Pemanasan Air oleh Fluida Panasbumi dan Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger)

Di Tauhara, Selandia Baru, sebuah sekolah menggunakan cairan panas bumi untuk memanaskan air dari pusat air kota menggunakan penukar panas bawah tanah. Penukar panas bawah tanah adalah alat penukar panas yang berbentuk seperti tabung berbentuk U di dalam sumur. Air dingin dari permukaan mengalir ke lubang sumur, dan setelah keluar dari lubang sumur menjadi lebih panas karena bersentuhan dengan fluida panas bumi. Negara lain yang menggunakan cairan panas bumi untuk pemanasan termasuk Amerika Serikat, Jepang, Hongaria, Uni Soviet, dan Perancis.

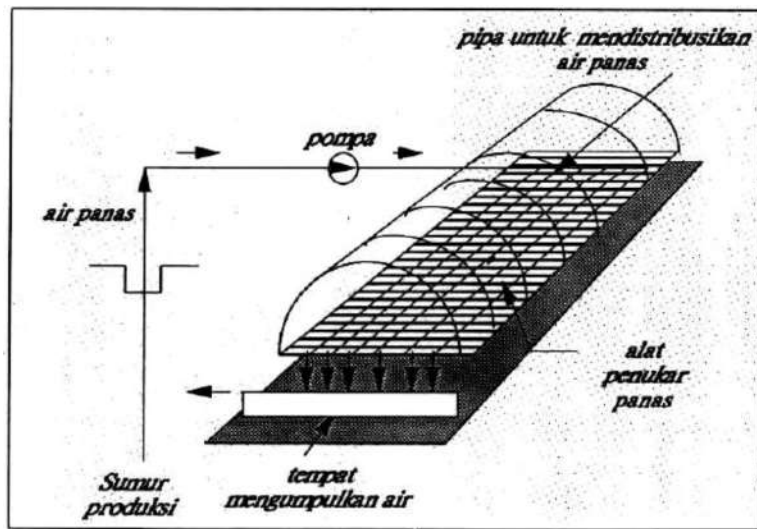


Gambar 3.11 Skema Proses Pemanasan Air Oleh Fluida Panasbumi dan Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger) di Dalam Sumur

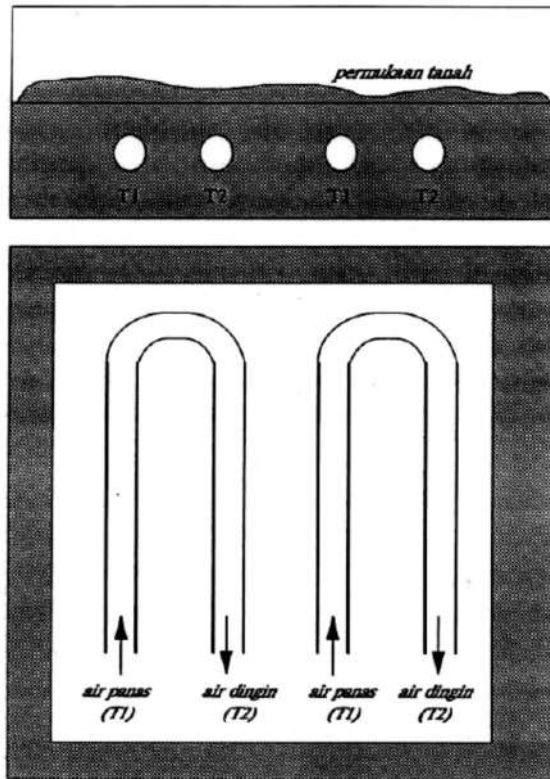
Islandia juga telah menggunakan cairan panas bumi untuk pemanasan rumah kaca atau pemanas rumah kaca sejak tahun 1920. Panas dari cairan panas bumi digunakan untuk mendorong pertumbuhan sayuran, buah-buahan, bunga, dll. Ia tidak dapat tumbuh dalam kondisi iklim setempat, karena suhunya • 10-12 °C dan suhu musim dingin di bawah -10 °C.

Sebelum cairan panas bumi dapat digunakan, hampir seluruh jenis makanan, tidak termasuk ikan, daging, dan kentang, harus diimpor ke Islandia. Pada tahun 1980, sekitar 110.000 meter persegi rumah kaca dipanaskan dengan energi panas bumi. Selain Islandia, Uni Soviet dan Hongaria juga menggunakan cairan panas bumi di rumah kaca seluas 420.000 meter persegi, dan Hongaria seluas 1.900.000 meter persegi. Saat ini, pemanasan rumah kaca dengan cairan panas bumi sedang dilakukan di Amerika Serikat, Italia, Jepang, dan Selandia Baru.

Cairan panas bumi juga digunakan untuk memanaskan lahan pertanian (pemanas tanah) di dekat Izmir (Turki) dan Oregon (AS). Air panas bumi dialirkan melalui pipa yang terkubur di bawah permukaan bumi. Di Oregon, penggunaan cairan panas bumi untuk memanaskan lahan pertanian tidak hanya meningkatkan kualitas produksi tetapi juga meningkatkan produksi jagung sebesar 45%, produksi tomat sebesar 50%, dan produksi kedelai sebesar 66%.

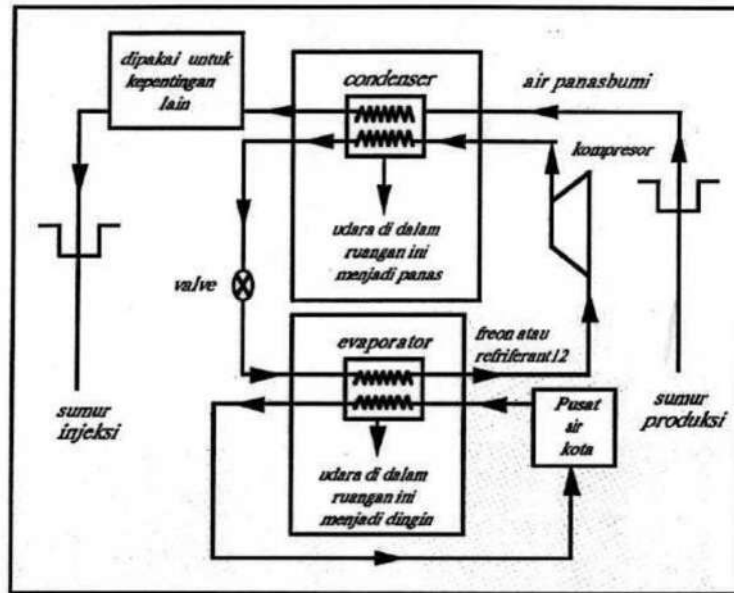


Gambar 3.12 Pemanasan Rumah Kaca (Green House Heating)



Gambae 3.13 Sistem Pemanasan Tanah Dengan Menggunakan Fluida Panasbumi (Soil Heating)

Di Kawerau, Selandia Baru, batang pohon dikeringkan menggunakan cairan panas bumi. Selain itu, uap panas bumi juga digunakan dalam industri kertas. Cairan panas bumi saat ini digunakan pada AC Hotel Rotorua (Selandia Baru). Pendingin udara fluida panas bumi kini digunakan di seluruh Jepang. Diagram skema proses pendinginan ditunjukkan pada gambar

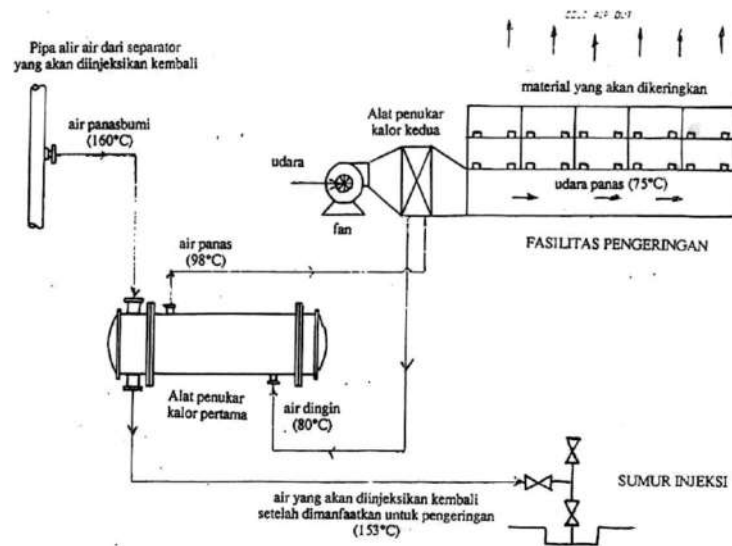


Gambar 3.14 Sistem Pendinginan Udara dengan Memanfaatkan Fluida Panasbumi

Filipina sedang menjajaki kemungkinan pemanfaatan air limbah panas dari PLTP untuk mengeringkan kopra, mangga, nangka, nanas, dan ikan sebelum airnya diinjeksikan ke dalam reservoir. Untuk mencapai tujuan ini, membangun fasilitas pengeringan di ladang minyak Southern Negros dekat sumur injeksi. Air limbah panas di sini (suhu 1600°C) pada dasarnya digunakan untuk memanaskan air lainnya yang digunakan untuk memanaskan udara di dalam ruang pengering. Alat penukar panas yaitu alat penukar panas tabung jaket (penukar panas pertama) dan alat penukar panas tabung bersirip (penukar panas kedua) digunakan sebagai media pertukaran panas. Diagram skema proses pemanasan kering ditunjukkan pada Gambar 3.

Selama ini fluida panas bumi di Indonesia belum dimanfaatkan untuk bidang non kelistrikan lainnya kecuali untuk kolam renang, namun kedepannya fluida panas bumi akan dimanfaatkan untuk teh, kopra, tembakau dan hasil pertanian

lainnya mengeringkan kayu. pengeringan, industri kertas, penghilangan bakteri dalam susu, dll.



Gambar 3.15 Skema Sistim Pengeringan di Philipina

BAB IV

SIFAT BATUAN DAN FLUIDA PANAS BUMI

A. Sifat Batuan

Sebagian besar reservoir panas bumi terletak di dalam batuan vulkanik dimana aliran utama mengalir melalui rekahan. Mirip dengan minyak, porositas, permeabilitas, dan kepadatan batuan merupakan sifat batuan penting yang menggambarkan sifat batuan di reservoir panas bumi.

Beberapa parameter lain yang penting untuk menggambarkan sifat batuan dalam reservoir panas bumi adalah panas spesifik dan konduktivitas termal. Sifat-sifat fluida panas bumi (uap dan air) meliputi volume spesifik, entalpi, energi dalam, entropi, viskositas, dan panas spesifik. Nilainya ditentukan pada tekanan yang berbeda dan suhu saturasi .

Porositas (ϕ)

Reservoir panas bumi biasanya terdapat ada batuan rekahan alami, yang tersusun atas rekahan dan rongga atau pori-pori. Fluida panas bumi tidak hanya terkandung di dalam pori-pori tetapi juga di dalam retakan. Volume rongga atau pori-pori suatu batuan umumnya dinyatakan sebagai persentase dari total volume batuan dan didefinisikan sebagai porositas (ϕ).

Secara matematis, porositas dapat dinyatakan sebagai: $\phi = \frac{V_p}{V_b}$ (4.1)

dimana V_p adalah volume pori dan V_b adalah volume total batuan Porositas batuan pada reservoir panas bumi biasanya terbagi menjadi dua bagian.

Porositas rekahan dan porositas antar butir atau porositas matriks batuan. Sampai saat ini, hanya porositas matriks yang dapat diukur di laboratorium. Porositas matriks pada reservoir panas bumi biasanya 3 hingga 25%, namun 100% retak.

Permeabilitas (k)

Mirip dengan minyak, permeabilitas suatu batuan adalah ukuran kemampuannya untuk mengangkut cairan. Permeabilitas merupakan parameter penting untuk menentukan laju aliran fluida pada batuan berpori dan retak alami.

Permeabilitas biasanya dinyatakan dalam mD (milidarsi), dan di wilayah panas bumi sering dinyatakan dalam m^2 , yang setara dengan 1 darcy. Hingga 10-12 meter persegi. Derajat permeabilitas suatu batuan tidak sama ke segala arah (anisotropi). Secara umum permeabilitas horizontal jauh lebih besar dibandingkan permeabilitas vertikal.

Seperti ditunjukkan pada Tabel 4.1, permeabilitas matriks batuan dari batuan reservoir panas bumi umumnya sangat rendah, dan permeabilitas reservoir adalah antara 1 dan 100 mD, dan permeabilitas (produk permeabilitas dan ketebalan) adalah 1 hingga 100 Dm (Darcymeter).

Tabel 4.1 Sifat Batuan Reservoir Di Beberapa Lapangan Panasbumi
(Sumber: Bjornsson & Bodvarsson, 1988)

Lapangan	Negara	Temp. ($^{\circ}$ C)	k (mD)	ϕ (%)	kh (Darcy.m)
Krafla	Iceland	300-350	2-10	3-5	1-3
Laugarnes	Iceland	130	15	0.20	15
Laugaland	Iceland	80-100	2		2
Nesjavellir	Iceland	300-400	1-5	5	5
Svartsengi	Iceland	240	100-150	5-10	
Larderello	Italy	240		5	10-100
Olkari	Kenya	300	3-8	2	1-5
Cerro Prieto	Mexico	280-340	10-30	20	4-40
Broadlands	NZ	270	30	20	50-100
Wairakei	NZ	270	35-40	20	20-100
BacMan	Phillipines	300-320	20	5	30
Tongonan	Phillipines	300-350	10-50	5-10	10-50
The Geyser	USA	240	50-100	5	1-50
Baca	USA	270	3-10	5	1.8

Densitas (ρ)

Massa jenis suatu batuan adalah perbandingan antara berat batuan dengan volume batuan.

Konduktivitas Termal (K)

Konduktivitas termal suatu batuan adalah parameter yang menunjukkan kemampuan suatu batuan dalam memindahkan panas secara konduksi apabila terdapat perbedaan suhu (gradien suhu) antar batuan. Secara matematis, konduktivitas termal dinyatakan sebagai:

$$K = Q/(dT/dz) \quad (4.2)$$

dimana Q adalah laju aliran panas per satuan luas dan dT/dz adalah gradien suhu. Satuan daya hantar panas batuan adalah $W/m.oK$ yang merupakan singkatan dari satuan $(energi/waktu/luas)/(suhu/jarak)$.

JENIS BATUAN	KONDUKTIVITAS (W/m.K)
Limestone	2.2 – 2.8
Slate	2.4
Sandstone	3.2
Bitaminous coal	0.26
Rock salt	5.5
Gneiss	2.7
Granite	2.6
Gabbro	2.1
Peridotite	3.8

Seperti terlihat pada Tabel, konduktivitas termal tidak sama untuk semua batuan. Konduktivitas termal suatu batuan tidak hanya ditentukan oleh jenis batuan dan mineral penyusunnya, tetapi juga oleh struktur kristal yang dibentuk oleh batuan tersebut. Mungkin juga karena nilai konduktivitas berbeda-beda ke segala arah.

Hal ini menyebabkan panas menyebar ke arah yang berbeda dan kecepatan yang berbeda. Keberagaman sifat konduktivitas termal batuan diperkirakan tidak hanya disebabkan oleh susunan ion dalam struktur kristal tetapi juga karena orientasi setiap butir mineral. Misalnya kuarsa merupakan konduktor panas yang baik, sehingga konduktivitas termal batuan yang mengandung kuarsa umumnya ditentukan oleh proporsi kuarsa dalam batuan tersebut misalnya Granit Batu

Jika batuan mengandung 20-35% kuarsa, konduktivitasnya adalah 2,5-4 W/m.K. Mineral ini memiliki konduktivitas termal yang rendah, sehingga keberadaan mineral plagioklas mengurangi konduktivitas batuan.

Kalor jenis batuan (cp)

Kalor jenis batuan adalah parameter yang menunjukkan banyaknya kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu satuan massa batuan sebesar 10 derajat Celcius. Satuan dari panas spesifik batuan adalah J/kg.K. Panas spesifik batuan umumnya mempunyai harga sebagai berikut:

- Pada temperatur rendah 0.75 - 0.85 kJ/kg⁰C
- Pada temperatur sedang 0.85 - 0.95 kJ/kg⁰C
- Pada temperatur tinggi 0.95 - 1.10 kJ/kg⁰C

B. Jenis dan Sifat Fluida

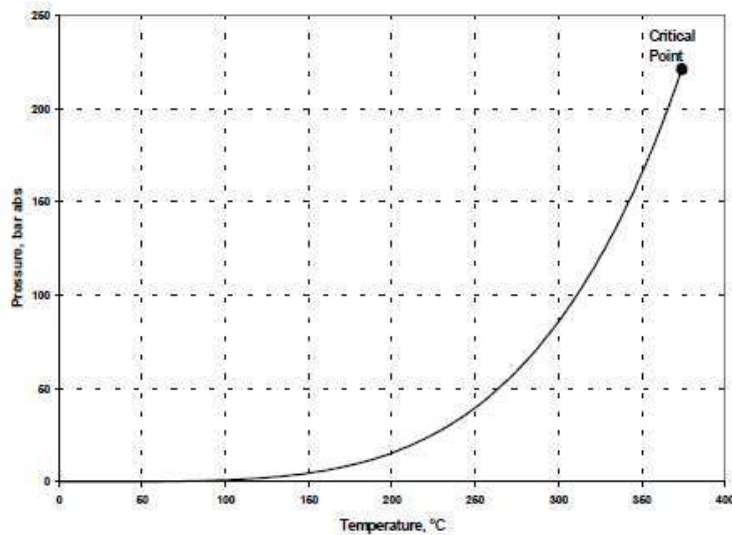
Fluida panas bumi dapat berbentuk cair atau uap tergantung pada tekanan dan suhu yang mempengaruhinya. Suatu zat cair berada dalam wujud cairnya hanya jika suhunya di bawah titik didihnya atau suhu jenuhnya pada tekanan tertentu. Pada tekanan tertentu, jika suhu lebih tinggi dari titik didih atau suhu saturasi air, cairan berada dalam wujud uap.

Misalnya, pada tekanan 1 atm (1,01325 bar), air mendidih pada suhu 100 °C. Jika suhu adalah 50°C pada tekanan 1 atmosfer, maka ini lebih rendah dari titik didih air dan cairan tersebut berbentuk cair. Jika suhu 1 atm adalah 100°C, yang lebih tinggi dari titik didih air, maka zat cair akan berbentuk uap pada °C.

Pada tekanan di atas 1 atmosfer, air mendidih pada suhu yang lebih tinggi. Misalnya, pada tekanan 20 bar, air mendidih pada suhu 212,9°C. Tingkat tekanan pada suhu saturasi yang berbeda, atau suhu pada tekanan saturasi air yang berbeda. Lihat Steam Table di Lampiran A untuk informasi lebih lanjut. Gambar menunjukkan hubungan antara tekanan dan suhu saturasi.

Tekanan (bar)	Temperatur Saturasi (°C)
1.01325	100
10	179.9
20	212.9
30	233.8

Fasa cair dapat berada bersama-sama dengan fasa uap pada kondisi tekanan dan temperatur tertentu, yaitu pada tekanan dan temperatur saturasi.



Gambar 4.1. Hubungan Temperatur Saturasi terhadap Tekanan

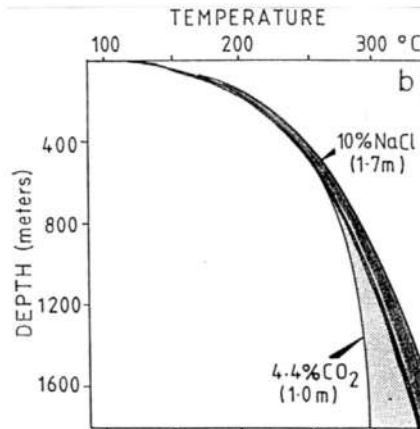
Kurva pada Gambar 4.1 di atas disebut kurva saturasi. Di daerah di atas kurva saturasi, yaitu di daerah yang suhunya lebih tinggi dari suhu saturasi, hanya fasa uap yang terdapat dalam sistem. Uap dalam keadaan ini disebut uap super panas (*superheated steam*). Di daerah di bawah kurva saturasi, yaitu daerah yang suhunya lebih rendah dari suhu saturasi, hanya fasa cair yang ada dalam sistem.

Dalam keadaan ini, fase cair disebut cairan terkompresi. Pada suhu dan tekanan jenuh, fasa cair dapat hidup berdampingan dengan fasa uap. Cairan tersebut merupakan cairan dua fasa, yaitu campuran uap dan air. Kandungan uap dalam suatu cairan sering disebut sebagai kualitas uap atau kekeringan (notasi x) dan didefinisikan sebagai rasio laju aliran massa uap terhadap laju aliran massa total. Nilai fraksi uap (x) bervariasi dari 0 hingga 1.

- Jika hanya ada fase cair pada kondisi jenuh, maka disebut cairan jenuh ($x=0$).

- Jika hanya terdapat uap pada tekanan dan suhu jenuh, maka uap tersebut disebut uap jenuh ($x=1$).

Kehadiran gas yang tidak dapat terkondensasi dalam air mengurangi suhu saturasi atau titik didih (lihat Gambar 4.2), sedangkan keberadaan garam meningkatkan suhu saturasi. Tidak hanya jenis fluida, tetapi sifat fluida juga sangat ditentukan oleh besarnya tekanan dan temperatur didalam sistem.



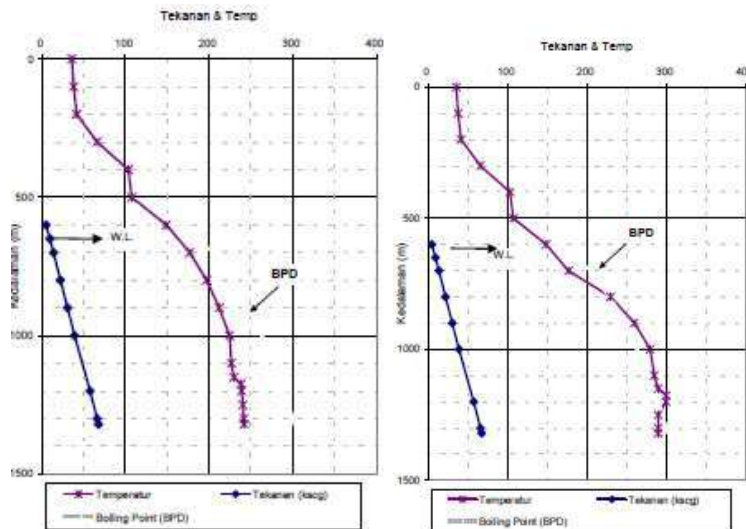
Gambar 4.2. Pengaruh CO₂ dan NaCl Terhadap Temperatur dan Tekanan Saturasi

Cairan bawah permukaan dapat ditentukan menggunakan jalur tekanan dan pengukuran suhu lubang bawah. Dengan menggunakan data tekanan dan tabel uap, suhu saturasi atau titik didih dapat ditentukan. Suhu saturasi kemudian diplot terhadap kedalaman. Kurva beraturan disebut "kurva BPD".

BPD adalah singkatan dari Titik Didih Kedalaman. Jika gradien suhu yang diukur dalam lubang bor berada di sebelah kiri kurva BPD, maka fluida hanya terdiri dari satu fasa, yaitu air. Jika gradien suhu yang diukur pada lubang bor berada di sebelah kanan kurva BPD, maka cairan hanya terdiri dari satu fasa, yaitu uap.

Jika gradien suhu sesuai dengan kurva BPD, cairan terdiri dari dua fase: uap dan air. Gradien tekanan dan suhu dalam sistem berbasis air secara umum seperti ditunjukkan pada Gambar 4.4. Sangat bervariasi tergantung pada kedalaman.

Gradien tekanan dan suhu dalam reservoir yang didominasi uap biasanya tidak bervariasi secara signifikan terhadap kedalaman (densitas gas sedikit bervariasi terhadap tekanan dan suhu). Contohnya ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.3 Landaian Temperatur dan BPD Untuk Penentuan Jenis Fluida/Jenis Reservoir

Sifat Fluida Satu Fasa

Sifat termodinamika uap dan air murni: volume spesifik (v_f dan v_g), massa jenis (ρ_f dan ρ_g), energi dalam (u_f dan u_g), entalpi (h_f dan h_g), kalor laten (h_{fg}), entropi (s_f) Viskositas (μ_f dan μ_g) dan Viskositas (μ_f dan μ_g) pada berbagai tekanan dan suhu saturasi dapat ditentukan dari tabel uap pada Lampiran A atau menggunakan korelasi pada Lampiran B dan dibahas di bawah.

Volume Spesifik

Volume spesifik suatu fase cair adalah perbandingan volume terhadap massanya. Satuan volume spesifik adalah m^3/kg . Volume spesifik air (v_f) dan steam (v_g) bergantung pada tingkat tekanan dan temperatur dan nilainya dapat dilihat pada tabel steam. Misalnya, harga air dan uap volume tertentu ditunjukkan pada tabel di bawah.

Tekanan (bar)	Temperatur (°C)	$v_f \times 10^{-2}$ (m^3/kg)	v_g (m^3/kg)
1.01325	100	0.1044	1.673
10	179.9	0.11278	0.1944
20	212.9	0.11768	0.09957
30	233.8	0.12163	0.0706
30	250		0.0706*)

Catatan:

*) superheated steam, temperatur titik didih pada tekanan 30 bar adalah 233.8 °C

Densitas

Massa jenis suatu fasa cair adalah perbandingan massa terhadap volume fasa cair. Satuan massa jenis adalah kg/m^3 . Massa jenis air (ρ_f) dan uap (ρ_g) bergantung pada tingkat tekanan dan suhu, dan harganya ditentukan dari harga volume spesifik sebagai berikut:

$$\rho = 1/v \quad (4.3)$$

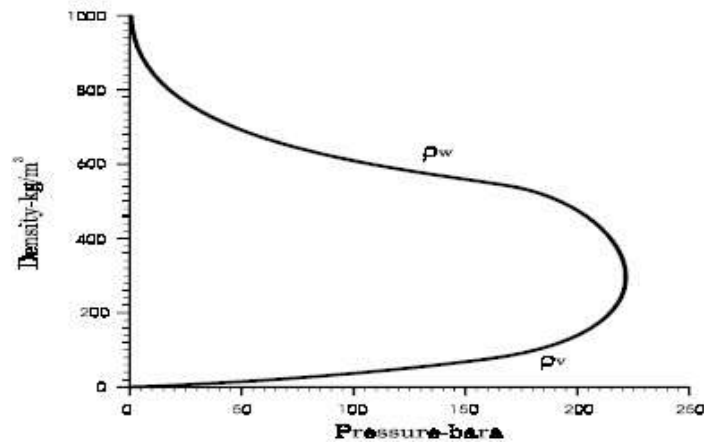
Misalnya tabel berikut menunjukkan harga densitas air dan steam pada tekanan dan temperatur yang berbeda.

Tekanan (bar)	Temperatur (°C)	ρ_f (kg/m^3)	ρ_g (kg/m^3)
1.01325	100	957.9	0.05977
10	179.9	886.7	5.144
20	212.9	849.8	10.043
30	233.8	822.2	15.004
30	250	-	14.164*)

Catatan:

*) superheated steam, temperatur titik didih pada tekanan 30 bar adalah 233.8 °C

Pada Gambar 4.6 diperlihatkan hubungan antara tekanan dengan densitas air pada temperatur dan tekanan saturasi.



Gambar 4.6 Hubungan Densitas Air dan Uap terhadap Tekanan Saturasi

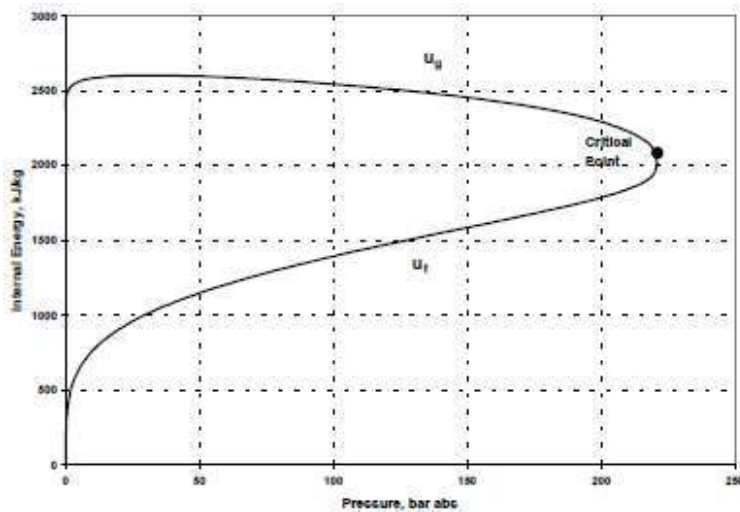
Energi Dalam (Internal Energi)

Energi dalam (u) merupakan parameter yang menunjukkan jumlah panas yang terkandung dalam suatu fasa per satuan massa. Satuan energi dalam adalah kJ/kg. Kandungan energi steam (u_g) dan air (u_f) juga bergantung pada tekanan dan temperatur, dan nilainya dapat dilihat dari tabel steam. Beberapa contoh ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tekanan (bar)	Temperatur (°C)	u_f (kJ/kg)	u_g (kJ/kg)
1.01325	100	418.6	2506.5
10	179.9	762	2584
20	212.9	907	2600
30	233.8	1004	2603
30	250	-	2646*)

Catatan:

*) superheated steam, temperatur titik didih pada tekanan 30 bar adalah 233.8 °C



Gambar 4.7 Hubungan Energi Dalam terhadap Tekanan Saturasi

Enthalpi dan Panas Laten

Entalpi adalah jumlah dari energi dalam (u) dengan energi yang dihasilkan oleh kerja tekanan. Hubungan dari energi dalam dengan entalpi adalah:

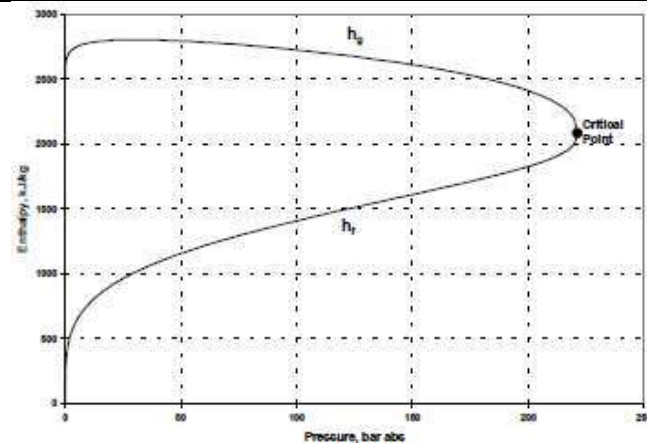
$$h_f = u_f + p/v_f \quad (4.4)$$

$$h_g = u_g + p/v_g \quad (4.5)$$

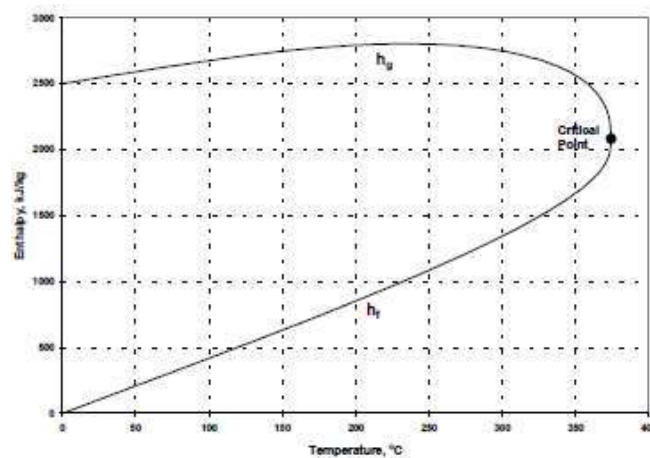
Satuan dari entalpi adalah kJ/kg. Besarnya entalpi uap (h_g) dan entalpi air (h_f) juga tergantung dari tekanan dan temperatur dan harganya, dapat ditentukan dari Tabel Uap . Beberapa contoh diberikan pada dibawah ini.

Tekanan (bar)	Temperatur (°C)	h_f (kJ/kg)	h_g (kJ/kg)	h_{fg} (kJ/kg)
1.01325	100	419.1	2256.7	2675.8
10	179.9	763	2778	2015
20	212.9	909	2799	1890
30	233.8	1008	2803	1795

30	250	-	2858	-
----	-----	---	------	---



Gambar 4.8 Hubungan Enthalpi terhadap Tekanan Saturasi



Gambar 4.9 Hubungan Enthalpi terhadap Temperatur Saturasi

Panas laten (h_{fg}) adalah panas yang diperlukan untuk mengubah satu satuan masa air pada kondisi saturasi (jenuh) menjadi 100% uap.

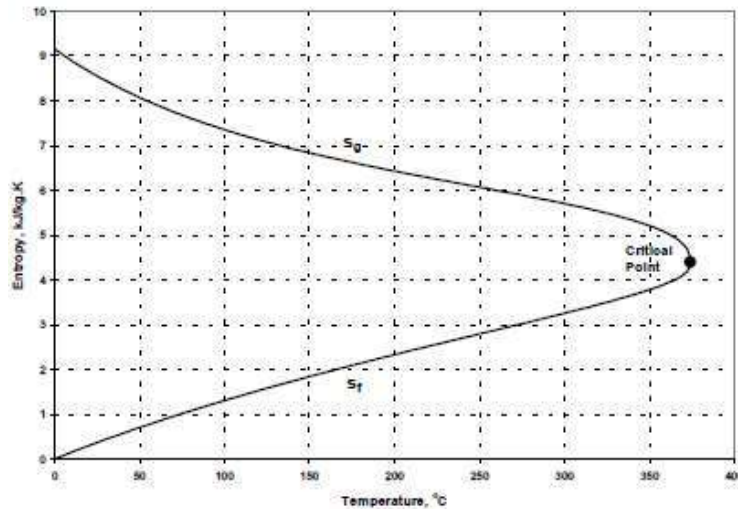
Entropi

Entropi (s) juga tergantung dari tekanan dan temperatur dan harganya dapat ditentukan dari Tabel Uap. Beberapa contoh diberikan pada Tabel berikut.

Tekanan (bar)	Temperatur (°C)	s_f (kJ/kgK)	s_g (kJ/kgK)	s_{fg} (kJ/kgK)
1.01325	100	1307	7355	6048
10	179.9	2138	6586	4448
20	212.9	2477	6340	3893
30	233.8	2645	6186	3541
30	250	-	6289*)	-

Catatan:

*) superheated steam, temperatur titik didih pada tekanan 30 bar adalah 233.8 °C



Gambar 4.10 Hubungan Entropy terhadap Temperatur Saturasi

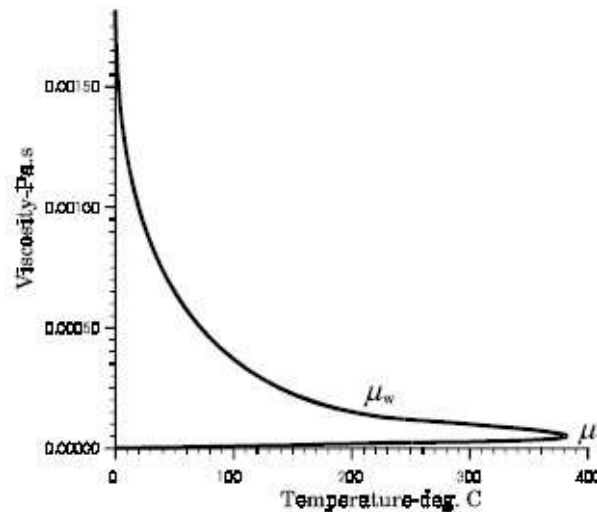
Viskositas

Viskositas adalah ukuran seberapa sulit suatu cairan untuk mengalir. Viskositas dibagi menjadi dua rentang: viskositas kinematik (μ) dan viskositas kinematik (ν). Viskositas kinematik adalah viskositas kinematik dibagi densitas. Artinya:

$$\nu = \mu / \rho \quad (4.6)$$

Viskositas juga bergantung pada tekanan dan suhu, yang nilainya dapat ditentukan dari tabel uap pada. Lihat Tabel di bawah untuk beberapa contoh. Hubungan antara viskositas dan tekanan ditunjukkan pada Gambar 5.8.

Tek. (bar)	Temp. (°C)	$\mu_f \times 10^6$ (Pa s)	$\mu_g \times 10^6$ (Pa s)	ν_f (m ² /s)	ν_g (m ² /s)
1.01325	100	279	12	0.05977	200.7
10	179.9	149	15	0.168	2.9
20	212.9	127	16	0.149	1.6
30	233.8	116	16.7	0.141	1.1



Gambar 4.11 Hubungan Viskositas Dinamik terhadap Temperatur Saturasi

Sifat Fluida Dua Fasa (Uap-Air)

Sifat-sifat cairan dua fasa, campuran steam dan air, ditentukan oleh kualitas dan kekeringan steam. Secara matematis, kekeringan (x) dinyatakan sebagai:

$$x = mV/mT \quad (4.7)$$

atau

$$x = mV / (mV + mI) \quad (4.8)$$

dimana:

m_v = laju aliran massa uap (kg)/S) atau ton/jam)

m_l = laju aliran massa air (kg/s atau ton/jam)

m_T = laju aliran massa total (kg/s atau ton/jam)

Jika h_{fg} adalah kalor laten, v_f , ρ_f , u_f , h_f , s_f , μ_f adalah sifat-sifat air pada kondisi jenuh, v_g , ρ_g , u_g , h_g , s_g , μ_g adalah sifat-sifat uap pada kondisi jenuh, dan sifat-sifat cairan dua fasa (campuran uap dan air) uap. Fraksi tersebut dinyatakan dalam notasi x dan dapat ditentukan sebagai berikut:

$$h = h_f + x h_{fg} \quad (4.9)$$

$$s = s_f + x s_g \quad (4.10)$$

$$v = x v_g + (1-x) v_f \quad (4.11)$$

$$u = x u_g + (1-x) u_f \quad (4.12)$$

Perbandingan nilai entalpi (h) dengan air dan uap biasanya dilakukan dengan membandingkan keduanya pada saturasi penuh, dengan fluida diukur sebagai satu fasa atau dua fasa. Kriteria berikut umumnya digunakan untuk menentukan jenis fluida panas bumi:

$h < h_f$	Air (compressed liquid)
$h = h_f$	Air jenuh (saturated liquid)
$h = h_g$	Uap jenuh (saturated steam)
$h_f < h < h_g$	Dua fasa (campuran uap-air)
$h > h_g$	Uap (superheated steam)

C. Fluida Dua Fasa di Batuan Reservoir

Dalam reservoir, fluida dua fasa umumnya dianggap tidak dapat bercampur dan fasa-fasanya terpisah. Beberapa gua dan pori-pori batu berisi uap, sementara yang lain berisi air. Mirip

dengan minyak bumi, fraksi volume pori-pori yang terisi uap biasa disebut saturasi air (S_L), dan pori-pori yang terisi air disebut saturasi uap (S_V). Di sini

$$S_L + S_V = 1 \quad (4.13)$$

Jika ρ_L dan ρ_V masing-masing adalah massa jenis air dan uap, h_L dan h_V adalah entalpi air dan uap, serta u_L dan u_V adalah energi air dan uap, maka Sifat-sifat fluida dua fasa yang terlibat adalah sebagai berikut. Untuk media berpori biasanya dinyatakan sebagai: Massa jenis:

$$\rho = \rho_L S_L + \rho_V S_V \quad (4.14)$$

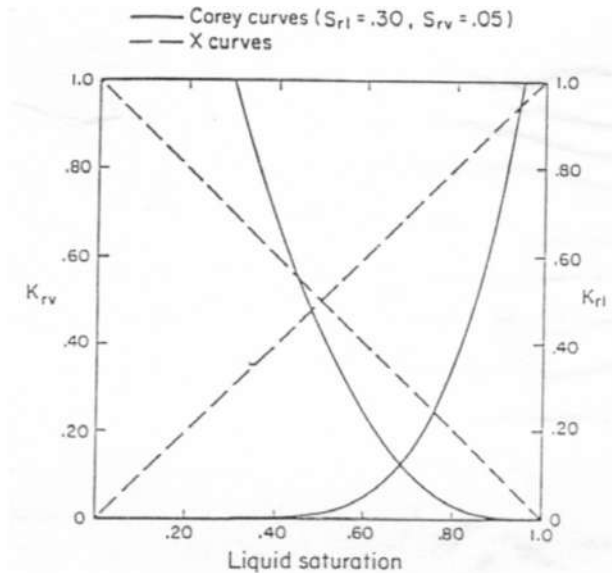
Entalpi:

$$h = \frac{\rho_L S_L h_L + \rho_V S_V h_V}{\rho} \quad (4.16)$$

Energi dalam:

$$u = \frac{\rho_L S_L u_L + \rho_V S_V u_V}{\rho}$$

Sifat-sifat zat cair dua fasa dalam keadaan mengalir bergantung pada nilai permeabilitas relative. Kurva permeabilitas spesifik Corey (1954) dan kurva permeabilitas spesifik linier biasanya digunakan dalam perhitungan rekayasa reservoir, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Kurva Permeabilitas Relative Corey dan Kurva Garis Lurus

Secara matematis persamaan Corey dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$k_{rL} = (SL^*)^4 \quad (4.17)$$

$$k_{rV} = (1-SL^*) [1-(SL^*)^2] \quad (4.18)$$

dimana :

$$S_L^* = \frac{S_L - S_{LR}}{1 - S_{LR} - S_{VR}} \quad (4.19)$$

SLR dan SVR adalah residual liquid saturation dan residual vapour saturation. Untuk perhitungan di bidang panas bumi biasanya diasumsikan SLR = 0.3 dan SVR = 0.05. Dengan asumsi bahwa aliran di reservoir mengikuti hukum Darcy, yaitu:

$$q_{mL} = \frac{k k_{rL}}{\mu_L} (P - \rho_L g) \quad (4.20)$$

$$q_{mL} = \frac{k k_{rV}}{\mu_V} (P - \rho_V g) \quad (4.21)$$

dan aliran panas secara konduksi diabaikan, jadi aliran panas (Q_e) yang terjadi secara konveksi adalah sebagai berikut:

$$Q_e = h_L q_{mL} + h_v q_{mV} \quad (4.22)$$

serta asumsi aliran adalah horizontal (pengaruh gravitasi diabaikan), maka entalpi fluida dan viskositas kinematik dua fasa dalam keadaan mengalir dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Flowing enthalpy (h_f) :

$$h_f = \frac{h_L \frac{k_{rL}}{v_L} + h_v \frac{k_{rV}}{v_v}}{\frac{k_{rL}}{v_L} + \frac{k_{rV}}{v_v}} \quad (4.23)$$

Viskositas kinematik (V_t)

$$\frac{1}{V_t} = \frac{k_{rL}}{v_L} + \frac{k_{rV}}{v_v} \quad (4.24)$$

dimana :

q_{mL} = laju alir masa air

q_{mV} = laju alir masa uap

h_L = enthalpy air

h_v = enthalpy uap

v_L = viskositas kinematik air

v_v = viskositas kinematik uap

ρ_L = densitas air

ρ_v = densitas uap

P = tekanan

g = gravitasi

h_L dan h_v adalah enthalpy fasa cair dan fasa uap, sedangkan v_L dan v_v adalah viskositas kinematik fasa cair dan fasa uap.

D. Geokimia Fluida Panasbumi

Data kimia pada fluida panas bumi sangat berguna, antara lain, untuk memberikan perkiraan sistem panas bumi bawah tanah (misalnya suhu, jenis reservoir, asal air, dll.) dan untuk menentukan sifat fluida.

Secara khusus, bersifat korosif dan cenderung membentuk endapan (skala) padat, yang diperlukan dalam desain sistem perpipaan dan pembangkit listrik.

Untuk memahami hal tersebut, aspek geokimia artikel ini meliputi: kandungan kimia fluida, teknik pengambilan sampel, jenis air, penggunaan data kimia air, jenis sistem hidrotermal, dan penyimpanan, korosivitas, dan kecenderungan sedimentasi.

Kandungan kimia fluida panas bumi pada suatu lokasi berbeda tidak hanya antara satu area penambangan dengan area penambangan lainnya, namun juga komposisi kimia yang dihasilkan dari satu lokasi dengan lokasi lainnya, meskipun berada dalam lapangan panas bumi yang sama.

Sebagai ilustrasi, komposisi kimia dari beberapa sumber air panas di ladang Orakei Colaco, Cerro Prieto, dan Broadlands ditampilkan. Perbedaan konsentrasi ion dapat disebabkan oleh berbagai macam faktor, antara lain karena perbedaan:

1. Temperatur
2. Kandungan gas
3. Sumber air
4. Jenis batuan
5. Kondisi dan lamanya interaksi air batuan
6. Adanya pencampuran antara air dari satu sumber dengan air dari sumber lainnya.

	ORAKEI KORAKO (NZ)		CERRO PRIETO (Mexico)		BROADLANDS (NZ)
	SPG 22	SPG 664	SPG 49	SPG 54	OHAKI POOL
Temp. °C	99	64	57	98	95
pH	9.2	8.2	6.5	7.4	7.05
SiO ₂	280	150	45	92	338
Ca	0.8	4.6	283	492	-
Mg	-	0.6	20	38	-
Na	370	135	1350	3700	860
K	34	10	233	400	82
Li	3.4	1.2	4.4	8	7.4
HCO ₃	113	201	128	42	490*
SO ₄	185	12	960	130	100
Cl	404	78	2930	6700	1060
F	10.8	2.9	-	-	5.2
B	3.4	5.4	-	-	32

	ORAKEI KARAKO (NZ)			
	WELL 2 flashed	WELL 2 at depth	SPG 22	SPG 664
Depth (m)	-	1150	-	-
Temp. °C	99	260	99	64
pH	9.1	?	9.2	8.2
SiO ₂	480	327	280	150
Ca	<1	<1	0.8	4.6
Mg	-	-	-	0.6
Na	550	375	370	135
K	54	37	34	10
Li	3.1	2.1	3.4	1.2
HCO ₃	290	198	113	201
SO ₄	142	97	185	12
Cl	546	372	404	78
F	5.7	3.9	10.8	2.9
B	7.7	5.2	34	5.4

Jenis-Jenis Air Panasbumi

- Air Alkali Klorida (*Alkali Chloride Water*)
- Air Asam Sulfat (*Acid Sulphate Water*)
- Air Asam Sulfat-Klorida (*Acid Sulphate-Chloride Water*)
- Air Bikarbonat (*Bicarbonate Water*)

Air Alkali Klorida

- Cl^- Tinggi (400 - 1800 ppm).
- Na dan K tinggi
- Ca seringkali rendah
- SiO_2 cukup tinggi (tergantung temperatur).
- Umumnya mengandung SO_4 HCO_3 dan sejumlah kecil F, NH_3 , As, Li Rb, Cs dan Mg.
- pH sekitar 6 - 7.5

	GEYER 238 EL TATIO	OHAAKI POOL OHAAKI	CHAMPAGNE POOL WAIRAKEI
pH (20°C)	7.32	7.05	8.0
Li	45	7.4	10.8
Na	4340	860	1070
K	520	0.1	102
Rb	6.7	1.2	1.1
Cs	12.6	-	2.7
NH_4	3.8	2.6	-
Ca	272	-	26
Mg	0.5	-	0.4
Fe	0.1	5.2	-
Mn	0.4	1060	-
F	3.1	100	6.6
Cl	7922	680	1770
SO_4	30	32	26
HCO_3	46	338	76
B	178		21.9
SiO_2	260		-

Sebuah contoh lain diperlihatkan pada Tabel dibawah ini yang memperlihatkan kandungan kimia air yang berbeda-beda dari sumur (di permukaan dan di bawah permukaan) dan dari beberapa mata air di lapangan Cerro Prieto Mexico.

	CERRO PRIETO (MEXICO)				
	WELL M-26 flushed	WELL M-26 at depth	SPG 41	SPG49	SPG 54
Depth (m)	-	1240	-	-	-
Temp. °C	100	292	40	57	98
pH	8.0	-	2.4	6.5	7.4
SiO ₂	1156	705	247	45	92
Ca	971	592	407	283	492
Mg	1	0.6	87	20	38
Na	10467	6382	4100	1350	3700
K	2544	1551	1010	233	400
Li	23.8	14.5	12.1	4.4	8
HCO ₃	46	28	0	128	42
SO ₄	<6	<3.5	690	960	130
Cl	19548	11918	8410	2930	6700
F	-	-	-	-	-
B	22	13.4	-	-	-

Air Asam Sulphate

- SO₄⁻ tinggi
- Cl⁻ dan HCO₃⁻ sangat rendah (kadang-kadang = nol)
- Mengandung Na, K, Ca, Mg, Fe
- pH rendah (pH < 2-3)

Perairan asam sulfat biasanya ditemukan di daerah panas bumi vulkanik di mana uap mengembun menjadi air permukaan. Air asam sulfat juga dapat dihasilkan dari oksidasi H₂S yang terjadi di "zona Vadose " di atas permukaan air.

	SOLOMON ISLAND MUD POOL PARASO	TUTUN-TAIWAN WELL 19 (95 m)	SULPHUR R. VANUATU SPRING.
Temp. °C	48	161	83
pH	2.5	2.0	1.5
SiO ₂	168	419	540
Ca	2	205	112
Mg	1.8	53	2
Na	1.3	146	170
K	0.6	58	44
Li	-	-	-
HCO ₃	59	-	-
SO ₄	1288	3165	2017
Cl	11	1620	1080
F	-	-	-
B	11	46	-

Air Asam Sulfat-Klorida (*Acid Sulphate Chloride Water*)

- C1⁻ dan SO₄⁻ cukup tinggi
- pH < 2 – 5

Terjadi karena :

- Tercampurnya alkali chloride water dengan acid sulphate water
- Ion sulphide (h₂s) dalam alkali chloride water teroksidasi menjadi SO₄⁻
- Alkali choride water melewati dan bereaksi dengan batuan yang mengandung Sulphur

Air Karbonat (Carbonate Water)

- HCO₃⁻ tinggi
- C1⁻ rendah
- pH sekitar 5-6

Di beberapa tempat air karbonat tercampur karena adanya batuan limestone di bawah permukaan. Di permukaan hal ini

dicirikan oleh adanya endapan tranvertme (CaCO_3) sinter disekitar mata air panas.

	KAMOJANG (IND) SPG (SELATAN KMI)	BROADLANDS (NZ) SUMUR BR 6 (PERM)	D.BRATON (BALI) ANGSRI 1B
Temp. °C	-	-	48
pH	7.0	7.4	8.9
SiO ₂	200	180	166
Ca	73	180	4.2
Mg	27	90	79.5
Na	47	435	106
K	16	39	40
Li	-	1.2	0.2
HCO ₃	836	2284	0.2
SO ₄	74	15	380
Cl	5	1.8	139
F	4	1.2	52
B			48

BAB V

FASILITAS PRODUKSI PANASBUMI

A. Fasilitas Produksi Uap

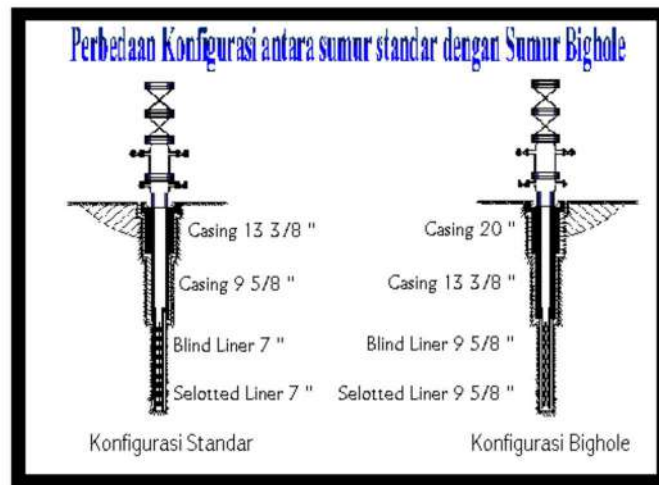
Mirip dengan lapangan minyak dan gas, peralatan produksi bergantung pada jenis fluida yang mengalir dari lubang sumur, namun biasanya komponen utama adalah lubang sumur, kepala sumur, pemisah (untuk fluida dua fase), peredam, dan permukaannya. Selain itu juga terdapat pompa, berbagai penyangga pipa (penyangga), loop, kompensator, perangkat kondensat untuk membuang air kondensat yang terbentuk di dalam pipa uap akibat kehilangan panas, dan alat untuk mengukur laju aliran cairan yang digunakan. Segala sesuatu tentang suhu dan tekanan dibahas dalam bab ini.

Sumur

Sumur panas bumi berbeda dengan sumur minyak karena tidak menggunakan pipa dan tidak berlubang. Sumur panas bumi biasanya menggunakan rangkaian selubung berukuran 20 inci, 13 3/8 inci, dan 9 5/8 inci, dengan bagian bawah (depan zona produksi) dibiarkan terbuka atau dengan lapisan 7 inci (Gambar 5.1). Namun, dalam beberapa tahun terakhir banyak sumur berdiameter yang lebih besar telah dibor menggunakan berbagai casing berukuran 30 inci, 20 inci, 13 3/8 inci, dan 9 5/8 inci. Menurut Dobbie (1995), biaya pengeboran sumur besar sekitar 25% lebih mahal, namun tingkat produksinya 50% lebih tinggi dibandingkan sumur berdiameter standar. Tentu saja, hal ini sangat bergantung pada permeabilitas batuan. Permeabilitas batuan tinggi di beberapa lapangan, seperti lapangan Awibengkok-Gn. Sumur Salak yang berdiameter besar menghasilkan produksi kali lebih banyak dibandingkan sumur berukuran standar. Namun menurut hasil penelitian yang dilakukan penulis, selisih produksi antara sumur berdiameter besar dan sumur berdiameter kecil bisa relatif kecil (kurang dari 10%) bila permeabilitas batuannya relatif rendah.

Landasan sumur atau area di mana sumur produksi atau injeksi di ladang panas bumi biasanya berjarak 1 hingga 2 km. Sumur

injeksi biasanya dibor lebih dalam dari sumur produksi sehingga air yang diinjeksikan mengalir secara gravitasi dan tidak memerlukan pemompaan.



Gambar 5.1 Skema Rangkaian Pipa Selubung di Sumur Panasbumi

Kepala Sumur dan Valves

Mirip dengan sumur minyak dan gas, sumur panas bumi dilengkapi dengan beberapa katup untuk mengatur aliran fluida. Katup ini dipasang di atas atau di basement beton. Secara umum, kepala sumur memiliki empat katup: katup utama atau katup isolasi, katup servis, katup bypass, dan katup ventilasi, yang masing-masing ditunjukkan pada Gambar 5.3.

Rangkaian katup di foto mirip dengan di lapangan Geyser (AS), yang sumurnya menghasilkan uap kering, serta sumur di lapangan Kamojang dan Darajat Gambar 5.4 secara skematis menunjukkan rangkaian katup di ladang Wairakei (Selandia Baru) yang menghasilkan fluida dua fasa, campuran uap dan air. Valve A merupakan katup utama atau biasa disebut master valve atau katup isolasi yaitu katup yang digunakan untuk menutup sumur atau mengisolasi sumur untuk keperluan

pemeliharaan. Valve B merupakan service valve atau valve yang digunakan untuk mengatur aliran fluida yang digunakan.

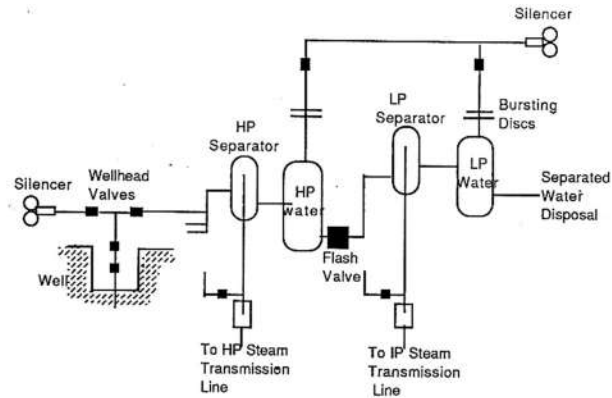
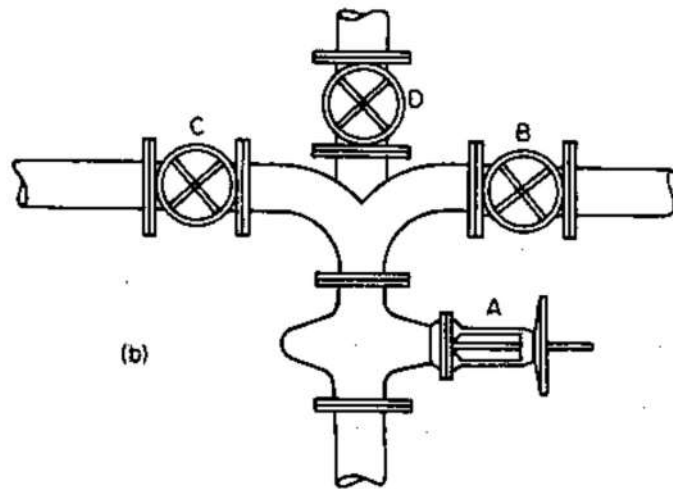


Fig 1 Separation Plant

Gambar 8.2 Contoh Penempatan Valves di Suatu Lapangan Panasbumi



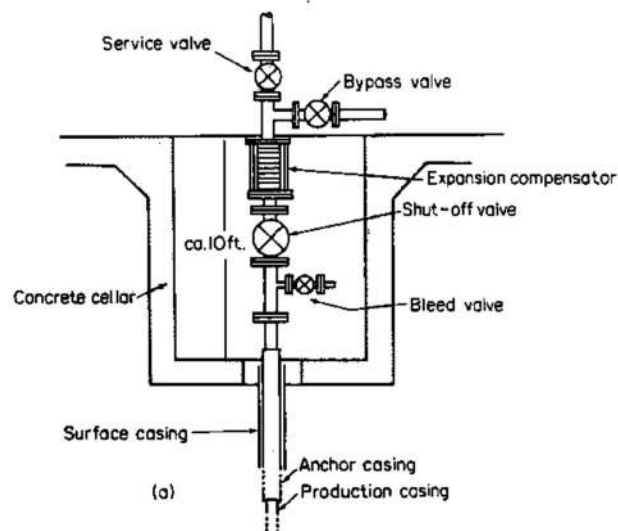
Gambar 8.3 Contoh Rangkaian Valves di Kepala Sumur Uap Kering

Valve C merupakan katup bypass dan merupakan katup yang digunakan untuk mengatur aliran fluida ke knalpot dan tangki

air (limbah). Katup D berukuran dan memungkinkan pahat atau alat untuk membesarkan lubang diturunkan secara vertikal.

Selain jenis katup yang disebutkan di atas, sumur panas bumi biasanya dilengkapi dengan katup ventilasi. Ini adalah katup yang digunakan untuk menyuntikkan (melampiaskan) fluida dengan laju aliran yang sangat rendah ke udara ketika tidak ada fluida pengeboran. Fluida harus dikeluarkan dengan laju aliran yang sangat rendah agar sumur tetap panas dan gas tidak terperangkap di dalam sumur. Dengan menghilangkan sedikit cairan, kejutan termal atau perubahan termal mendadak akibat pemanasan atau pendinginan dapat dihindari.

Selain yang disebutkan di atas, ada beberapa jenis katup lain yang dipasang pada pipa pemindah uap, termasuk katup pelampung bola. *Ball Float Valve* merupakan katup pengaman yang mencegah air masuk ke saluran uap. Jika ada air yang terlibat, bola akan naik dan alirannya terhenti. Ketika tekanan pada meningkat, cakram pecah pecah dan aliran dialihkan ke silencer.



*Gambar 8.4 Contoh Rangkaian Valves di Lapangan Wairakei
(Lapangan Panasbumi Dominasi Air)*

Separator

Jika fluida pengeboran merupakan campuran steam dan air (cairan dua fasa), maka steam dan air dipisahkan dalam separator. Sebelumnya, separator yang umum digunakan adalah separator berbentuk "U", seperti terlihat pada Gambar 5.5. Ketika campuran uap dan air melewati pipa dengan kelengkungan 180 °C, diperkirakan akan timbul gaya sentrifugal yang sangat tinggi, sehingga cairan terlempar ke dinding dan mengubahnya menjadi uap.

Pisahkan fasa dan fasa cairnya. Air dilemparkan ke dinding sementara uap mengisi bagian tengah tabung. Cara pemisahan ini kurang baik karena uap yang keluar dari separator masih mempunyai kadar air yang tinggi dan hanya kering sekitar 50-60%.

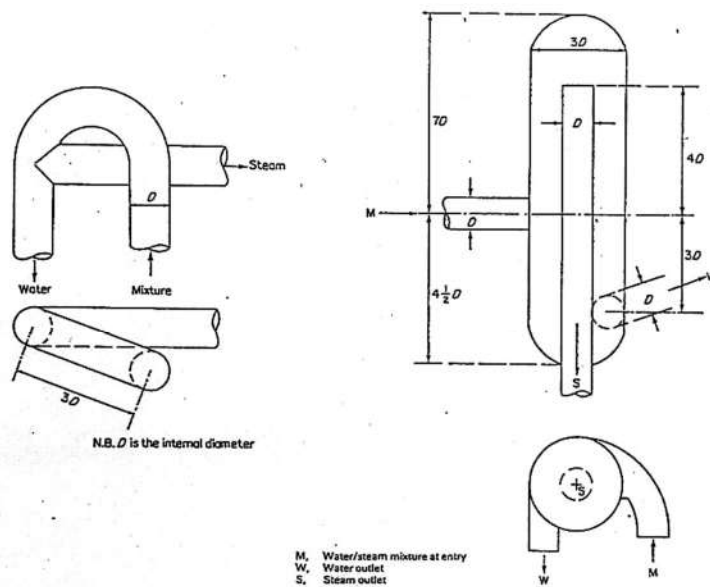


Fig 5 Separators Wairakei designs a) early "U" bend b) Webre type

Gambar 5.5 Separator Berbentuk "U" dan Webre Cyclone Separator

Berbagai jenis pemisah diproduksi, namun yang paling umum digunakan saat ini adalah pemisah siklon Webre, yang paling hemat biaya dan efisien. Saluran masuk spiral memastikan efisiensi pemisahan yang lebih tinggi. Bila menggunakan separator jenis ini, kandungan kering uap yang keluar dari separator bisa sangat tinggi, melebihi 99%. Jika kecepatan fluida yang masuk ke separator melebihi 50 m/s, efisiensi separator ini berkurang.

Silencer

Ketika cairan dari sumur dikeluarkan untuk dibuang, cairan dari sumur akan menghasilkan suara yang tidak biasa yang dapat memekakkan telinga dan dapat menyebabkan kerusakan pendengaran bahkan tanpa perlindungan yang memadai. Untuk mengurangi kebisingan sekaligus mengontrol aliran fluida yang dikeluarkan, fluida biasanya melewati muffler atau muffler. Karena bagian atas knalpot tetap terbuka, maka knalpot sering disebut sebagai pemisah atmosfer.

Desain peredam sederhana, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.6, dibuat di Selandia Baru dan digunakan di ladang Wairakei (didominasi air) dan umumnya digunakan di ladang panas bumi lainnya. Peredam suara berbentuk silinder dan memiliki lapisan untuk meredam suara saat bagian atasnya terbuka.

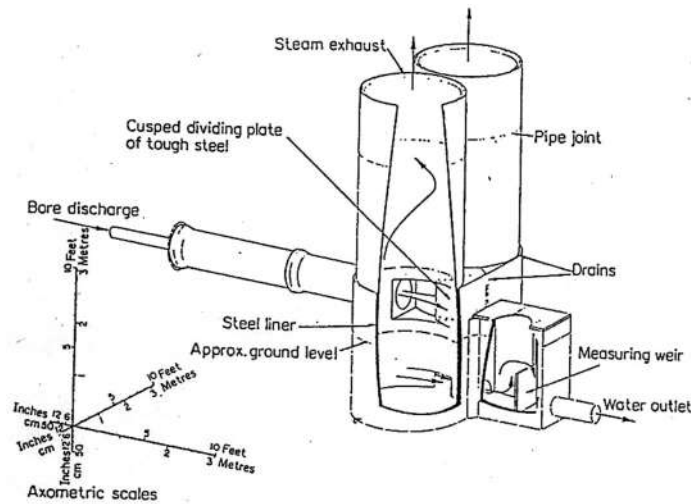


Fig 6 Sketch of a twin Silencer used at Wairakei

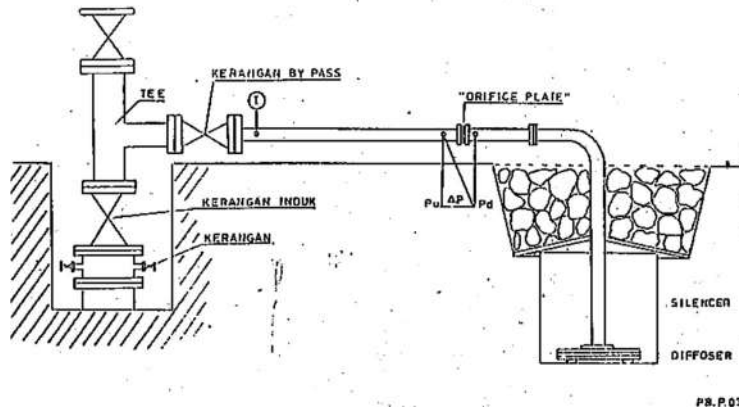
Gambar 5.6a Skema Silencer yang Digunakan di Lapangan Wairakei



Gambar 8.6b Contoh Silencer yang Digunakan di Lapangan Wairakei

Jika fluida yang keluar dari sumur adalah uap kering, lubang berisi batuan dengan berbagai ukuran dan bentuk biasanya digunakan sebagai peredam. Sebagai ilustrasi, Gambar 5.7

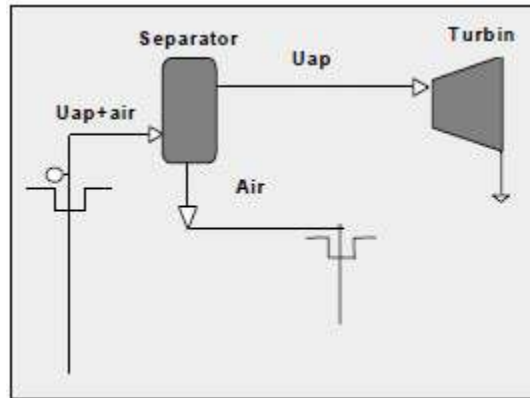
menunjukkan peredam jenis yang digunakan di lapangan panas bumi Kamojang.



Gambar 5.7 Contoh Silencer di Lapangan Kamojang (Lapangan Panasbumi Dominasi Uap)

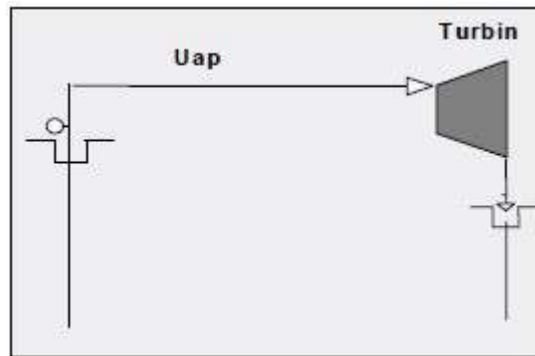
Pipa Alir

Pipa aliran pada lapangan panas bumi terdiri atas pipa aliran uap, pipa aliran air, dan pipa aliran uap/air apabila cairan dari lubang sumur terdiri dari dua fasa. Pada lapangan panas bumi yang didominasi air, pipa mengalir dua fasa (campuran steam dan air) dari lubang sumur ke separator, pipa aliran steam mengalir dari separator ke turbin, dan pipa aliran air mengalir dari sumur ke pemisah. Separator ke Turbin Separator ke Sumur Injeksi. Selain itu juga terdapat pipa aliran kondensat untuk pembuangan kondensat dari PLTP ke sumur injeksi (Gambar 5.8).



Gambar 5.8 Skema Rangkaian Pipa Alir di Lapangan Panasbumi Dominasi Air

Pipa aliran di ladang panas bumi yang didominasi uap lebih sederhana dan terdiri dari pipa aliran uap yang mengalir dari lubang sumur hingga turbin. Jika injeksi dilakukan di lapangan, terdapat tabung aliran atau tabung aliran kondensat (Gambar 5.9).



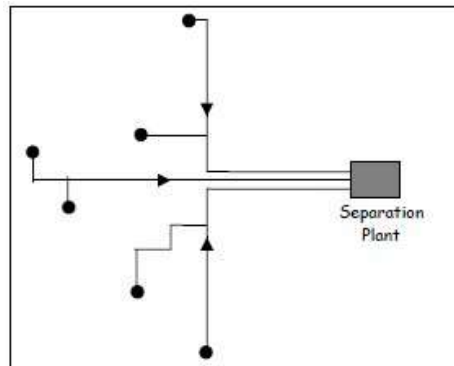
Gambar 5.9 Skema Rangkaian Pipa Alir di Lapangan Panasbumi Dominasi Uap

Pipa Alir Dua-Fasa

Di beberapa lapangan, misalnya di lapangan Awibengkok-Gn. Salak, jarak antara separator dengan kepala sumur sangat

pendek sekali, sekitar 100-200 meter. Bahkan di lapangan Wairakei, separator jaraknya hanya beberapa meter dari kepala sumur.

Dalam hal tersebut diatas, sebuah separator hanya memisahkan fasa uap dan air dari satu sumur. Separator bisa saja didisain untuk memisahkan fasa uap dan air dari sejumlah sumur, seperti halnya di lapangan Ohaaki (NZ). Dalam hal ini diupayakan agar separator terletak di tengah-tengah, agar ke semua sumur tidak terlalu besar perbedaannya. Dalam hal ini, tabung aliran dua fasa menjadi sangat panjang (Gambar 5.10). Dalam hal ini jarak antara sumur dan separator sangat jauh, misalnya di lapangan Ohaki (Selandia Baru), panjang pipa dua fasa bervariasi antara 50 hingga 800 meter.

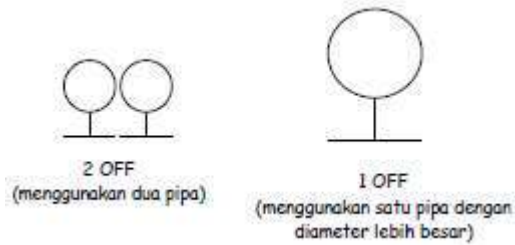


Gambar 5.10 Pipa Alir dua fasa

Ukuran pipa alir dua fasa tergantung pada banyak faktor, antara lain pada besarnya laju alir masa, kehilangan tekanan yang diizinkan, kecepatan yang diizinkan. Contoh:

- Di lapangan Ohaaki (NZ) : 250 – 500 mm
- Di lapangan Te Mihi (NZ) : 1000 mm

Ada dua alternatif pemasangan pipa, yaitu sebagai berikut:



Gambar 5.11 Alternatif Pemasangan Pipa Permukaan

Di lapangan Tongonan, misalnya, digunakan dua pipa dengan alasan sebagai berikut:

- Bila ada problem scaling di pipa yang satu, pipa yang lain bisa dipakai.
- Ada dua options (pilihan) untuk route pipa.
- Untuk mengurangi risiko ketidakstabilan tanah.

Sebagai ilustrasi harga pipa alir dua fasa pada tahun 1996 menurut Kingston Morison Ltd. untuk Class 600, 6895 kPag 288°C adalah sebagai berikut:

- 2 OFF 250 NB (XS) US\$ 770/m
- 1 OFF 350 NB (SCH80) US\$ 580/m

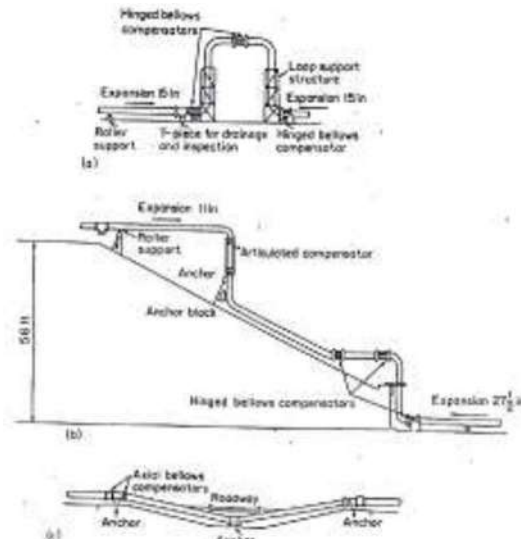
Perencanaan pipa alir dua fasa perlu dilakukan dengan baik. Terjadinya slug flow di pipa alir dua fasa sedapat mungkin dihindarkan, dengan mengatur sistim pemipaan, khususnya di tempat-tempat dengan perubahan elevasi yang cukup besar.

Pipa Alir Uap

Pipa aliran uap umumnya relatif lebih panjang dibandingkan tabung aliran dua fasa. Misalnya saja di lapangan Wairakei, beberapa pipa panjangnya mencapai 5 km. Selain itu, diameter tabung aliran uap umumnya lebih besar dari diameter tabung aliran dua fase (diameter tabung 400-1200 mm). Pipa uap juga lebih mahal.

Kingston Morson Ltd memberikan harga pipa steam untuk tahun 1996. Kelas 150, 1379 kPag 204 °C

- DISKON 2 600 NB (STD WT) US\$ 980/m
- DISKON 1 900 NB (XS) US\$ 750/m



Gambar 5.12 Contoh Pengaturan Pipa di Lapangan

Untuk menentukan route pipa disarankan untuk menggunakan peta 1:5000 dan 1:1000 untuk peta topografi. Hal-hal yang harus dipertimbangkan dalam memilih route pipa adalah:

- Jalan masuk ke lokasi pemboran
- Tanah/daerah yang panas dan tidak stabil
- Perubahan elevasi
- Jalan dan penggunaan lahan disekitarnya
- Saluran pembuangan

Insulator

Pipa uap harus selalu diisolasi untuk mencegah kehilangan panas yang berlebihan. Bahan yang digunakan sebagai insulasi sangat bervariasi dalam bentuk, ukuran, ketebalan, dan jenis bahan. Bahan yang banyak digunakan adalah:

- Mineral berserat atau seluler: Alumina, asbes, kaca, perlit, batu, silika, dll.
- Bahan organik berserat atau seluler: Tebu, kapas, kayu, gabus.
- Plastik organik seluler: Elastomer, polistiren, dll.
- Semen : Insulasi dan/atau Seal.
- Logam reflektif panas: aluminium, nikel, baja tahan karat.

Model dapat dibuat menjadi pelat, balok, semen, film pengisi lepas, dll. Ketebalan dan konduktivitas juga berbeda-beda tergantung jenis bahannya.

Bahan yang digunakan untuk isolasi pipa harus dilindungi kembali dengan bahan lain di bagian luar (selubung) untuk melindungi isolasi dari masuknya air, kerusakan mekanis, degradasi UV, dll. *Cladding* dapat berupa cat, *asphaltic*, *resinous* atau *polymeric*) atau material lain seperti seperti plastic, metal dll. Metal claddings harus lebih tahan, tidak memerlukan banyak perawatan dan dapat mengurangi panas yang hilang.

Pemilihan jenis material untuk insulasi dan cladding tergantung dari banyak faktor. Untuk sistem temperatur sedang sampai tinggi biasanya digunakan cellular atau fibrous materials. Di lapangan Ohaaki pipa diinsulasi dengan fibreglass atau calcium silicate dengan ketebalan 65 mm dan luarnya diselubungi lagi dengan aluminium atau fibreglass reinforced plastic (FRP) untuk fitting dan valves.

Di lapangan minyak Tiwi (Filipina), pipa pertama-tama diisolasi dengan kalsium silikat dan kemudian dilindungi dengan pelapis aluminium, yang kemudian diganti dengan FRP. Aluminium dicuri dan dijual, namun FRP sering dicuri karena merupakan bahan yang cocok untuk perumahan atap. Kemudian digantikan oleh , yang menggunakan perlite permacrete, yang juga mengandung kalsium silikat dan tidak mudah rusak. Karena pekerjaan ini memerlukan banyak tenaga kerja, maka tidak cocok digunakan di negara-negara yang upah untuk pekerjaan tersebut tinggi.

Condensate Traps (Condensate Pots)

Meskipun pipa telah diselubungi dengan insulator, tetapi kondensasi biasanya masih tetap terjadi di dalam pipa alir uap. Kehilangan panas harus diupayakan seminimal mungkin agar kondensat yang masuk ke turbin masih dalam batas yang diizinkan sehingga turbin tidak cepat rusak. Untuk itu pipa alir uap umumnya dilengkapi dengan sejumlah condensate traps, untuk membuang kondensat yang terbentuk disepanjang pipa. Dalam merencanakan pipa alir uap, kehilangan tekanan dan kehilangan panas yang terjadi disepanjang pipa harus diperkirakan dengan memperhitungkan adanya masa yang hilang karena keluar melalui condensate traps.

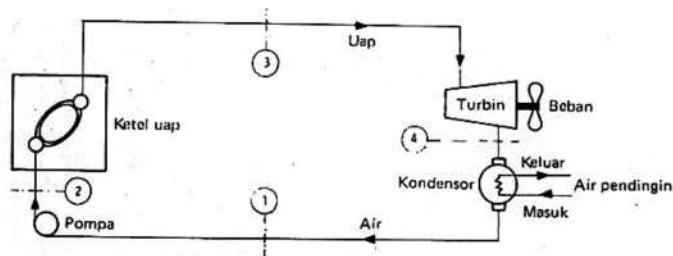
Condensate traps biasanya dipasang di pipa alir uap dengan interval tertentu, seperti halnya di lapangan Kamojang.

Saluran uap biasanya dilengkapi dengan perangkat kondensat (*steam trap*) untuk menjaga jumlah kondensat yang masuk ke turbin relatif rendah dan mencegah kerusakan pada turbin.

Daerah panas bumi seringkali terletak di pegunungan, sehingga topografinya harus diperhitungkan saat menentukan jalur pipa. Untuk mencegah pergerakan pipa (akibat pemuaian akibat suhu tinggi), digunakan loop dan penyangga (penyangga pipa), seperti: Contoh: penyangga penyeimbang, penyangga roller, penyangga geser. Penempatan loop dan support harus memperhitungkan kemiringan medan dan potensi seismik. Gunakan pemandu untuk membatasi pergerakan pipa ke satu atau dua arah .

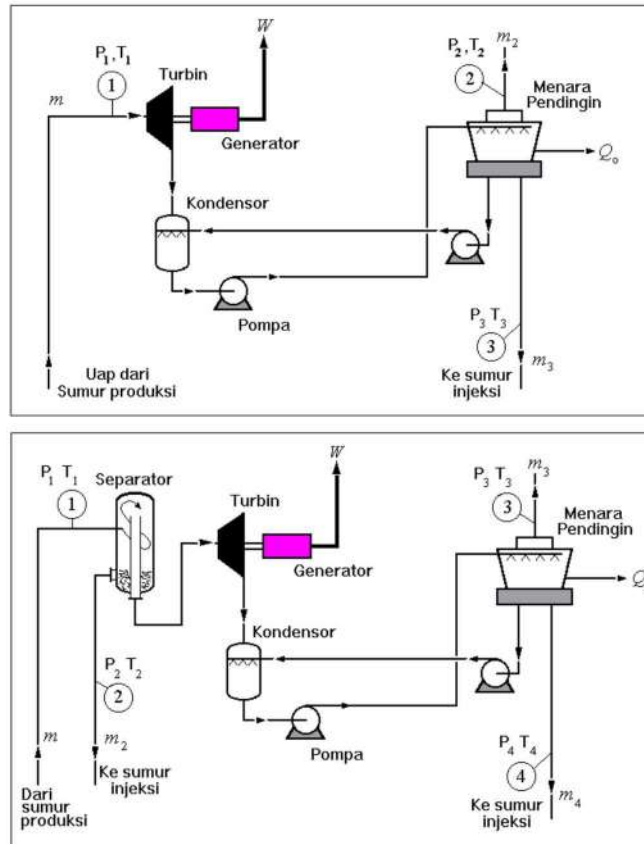
B. Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

Pada prinsipnya sama dengan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), namun sedangkan pada PLTU uap dihasilkan di permukaan bumi dengan menggunakan boiler, dalam bentuk PLTP uapnya berasal dari permukaan bumi. Reservoir panas bumi. Ketika fluida kepala sumur berada dalam fasa gas, uap langsung dialirkan ke turbin, yang mengubah energi panas bumi menjadi energi kinetik dan memutar generator sehingga menghasilkan energi listrik. Ketika fluida panas bumi keluar dari kepala sumur sebagai campuran fluida dua fasa (fasa gas dan cair), terlebih dahulu dilakukan proses pemisahan di dalam fluida tersebut. Hal ini dimungkinkan dengan melewati cairan melalui pemisah untuk memisahkan fase uap dari fase cair. Sebagian uap yang dihasilkan di separator dikirim ke turbin.



Gb. 2.1 Skema sebuah sistem turbin uap sederhana yang bekerja berdasarkan siklus Rankine

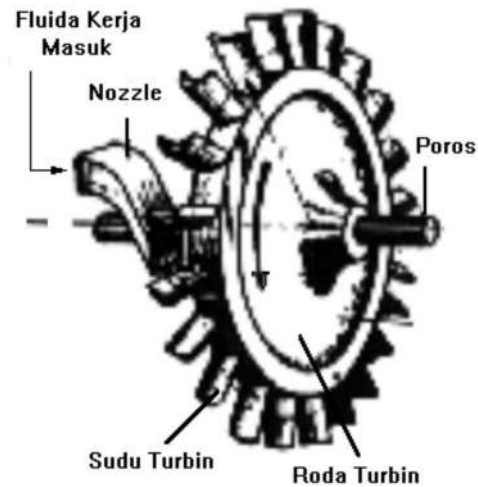
Gambar 5.13a Skema Fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)



Gambar 5.13b Skema Fasilitas Pembangkit Listrik Tenaga Panasbumi (PLTP)

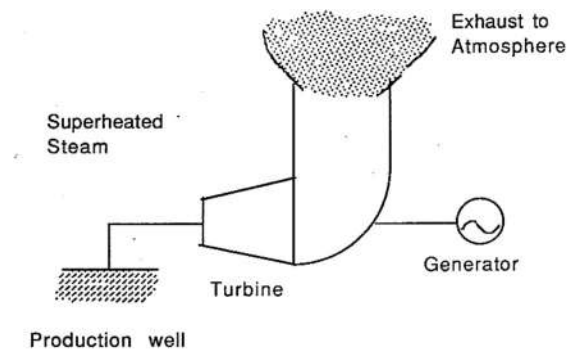
Turbin

Turbin merupakan suatu penggerak mula yang menggunakan energi media kerja (dalam hal ini uap) secara langsung untuk memutar roda turbin. Bagian turbin yang berputar disebut roda turbin. Roda turbin terletak di dalam rumah turbin. Roda turbin memutar poros yang menggerakkan atau memutar suatu beban. Bebannya adalah generator listrik.

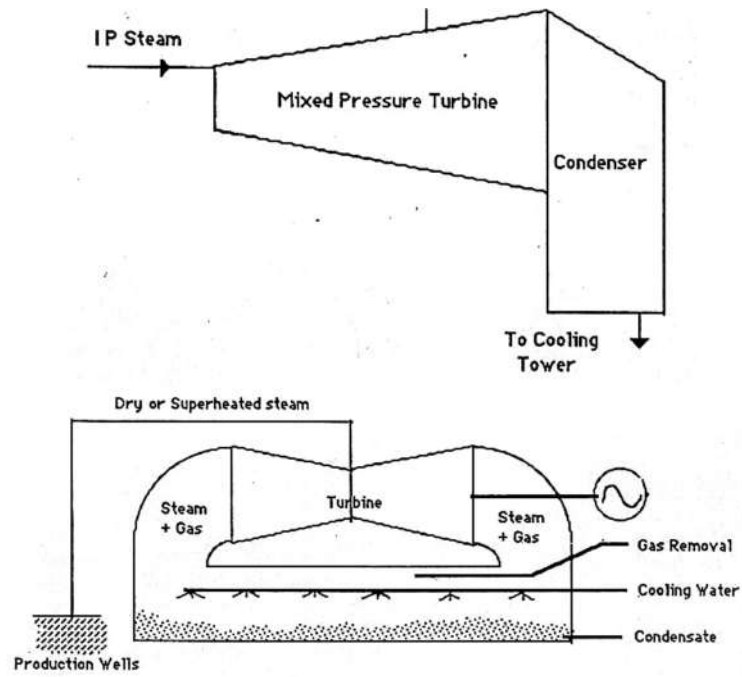


Gambar 5.14 Roda & Sudu Turbin Uap

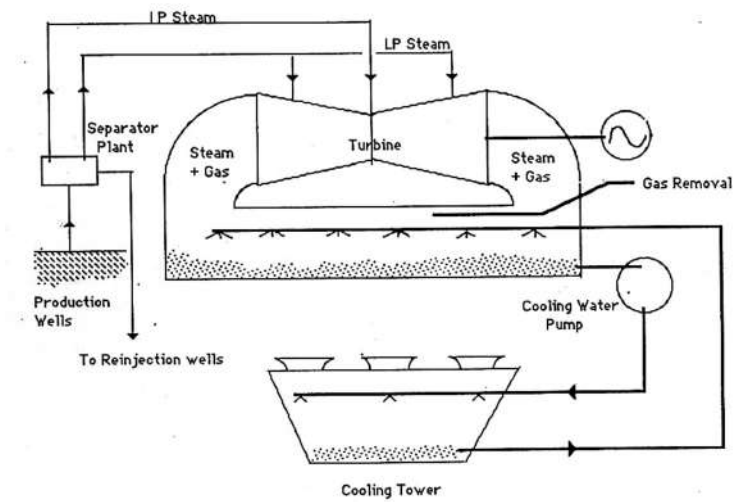
Pada dasarnya, dikenal dua jenis turbin : turbin dengan tekanan keluaran sama dengan tekanan udara luar (*Atmospheric Exhaust/Back Pressure Turbine*) selanjutnya disebut turbin tanpa kondenser dan turbin dengan kondenser (*Condensing Unit Turbine*). Pada turbin tanpa kondensor, fluida yang keluar dari turbin langsung dibuang ke udara, sedangkan pada turbin dengan kondensor, fluida yang keluar dari turbin mengalir ke kondensor untuk dikondensasikan.

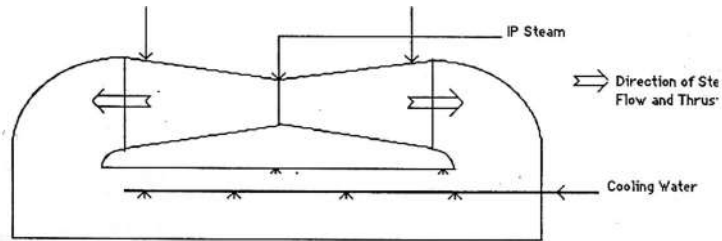


Gambar 5.15 Atmospheric Exhaust/Back Pressure Turbin



Gambar 5.16 Condensing Unit Turbin





Gambar 5.17 Double Flow Turbin

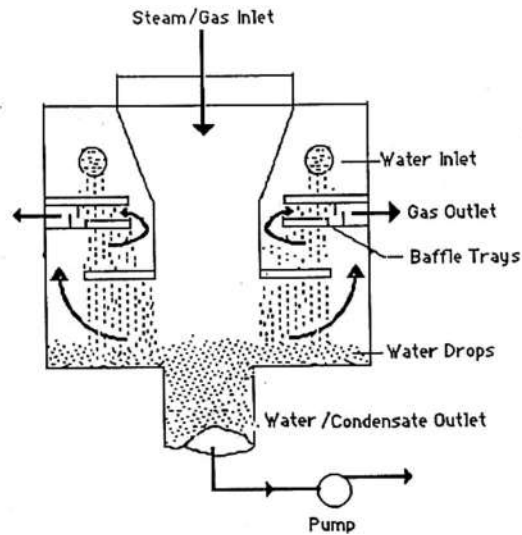
Condenser

Fungsi kondensor adalah untuk menciptakan tekanan vakum (tekanan di bawah atmosfer). Proses terciptanya ruang hampa ini bersifat termodinamika, bukan mekanis. Hal ini dimungkinkan karena setelah keluar dari turbin, cairan yang sebagian besar masih berupa uap bercampur dengan air dingin di kondensor dan mencapai kesetimbangan massa dan energi. Seperti yang Anda ketahui, uap memiliki volume air 100 kali lipat. Sebagai alternatif, kita dapat mengatakan bahwa air mempunyai massa 100 kali massa uap dengan volume yang sama oleh karena itu, jika uap memenuhi seluruh ruang di dalam kondensor dalam waktu tertentu dan kemudian air disemprotkan, maka volume uap tersebut akan mengecil karena sebagian atau seluruh uap akan diubah menjadi air (sebagai (tergantung banyaknya air)). Volumennya jauh lebih kecil. Dengan berkurangnya volume uap di dalam kondensor, ruang di dalam kondensor menjadi vakum.

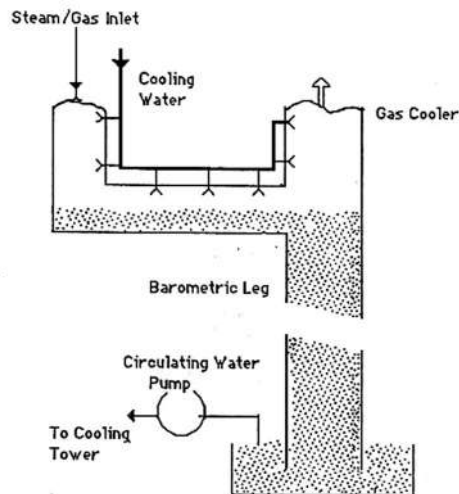
Derajat vakum yang dicapai tergantung pada kandungan gas yang tidak dapat terkondensasi, kemurnian permukaan tabung kondensor dan, yang terpenting, suhu kondensasi uap, yang dipengaruhi oleh suhu cairan pendingin yang tersedia.

Ada dua jenis kondensor : (a) kondensor kontak langsung atau jet, dan (b) kondensor permukaan. Pada kondensor kontak langsung, uap yang keluar dari turbin bersentuhan langsung dengan fluida pendingin (Gambar 5.18 dan 5.19). Namun, pada kondensor permukaan, uap yang keluar dari turbin tidak

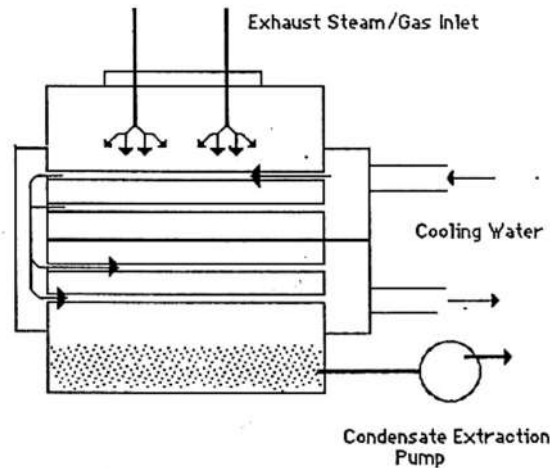
bersentuhan langsung dengan cairan pendingin. Proses pendinginan berlangsung dalam suatu alat penukar panas (*heat exchanger*), yang pada umumnya merupakan alat penukar panas *shell-and-tube*.



Gambar 5.18 Skema Direct Contact/Jet Condenser Jenis Counter Current Low Level



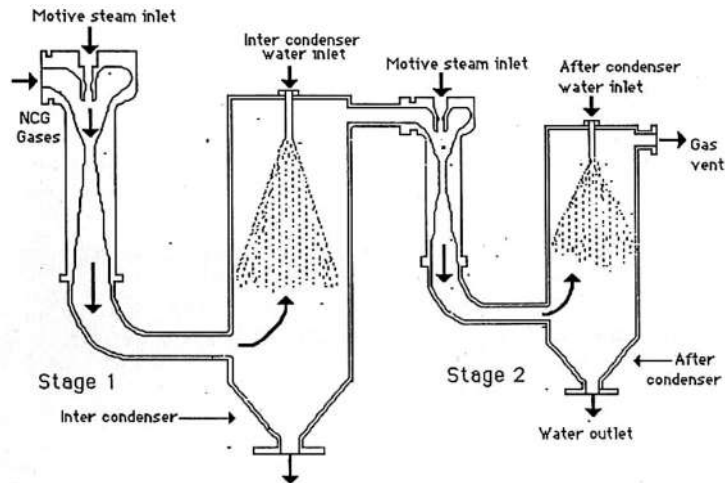
Gambar 5.19 Skema Direct Contact/Jet Condenser Jenis Cross Current Barometric Log



Gambar 5.20 Skema Surface Condenser (Double Pass Tubular Condenser)

Gas Exhauster

Untuk menjaga agar kondisi di condenser tetap vakum, maka on condensable gas harus dikeluarkan dari condenser. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah membuangnya dengan menggunakan steam jet ejector (Gambar 5.21)



Gambar 5.21 Two Stage Ejector System

Sistem Pendingin

Kondensor memerlukan air pendingin dalam jumlah besar. Air berasal dari sungai, namun sungai yang terletak tidak jauh dari kawasan panas bumi biasanya tidak cukup besar untuk menyerap panas. Metode yang paling umum digunakan adalah menggunakan menara pendingin. Ada dua jenis menara pendingin, yaitu,

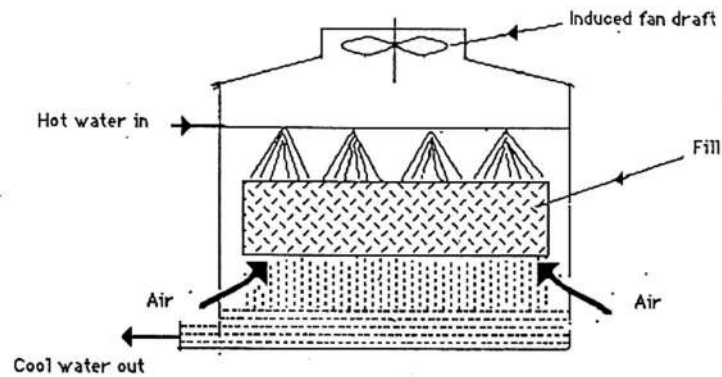
(a) *Mechanical draft cooling tower* (Gambar 5.22)

(b) *Natural Draught Cooling Towers* (Gambar 5.23)

Mechanical Draft Cooling Tower

Dalam menara pendingin rancangan mekanis, air panas dari kondensor disemprotkan ke struktur kayu berlapis yang disebut pengisi. Saat air mengalir melalui packing, terjadi perpindahan panas dari air panas ke udara (ada kipas di bagian atas menara pendingin). Air kemudian dipompa kembali ke kondensor. Menara pendingin jenis ini relatif murah dan fleksibel karena kecepatan kipas dapat disesuaikan dengan kondisi udara luar dan beban turbin. Kekurangannya adalah

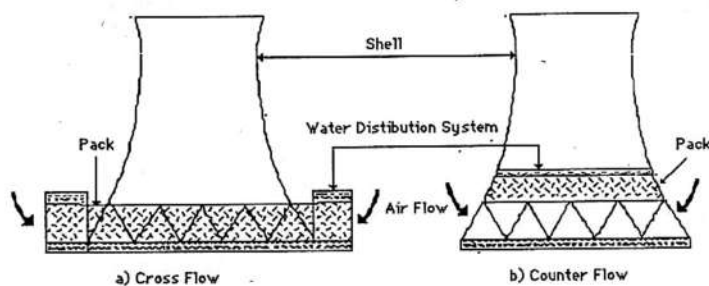
konsumsi energi untuk menggerakkan kipas relatif tinggi dan biaya perawatannya relatif tinggi



Gambar 5.22 Mechanical draft cooling tower

Natural Draught Cooling Towers

Natural Draught Cooling Tower bekerja dengan prinsip yang sama dengan *mechanical draft cooling tower*, kecuali disini aliran udara pendingin tidak berasal dari fan, tapi dikarenakan bentuk dan tingginya cooling tower. Aliran bisa diatur searah maupun berlawanan arah.

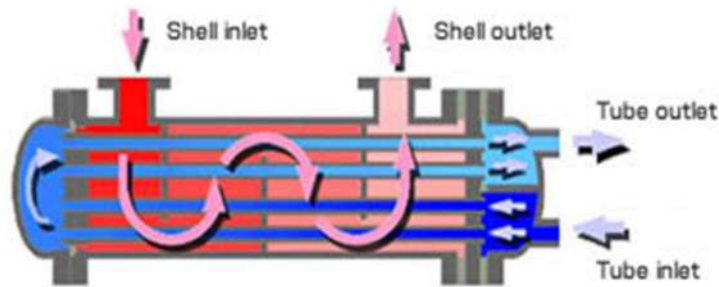


Gambar 5.23 Natural Draught Cooling Towers

Cooling tower jenis ini relatif mahal dan dan tidak sefleksibel *mechanical draft cooling tower*. Salah satu keuntungannya adalah biaya perawatannya relatif rendah.

C. Alat Penukar Panas

Heat exchanger, juga dikenal sebagai alat penukar kalor (APK), digunakan di banyak tempat bisnis. Masing-masing dari banyak jenis dirancang untuk memenuhi kebutuhan tertentu. Namun, karena konstruksinya yang sederhana dan kemampuan untuk memproses berbagai karakteristik fluida kerja, APK shell & tube merupakan jenis APK yang paling banyak digunakan.

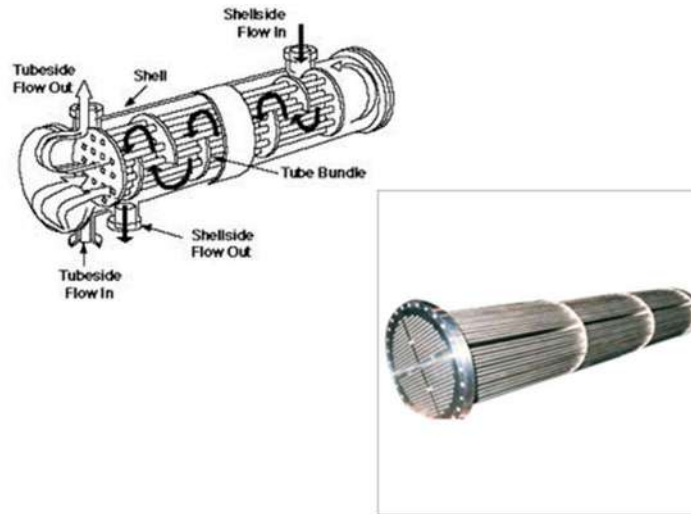


http://www.kamui.co.jp/english/products/shell_and_tube/shell_and_tube_img02.jpg

Gambar 5.24 skema sederhana alat penukar kalor shell & tube

Kami hanya akan membahas jenis APK ini di sini, tetapi pembaca yang ingin mempelajari jenis APK lainnya harus melakukannya di sumber lain. Prinsip-prinsip utama dan konsep-konsep pertukaran energi panas pada APK jenis lain adalah sama dengan yang dibahas di bagian ini.

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.24 bagian utama alat tersebut adalah sejumlah pipa atau pipa tertentu yang terpasang di dalam shell. Fluida tertentu mengalir di dalam tube, dan fluida kerja lainnya dengan temperatur yang berbeda mengalir di permukaan luarnya. Di antara kedua cairan, proses pemindahan energi panas terjadi melalui dinding pipa dengan ketebalan dan panjang tertentu.



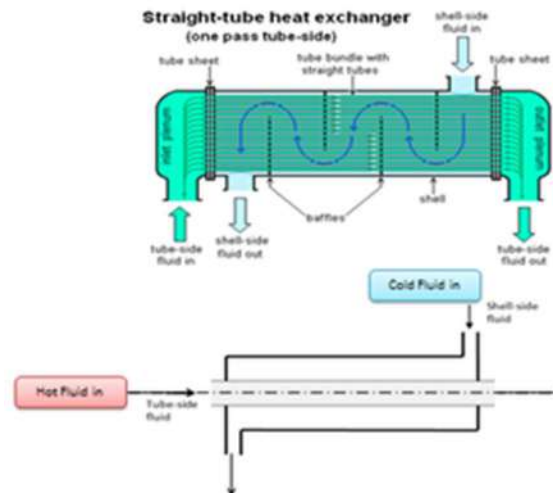
Gambar 5.25 skema sederhana alat penukar kalor shell & tube

Penukar panas bertindak sebagai alat pendingin atau pemanas untuk aliran media atau cairan lain yang akan didinginkan atau dipanaskan. Misalnya sebagai alat pendingin aliran fluida kerja suatu proses tertentu, alat penukar kalor adalah suatu tempat atau media yang dilalui suatu fluida panas, dan fluida tersebut didinginkan hingga mencapai temperatur tertentu yang lebih rendah dibandingkan saat digunakan.

Fluida memasuki aliran penukar panas. Untuk itu perlu disediakan aliran pendingin fluida kerja, yaitu aliran zat cair tersendiri yang suhu rata-ratanya lebih rendah pada saat bersirkulasi melalui alat penukar kalor (APK). Hal ini memungkinkannya untuk menyerap sejumlah energi panas dari fluida kerja. Alat penukar kalor yang berfungsi sebagai pemanas harus menyediakan aliran fluida yang lebih panas dengan temperatur yang lebih tinggi agar dapat memanaskan aliran fluida proses yang dipanaskan tersebut sehingga temperaturnya meningkat hingga nilai tertentu yang diinginkan.

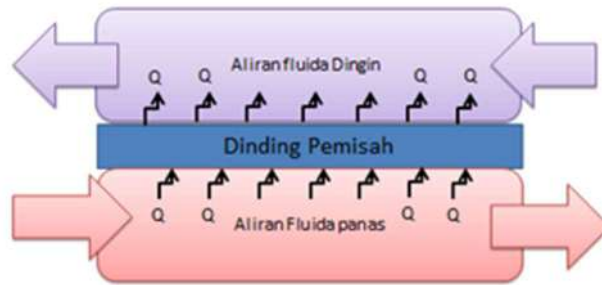
Prinsip Pertukaran Energi Panas di dalam APK

Pada bagian ini, kita akan membahas bagaimana energi panas dipertukarkan untuk memanaskan atau mendinginkan aliran fluida tertentu yang ada di dalam APK jenis pipa. Skema sederhana APK ini digambarkan pada gambar 5.26, di mana APK berfungsi sebagai alat pemanas untuk aliran fluida yang dialirkan di dalam bagian shell.



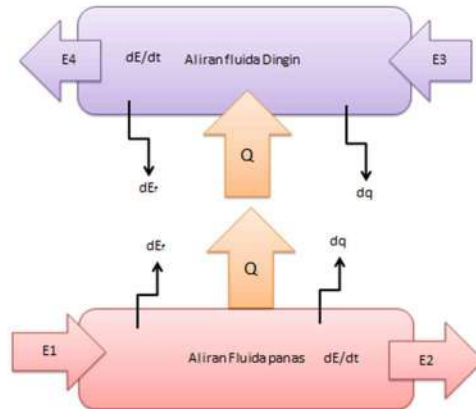
Gambar 5.26 skema sederhana alat penukar kalor jenis tube

Dinding pipa memiliki ketebalan dan panjang tertentu untuk memungkinkan proses pertukaran energi panas dari aliran fluida yang panas ke aliran fluida yang lebih dingin. Gambar 5.27 menunjukkan rencana sederhana untuk pertukaran energi panas melalui dinding pemisah pipa APK.



Gambar 5.27 skema sederhana pertukaran energi panas di dalam APK

Gambar 5.28 menunjukkan prinsip kesetimbangan energi panas untuk kedua fluida kerja tersebut yang berlangsung di dalam APK. Prinsip dasar pertukaran energi panas di dalam APK adalah bahwa, dalam kondisi di mana tidak ada energi panas yang terbuang ke sekeliling APK, jumlah energi panas yang dilepaskan oleh aliran fluida panas di dalam APK harus sama dengan jumlah energi panas yang diterima oleh aliran fluida dingin di dalam alat yang sama.



Gambar 5.28 Prinsip kesetimbangan energi panas di dalam APK

Kesetimbangan energi panas aliran fluida panas: Pada bagian pertama, kita akan melihat prinsip kesetimbangan energi untuk aliran fluida pemanas yang mengalir di dalam pipa. Aliran fluida

pemanas dianggap mengalir saat mengangkut sejumlah energi sebesar E_1 . Setelah fluida pemanas mengalir di dalam pipa, energi total yang diangkutnya digunakan untuk memanaskan fluida yang mengalir di permukaan luar pipa, energi panas yang dilepaskannya (E_2) diperkirakan sebesar Q karena semua energi yang diangkutnya digunakan untuk memanaskan.

Selama proses pemanasan di APK, jumlah energi yang terkandung dalam aliran fluida panas di dalam sistem berubah seiring fungsi waktu. Besarnya perubahan energi panas dianggap sebagai dE/dt . Kedua, ketika mengalir melalui pipa, energi panas dapat hilang melalui dinding APK karena perbedaan suhu antara APK dan udara di sekitarnya. Anggaplah jumlah energi yang hilang sebagai dq . Bahkan ketika cairan bersuhu tinggi mengalir di dalam pipa, kehilangan energi terjadi karena gesekan dengan permukaan bagian dalam pipa yang mempunyai kekasaran permukaan tertentu. Besarnya kehilangan energi gesekan diasumsikan dE_f .

Prinsip kesetimbangan energi

Selanjutnya, pada bagian ini kita akan menerapkan prinsip kekekalan energi atau prinsip kesetimbangan energi, di mana prinsipnya adalah sebagai berikut :

(jumlah energi yang masuk ke dalam sistem) = (perubahan energi di dalam sistem) + (jumlah energi yang keluar dari sistem)

Sekarang apabila kita tinjau prinsip kesetimbangan energi pada bagian sistem aliran fluida panasnya saja maka kita memiliki :

(jumlah energi yang masuk ke dalam sistem) = E_1

(perubahan energi di dalam sistem) = dE/dt

(jumlah energi yang keluar dari sistem) = $Q + E_2 + dq + dE_f$

Oleh karena itu bagi sistem aliran fluida panas tersebut di atas kita memiliki persamaan :

$$E_1 = (dE/dt) + Q + E_2 + dq + dE_f \quad (5.1)$$

Untuk menerapkan persamaan (8.1) di atas dalam bentuk yang lebih sederhana agar dapat dipergunakan di dalam perhitungan-perhitungan praktis maka kita tinjau terlebih dahulu prinsip-prinsip termodinamika di bawah ini. Secara termodinamika, energi yang terangkut di dalam suatu aliran fluida (E) adalah gabungan dari energi dalam (u), energi tekanan ($p\upsilon$), energi kinetik ($v^2/2$), dan energi potensialnya (gZ):

$$E = u + p\upsilon + \frac{v^2}{2} + gZ \quad (5.2)$$

Di sini p adalah tekanan fluida, υ volume jenis fluida, v kecepatan rata-rata aliran fluida, g percepatan gravitasi, Z ketinggian aliran fluida terhadap suatu referensi tertentu.

Jumlah dari energi dalam dan energi tekanan atau kerja aliran biasa disebut Enthalpi (h), sehingga :

$$E = h + \frac{v^2}{2} + gZ \quad (5.3)$$

Perbedaan antar energi aliran fluida saat masuk dan saat meninggalkan APK dapat dituliskan sebagai berikut :

$$E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{v_1^2}{2} + gZ_1 \right) - \left(h_2 + \frac{v_2^2}{2} + gZ_2 \right) \quad (5.4)$$

Atau,

$$E_1 - E_2 = (h_1 - h_2) + \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) + (g(Z_1 - Z_2)) \quad (5.5)$$

Penerapan beberapa asumsi :

Sekarang kita kembali ke persamaan (5.1). Kita akan menerapkan beberapa asumsi atau anggapan-anggapan yang biasanya lazim diterapkan bagi kondisi aliran fluida di dalam APK dan beberapa dampak dari penerapan asumsi-asumsi tersebut. Asumsi pertama, aliran fluida panas yang masuk dan keluar APK kita anggap stasioner atau steady sehingga kita dapat menganggap (dE/dt) = 0

Asumsi kedua, kehilangan energi panas ke sekeliling APK kita anggap jauh lebih kecil besarnya dibandingkan dengan laju pertukaran energi panas sehingga kita dapat menganggap : $dq = 0$

Asumsi kedua, kehilangan energi karena gesekan aliran fluida dengan permukaan dalam tube kita anggap juga kecil besarnya sehingga kita dapat menganggap : $dE_f = 0$

Dalam keadaan seperti itu maka persamaan kesetimbangan energi bagi aliran fluida panas menjadi :

$$Q = E_1 - E_2 \quad (5.6)$$

Di mana besarnya ($E_1 - E_2$) dapat dihitung menggunakan persamaan (8.5).

Selanjutnya, apabila beda energi kinetik dan beda energi potensial di antara aliran fluida panas saat masuk dan saat meninggalkan APK dianggap kecil maka :

$$Q = h_1 - h_2 \quad (5.7)$$

Persamaan (5.7) tersebut dapat dipergunakan untuk memperkirakan besarnya jumlah energi panas yang dilepaskan oleh aliran fluida panas (dalam satuan J/kg) di dalam APK apabila fluida panas tersebut mengalami perubahan fasa dari uap menjadi cair misalnya.

Sedangkan apabila aliran fluida panas yang mengalir di dalam APK tidak mengalami perubahan fasa maka :

$$Q_{12} = c_p (T_1 - T_2) \quad (5.8)$$

Kesetimbangan energi pada aliran fluida dingin

Pada bagian yang kedua di bawah ini kita akan tinjau prinsip kesetimbangan energi yang terjadi pada aliran fluida dingin yang mengalir di bagian luar tube, atau di bagian dalam shell (lihat gambar 5).

Pada aliran fluida dingin, sewaktu memasuki bagian shell kita anggap aliran fluida ini mengangkut sejumlah energi sebesar E_3 . Kemudian setelah mengalir di dalam shell sambil dipanaskan atau menerima sejumlah energi panas sebesar Q , energi totalnya meningkat menjadi sebesar E_4 .

Selama berlangsungnya proses pemanasan di dalam APK, energi yang terkandung di dalamnya berubah-ubah besarnya

fungsi waktu, dan besarnya perubahan energi panas tersebut kita anggap sebesar dE/dt . Kemudian, pada saat yang bersamaan, selama mengalir di dalam shell, karena adanya perbedaan temperatur dengan udara yang ada di sekitar APK maka bisa saja terjadi adanya sejumlah energi panas yang hilang melalui dinding APK. Besarnya energi yang hilang ini kita anggap sebesar dq . Kemudian, juga pada saat yang bersamaan, selama aliran fluida panas mengalir di dalam tube terdapat kerugian energi karena gesekan dengan permukaan bagian dalam tube yang memiliki kekasaran permukaan tertentu. Besarnya kerugian energi gesekan ini kita anggap sebesar dEf . Sekarang apabila kita tinjau prinsip kesetimbangan energi pada bagian sistem aliran fluida dingin maka kita memiliki :

$$\begin{aligned} (\text{jumlah energi yang masuk ke dalam sistem}) &= E_3 + Q \\ (\text{perubahan energi di dalam sistem}) &= dE/dt \\ (\text{jumlah energi yang keluar dari sistem}) &= E_4 + dq + dEf \end{aligned}$$

Oleh karena itu bagi sistem aliran fluida panas tersebut di atas kita memiliki persamaan :

$$E_3 + Q = (dE/dt) + E_4 + dq + dEf \quad (5.9)$$

Kemudian, apabila kita terapkan beberapa asumsi seperti yang kita terapkan terhadap aliran fluida panas di mana, aliran fluida dingin yang masuk dan keluar APK kita anggap stasioner atau steady maka $(dE/dt) = 0$

Asumsi kedua, kehilangan energi panas ke sekeliling APK kita anggap jauh lebih kecil besarnya dibandingkan dengan laju pertukaran energi panas sehingga kita dapat menganggap : $dq = 0$

Asumsi kedua, kehilangan energi karena gesekan aliran fluida dengan permukaan dalam tube kita anggap juga kecil besarnya sehingga kita dapat menganggap : $dEf = 0$

Dalam keadaan seperti itu maka persamaan kesetimbangan energi bagi aliran fluida dingin menjadi :

$$Q = E_4 - E_3 \quad (5.10)$$

Selanjutnya, apabila beda energi kinetik dan beda energi potensial di antara aliran fluida dingin saat masuk dan saat meninggalkan APK dianggap kecil maka :

$$Q = h_4 - h_3 \quad (5.11)$$

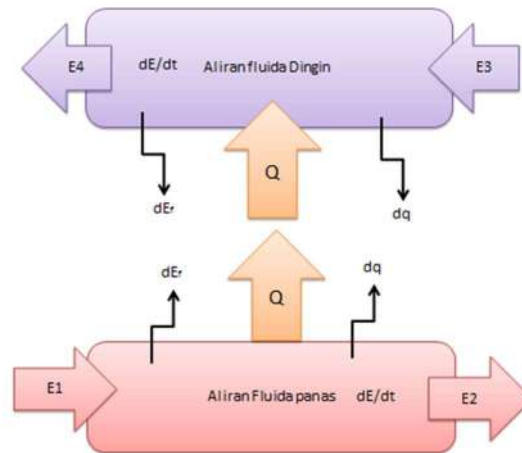
Persamaan (5.11) tersebut dapat dipergunakan untuk memperkirakan besarnya jumlah energi panas yang diterima oleh aliran fluida (dalam satuan J/kg) di dalam APK apabila fluida tersebut mengalami perubahan fasa.

Sedangkan apabila aliran fluida dingin yang mengalir di dalam APK tidak mengalami perubahan fasa maka :

$$Q_{34} = c_p (T_4 - T_3) \quad (8.12)$$

D. Studi Kasus Penerapan Alat Penukar Kalor

Sebuah alat penukar panas double pipe (APK) digunakan untuk mendinginkan 0.15 kg/s aliran minyak pelumas panas dengan temperatur 115°C yang berasal dari mesin generator dengan laju aliran massa 0.25 kg/s. Media pendingin yang digunakan adalah air dengan temperatur masuk 25°C dan laju aliran massa 0.3 kg/s. Diketahui panas jenis minyak pelumas (c_p) = 2200 J/kgK dan panas jenis air (c_{pc}) = 4180 J/kgK. Hitunglah temperatur air pendingin saat keluar dari APK.



Pembahasan:

a) Kestimbangan Energi pada Aliran Minyak Pelumas:

Kita asumsikan:

Aliran stasioner ($dE/dt = 0$)

Kehilangan panas ke sekeliling kecil ($dq = 0$)

Kehilangan energi karena gesekan kecil ($dE_f = 0$)

Perbedaan energi kinetik dan potensial kecil

Tidak ada perubahan fasa

Persamaan kestimbangan energi:

$$Q_{12} = c_{ph} (T_1 - T_2)$$

di mana:

Q_{12} : Energi panas yang dilepaskan oleh minyak pelumas (J/kg)

c_p : Panas jenis minyak pelumas (J/kgK)

T_1 : Temperatur masuk minyak pelumas ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 : Temperatur keluar minyak pelumas ($^{\circ}\text{C}$)

Menghitung Q_{12} :

$$Q_{12} = (2200 \text{ J/kgK}) (115^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}) = 99000 \text{ J/kg}$$

Menghitung laju pelepasan energi panas (Q_h):

$$Q_h = m_h * Q_{12}$$

$$= (0.15 \text{ kg/s}) * (99000 \text{ J/kg})$$

$$= 14850 \text{ W}$$

b) Kestimbangan Energi pada Aliran Air Pendingin:

$$Q_h = Q_c = 14850 \text{ W}$$

Persamaan kestimbangan energi:

$$Q_c = m_c * c_{pc} (T_4 - T_3)$$

Q_c : Energi panas yang diterima oleh air pendingin (J/s)

m_c : Laju aliran massa air pendingin (kg/s)

c_{pc} : Panas jenis air (J/kgK)

T_3 : Temperatur masuk air pendingin ($^{\circ}\text{C}$)

T_4 : Temperatur keluar air pendingin ($^{\circ}\text{C}$)

Menghitung T_4 :

$$T_4 = T_3 + (Q_h / (m_c * c_{pc}))$$

$$= 25^{\circ}\text{C} + (14850 \text{ W} / (0.3 \text{ kg/s} * 4180 \text{ J/kgK}))$$

$$= 25^{\circ}\text{C} + 8.87^{\circ}\text{C}$$

$$= 33.87^{\circ}\text{C}$$

Kesimpulan:

Temperatur air pendingin saat keluar dari APK adalah 33.87°C .

Perbedaan dengan Studi Kasus Sebelumnya:

Pada studi kasus ini, nilai laju aliran massa minyak pelumas (m_h) adalah 0.15 kg/s , laju aliran massa air pendingin (m_c) 0.3 kg/s , temperatur masuk minyak pelumas (T_1) 115°C , dan temperatur masuk air pendingin (T_3) 25°C . Hal ini menghasilkan perbedaan nilai Q_h , Q_c , dan T_4 dibandingkan dengan studi kasus sebelumnya.

Studi Kasus – 1

Sebuah pembangkit tenaga panas bumi menggunakan air panas bumi sebagai sumber energinya

Parameter Sistem:

Temperatur air panas bumi masuk (T_1): 175°C

Laju aliran massa air panas bumi (m_h): 500 kg/s

Temperatur air panas bumi keluar (T_2): 110°C

Tekanan ammonia masuk turbin (P_1): $3,5\text{ MPa}$

Temperatur ammonia masuk turbin (T_3): 150°C

Laju aliran massa ammonia (m_a): 280 kg/s

Tekanan ammonia keluar turbin (P_2): 450 kPa

Efisiensi isentropik turbin (η_t): 92%

Tugas:

Hitung daya listrik yang dihasilkan sistem pembangkit (P).

Hitung efisiensi termal siklus (η_{th}).

Hitung efisiensi isentropik pompa (η_p).

Catatan:

Gunakan tabel atau software termodinamika untuk menentukan entalpi (h) pada berbagai kondisi. Lakukan interpolasi linear untuk mendapatkan nilai entalpi yang tidak tersedia di tabel. Gunakan rumus yang telah diberikan untuk menghitung daya listrik, efisiensi termal siklus, dan efisiensi isentropik pompa.

Tujuan:

Menganalisis kinerja pembangkit listrik tenaga panas bumi siklus Rankine ammonia. Mempelajari pengaruh parameter sistem terhadap daya listrik dan efisiensi. Memahami konsep dasar siklus Rankine dan termodinamika teknik.

Penting:

Pastikan untuk menggunakan unit yang konsisten dalam semua perhitungan. Tunjukkan semua langkah perhitungan dengan jelas dan rapi. Periksa kembali hasil perhitungan untuk memastikan keabsahannya.

DAFTAR PUSTAKA

Cengel, Yunus A. & Boles, Michael A., Thermodynamics: An Engineering Approach, New York, McGraw-Hill, 2007

Reynolds, William C. & Perkins, Henry C., Engineering Thermodynamics, New York, McGraw-Hill, 1987
Danau “penggorengan”, Sumber Air panas terbesar selandia baru. merdeka.com. (n.d.).
<https://www.merdeka.com/gaya/danau-penggorengan-sumber-air-panas-terbesar-selandia-baru.html>

Developer, Medcom. id. (2022, July 22). Mengenal Struktur Lapisan Bumi Dari terdalam sampai terluar. medcom.id.
<https://www.medcom.id/pendidikan/tips-pendidikan/0k8ayjWK-mengenal-struktur-lapisan-bumi-dari-terdalam-sampai-terluar>

Jake Lowenstern. (n.d.). Silica sinter (an amorphous form of silicon dioxide) forms from the... Silica sinter (an amorphous form of silicon dioxide) forms from the... | U.S. Geological Survey.
<https://www.usgs.gov/media/images/silica-sinter-amorphous-form-silicon-dioxide-forms>

Localexpert, R. P. (2010, November 20). Tipe Alterasi. SERBA-SERBI GEOLOGI. <https://localexpert.wordpress.com/2010/11/20/tipe-alterasi-hidrotermal/>

Slideshare. (2013, April 27). Geothermal manifestation. SlideShare.
<https://www.slideshare.net/danangincina/manifestasipanasbumi-120107213800phpapp02>

Utami, S. N. (2021, December 21). Teori Lempeng Tektonik. KOMPAS.com.
<https://www.kompas.com/skola/read/2021/12/21/130956769/teori-lempeng-tektonik>

Wikimedia Foundation. (2024, March 22). Subduksi. Wikipedia.
<https://id.wikipedia.org/wiki/Subduksi>

Yunianto, F. (2023, May 22). Pembangkit geothermal Kamojang Pelopor pemanfaatan energi berkelanjutan. Antara News. <https://www.antaranews.com/berita/3549501/pembangkit-geothermal-kamojang-pelopor-pemanfaatan-energi-berkelanjutan>

🏆 Protectedpool ➤ most powerful and safest web3 smart Defi Wallet 🗝️. 🏆 ProtectedPool ➤ Most Powerful and Safest Web3 Smart DeFi Wallet 🗝️. (n.d.). <https://docplayer.info/49209585-Bab-iv-sistem-panas-bumi.html>