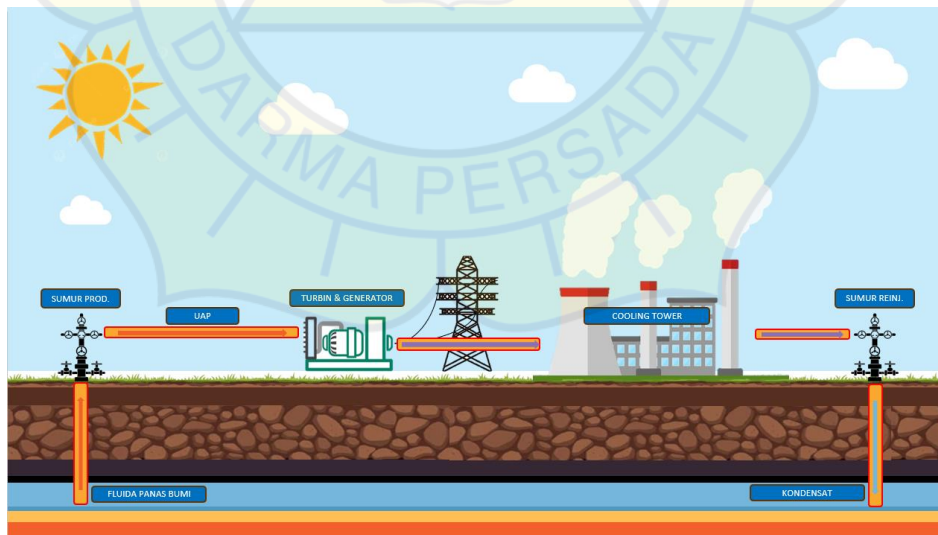


# BAB 2

## Tinjauan Pustaka

### 2.1 Prinsip Kerja PLTP

Energi geothermal, dalam bentuk uap alami dan/atau air panas, telah dimanfaatkan selama beberapa dekade untuk menghasilkan listrik [12]. Prinsip kerja PLTP adalah memanfaatkan energi panas yang terkandung dalam fluida geothermal tersebut untuk menghasilkan listrik. Fluida geothermal yang diproduksi melalui sumur produksi dialirkan menuju sistem pemrosesan. Proses ini melibatkan beberapa komponen utama, termasuk *separator unit* yang memisahkan uap dari cairan, turbin untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik, dan generator yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Setelah melalui turbin, fluida geothermal akan mengalami pendinginan di kondensor dan kembali diinjeksikan ke dalam reservoir melalui sumur injeksi untuk menjaga keseimbangan sistem geothermal. Secara umum, prinsip kerja PLTP dapat dilihat pada Gambar 2.



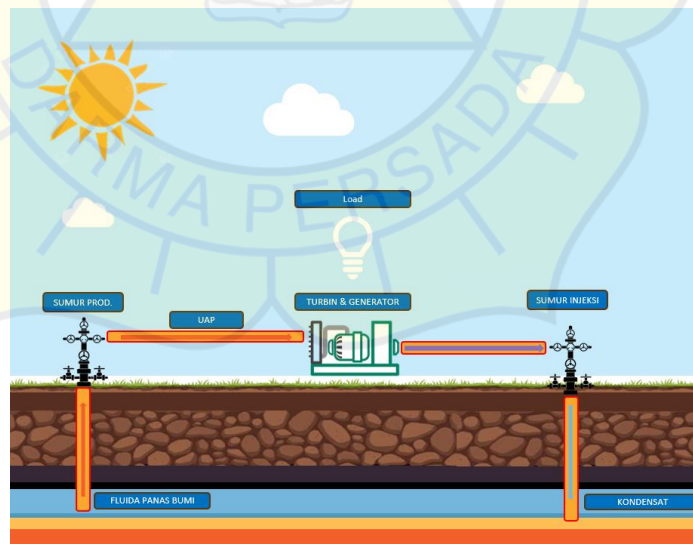
Gambar 2 Konsep pemanfaatan energi geothermal

### 2.1.1 Sistem PLTP dan jenisnya

Terdapat perbedaan antara jenis PLTP berdasarkan siklus yang digunakan, beberapa diantaranya yaitu siklus *dry steam*, *flash steam*, dan *binary cycle*. *Dry steam* menggunakan uap geothermal tanpa pemisahan dan langsung dialirkan untuk memutar turbin, *flash steam* memanfaatkan air panas dengan tekanan tinggi yang diproses melalui *flasher* untuk menghasilkan uap, sementara *binary cycle* menggunakan fluida kerja yang memiliki titik didih rendah yang dipanaskan oleh fluida geothermal, dan uapnya untuk menggerakkan turbin. Setiap jenis PLTP memiliki karakteristik yang disesuaikan dengan kondisi fluida geothermal di lokasi PLTP.

Sistem PLTP memiliki beberapa jenis sesuai dengan karakteristik kondisi fluida geothermal yang tersedia [13], diantaranya adalah;

1. **Siklus Uap Kering (*Direct Dry Steam*)**: Sistem ini digunakan ketika fluida geothermal yang dihasilkan dari sumur berbentuk uap sepenuhnya. Uap tersebut dialirkan langsung ke turbin, di mana energi panasnya dikonversi menjadi energi mekanik yang menggerakkan generator untuk memproduksi listrik yang terlihat pada Gambar 3.

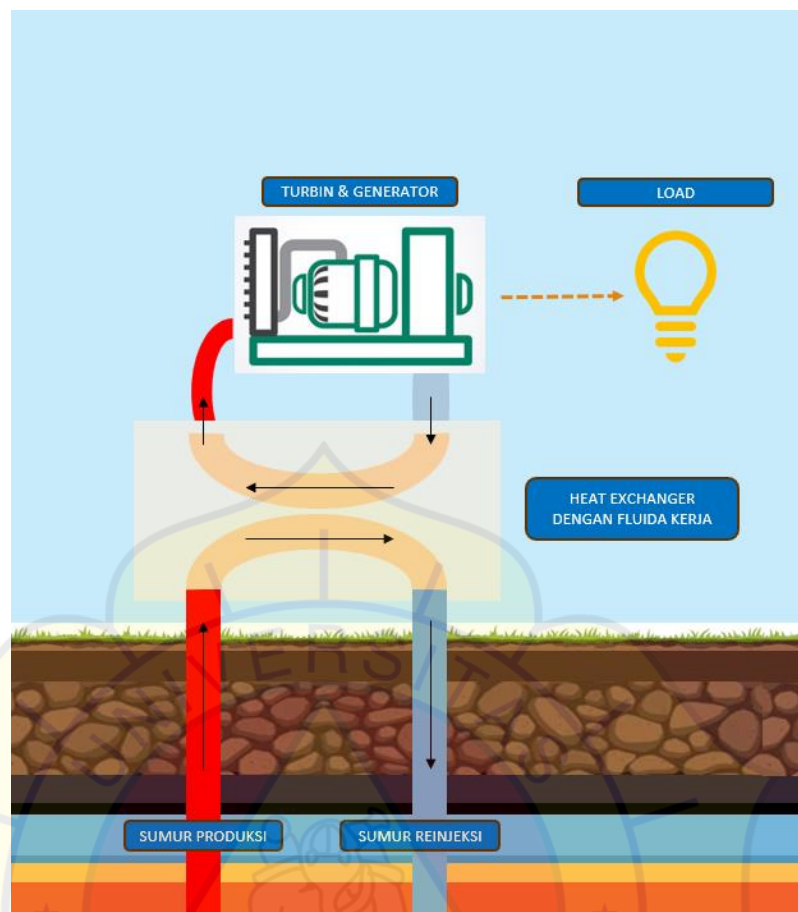


Gambar 3 Siklus uap kering

2. **Siklus Uap Hasil Pemisahan (*Separated Steam Cycle*)**: Sistem ini diterapkan ketika fluida geothermal yang keluar dari kepala sumur berbentuk campuran dua fase, yaitu uap dan cairan. Fluida tersebut

dipisahkan terlebih dahulu menggunakan *separator*. Uap yang dihasilkan kemudian dialirkan ke turbin untuk menghasilkan energi, sedangkan cairan dikembalikan ke dalam *reservoir* bawah permukaan melalui proses injeksi.

3. **Siklus Uap Hasil Penguapan (*Single Flash Steam*):** Sistem ini digunakan ketika fluida geothermal yang keluar dari sumur berada dalam keadaan air jenuh. Dengan memanfaatkan *flasher*, sebagian air jenuh tersebut berubah menjadi fasa uap bertekanan yang kemudian disalurkan untuk menggerakkan turbin. Jumlah uap yang dihasilkan ditentukan oleh tekanan yang diterapkan di dalam *flasher*.
4. **Siklus Uap Hasil Pemisahan dan Penguapan (*Double Flash Steam*):** Sistem ini merupakan pengembangan dari siklus *single flash* dengan menambahkan tahap pemisahan kedua. Fluida geothermal diproses melalui dua tahap, yaitu *separator* dan *flasher*, untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi dan rendah. Uap tersebut dialirkan secara berturut-turut ke dalam dua turbin berbeda, yaitu turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah, guna meningkatkan efisiensi energi secara optimal.
5. **Siklus Uap Hasil Pemisahan dengan Dua Turbin Terpisah (*Multi Flash Steam*):** Pada sistem ini, fluida geothermal yang dipisahkan di *separator* dialirkan ke dua turbin yang beroperasi secara mandiri, yaitu turbin bertekanan tinggi dan turbin bertekanan rendah. Uap dengan tekanan dan suhu tinggi disalurkan ke turbin tekanan tinggi, sementara air yang tersisa di *separator* dialirkan ke *flasher* untuk menghasilkan uap bertekanan dan bersuhu rendah, yang kemudian digunakan pada turbin tekanan rendah.
6. ***Binary Cycle*:** Sistem ini ideal untuk fluida geothermal dengan suhu menengah, yaitu antara 100 – 200°C. Fluida geothermal dimanfaatkan untuk memanaskan fluida kerja organik yang memiliki titik didih lebih rendah di dalam penukar panas. Uap yang dihasilkan dari fluida organik tersebut kemudian dialirkan ke turbin untuk menghasilkan energi listrik, siklus ini diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Binary cycle

7. **Combined Cycle:** Sistem ini memadukan beberapa siklus untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan energi geothermal. Fluida geothermal yang dihasilkan dari sumur dipisahkan dengan separator, di mana uap bertekanan tinggi dialirkan ke turbin tekanan tinggi. Di sisi lain, uap bertekanan rendah dimanfaatkan untuk memanaskan fluida organik dalam sistem *binary cycle*, yang uapnya kemudian dialirkan ke turbin tekanan rendah. Selain itu, cairan yang dipisahkan juga digunakan untuk memanaskan fluida organik melalui *vaporizer*, mirip dengan proses yang terjadi pada *binary cycle*.

Masing-masing jenis siklus PLTP ini memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri tergantung pada karakteristik sumber geothermal, yang dapat berupa campuran uap dan cairan atau uap kering. Sistem PLTP terpasang di Indonesia dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

**Tabel 2** Sistem PLTP terpasang di Indonesia

<b>Sistem PLTP</b>	<b>Jumlah</b>	<b>Kapasitas (MW)</b>	<b>Rata-rata (MW)</b>	<b>Produksi (GWh)</b>	<b>Rata-rata (GWh)</b>
Flash	33	1.359,4	41,2	9945,8	310,4
Dry Steam	8	505,0	63,1	3785,5	473,1
Binary ORC	7	520,0	74,3	2856,9	408,1
Total	48	2.384,4	51,2	16.588,2	345,6

Hingga pada tahun 2023, kapasitas PLTP terpasang di Indonesia sebesar 2.384,4 MW dan hingga pada akhir 2024, kapasitas terpasang mencapai 2,653 MW dimana terdapat kenaikan sebesar 269 MW atau sekitar 11%. Secara keseluruhan lebih dari 48 PLTP beroperasi di 18 lapangan geothermal yang tersebar di pulau Jawa, Sumatera, Sulawesi, Flores.

Lapangan geothermal dengan kapasitas terpasang terbesar di Indonesia adalah Gunung Salak di Jawa Barat, dengan total kapasitas 376,8 MW yang berasal dari enam unit pembangkit listrik single-flash. Lapangan ini dioperasikan oleh JOC Star Energy Geothermal Salak, Ltd. dan menghasilkan 2.855 GWh listrik pada tahun 2021 dengan faktor kapasitas tahunan sebesar 86,5%. Di posisi berikutnya adalah lapangan geothermal Sarulla di Sumatra Utara, dengan kapasitas terpasang 330 MW yang berasal dari tiga unit pembangkit listrik dengan sistem biner ORC. Lapangan ini dikelola oleh JOC Sarulla Operations Ltd. dan menghasilkan 2.032,6 GWh listrik pada tahun 2021, dengan faktor kapasitas tahunan sebesar 70,3%. Lapangan geothermal terbesar selanjutnya adalah Darajat dan Kamojang di Jawa Barat, yang keduanya memanfaatkan sistem dry steam. Lapangan Darajat memiliki kapasitas terpasang 270 MW dari tiga unit pembangkit dengan kapasitas masing-masing 121 MW, 94 MW, dan 55 MW. Lapangan ini dioperasikan oleh JOC Star Energy Geothermal Darajat II, Ltd. dan menghasilkan 2.106 GWh listrik pada tahun 2021 dengan faktor kapasitas sebesar 89% [5].

Sementara itu, lapangan Kamojang memiliki kapasitas terpasang 235 MW, terdiri dari dua unit berkapasitas 55 MW serta tiga unit lainnya dengan kapasitas masing-masing 30 MW, 35 MW, dan 60 MW. Lapangan ini dikelola oleh PT Pertamina Geothermal Energy dan menghasilkan 1.679,4 GWh listrik pada tahun 2021 dengan faktor kapasitas tahunan sebesar 81,6%.

### 2.1.2 Prinsip Termodinamika pada Sistem Geothermal

Prinsip termodinamika memiliki peran penting dalam optimalisasi sistem geothermal, terutama dalam mengonversi energi panas dari fluida geothermal menjadi energi listrik atau aplikasi lainnya. Prinsip konservasi energi, yang merupakan hukum termodinamika pertama, menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya dapat diubah bentuknya. Dalam konteks sistem geothermal, energi panas yang terdapat pada fluida geothermal dikonversi menjadi energi mekanik melalui turbin dan energi listrik melalui generator, dengan mempertimbangkan kehilangan energi dalam bentuk panas yang terbuang. Namun, dalam praktiknya, tidak semua energi panas dapat dikonversi menjadi listrik karena adanya batasan termodinamika dan proses *ireversibel* dalam sistem. Oleh karena itu, pemahaman efisiensi energi dan eksergi sangat penting dalam menilai kinerja sistem geothermal secara keseluruhan.

Selanjutnya, berbagai siklus termodinamika seperti *Dry Steam Cycle*, *Single Flash Steam Cycle*, *Double Flash Steam Cycle*, dan *Binary Cycle* dirancang untuk mengoptimalkan konversi energi dengan mempertimbangkan sifat termodinamika fluida, seperti titik didih, tekanan, dan suhu operasi yang optimal. Siklus ORC menjadi salah satu pilihan utama dalam sistem *binary cycle* untuk PLTP dengan temperatur rendah hingga menengah, di mana pemilihan fluida kerja yang tepat sangat menentukan efisiensi energi dan eksergi sistem. Sebagai alternatif, Kalina Cycle juga digunakan dalam beberapa PLTP, dengan memanfaatkan campuran fluida kerja untuk meningkatkan efisiensi termal dibandingkan ORC. Oleh karena itu, perbandingan antara ORC dan Kalina Cycle menjadi aspek penting dalam pemilihan teknologi yang optimal untuk kondisi operasi tertentu.

Analisis hukum termodinamika kedua digunakan untuk memahami irreversibilitas yang menyebabkan kehilangan energi selama proses ekspansi di turbin atau transfer panas dalam *heat exchanger*, sehingga efisiensi sistem dapat ditingkatkan [14]. Hukum termodinamika kedua juga menyatakan bahwa dalam setiap proses energi, entropi sistem cenderung meningkat, yang membatasi efisiensi maksimum dari sistem konversi energi geothermal. Oleh karena itu, pemahaman tentang entropi dan destruksi eksergi menjadi kunci dalam mengurangi kerugian energi dalam

sistem geothermal. Selain itu, analisis eksergi membantu mengidentifikasi bagian sistem yang memiliki potensi peningkatan efisiensi, seperti turbin, kondensor, atau sistem injeksi fluida geothermal. Identifikasi dan evaluasi distribusi eksergi dalam sistem perlu dilakukan lebih lanjut untuk dapat menentukan titik-titik utama yang dapat dioptimasi.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa proses reinjeksi fluida geothermal menyumbang laju destruksi eksergi terbesar dalam sistem, seperti yang ditemukan dalam analisis PLTP ORC AFJET di mana fluida reinjeksi menyumbang 38,1% dari total destruksi eksergi [15]. Pengendalian tekanan dan suhu juga menjadi bagian penting untuk memastikan fluida geothermal bekerja pada kondisi operasi yang optimal [16]. Perubahan suhu lingkungan juga berpengaruh signifikan terhadap performa pembangkit listrik geothermal, di mana fluktuasi suhu dari musim dingin ke musim panas dapat menyebabkan penurunan daya bersih hingga 36%, sementara dari malam ke siang hari daya dapat turun sekitar 5%. Oleh karena itu, desain sistem harus mempertimbangkan strategi mitigasi untuk menjaga stabilitas daya output, seperti penggunaan sistem pemulihan panas internal yang dapat meningkatkan efisiensi energi dan eksergi hingga 15%.

Dengan penerapan prinsip-prinsip ini, desain dan operasi sistem geothermal dapat dilakukan secara lebih efisien, meminimalkan kerugian energi, dan meningkatkan kontribusi energi terbarukan dalam sistem energi global. Penerapan strategi optimasi tambahan, seperti peningkatan desain heat exchanger atau penggunaan fluida kerja dengan sifat termofisik yang lebih baik, juga dapat meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Optimalisasi sistem dengan pendekatan termodinamika tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi energi tetapi juga mengurangi dampak lingkungan dengan memaksimalkan pemanfaatan sumber daya geothermal yang tersedia.

## **2.2 Panas Buang Geothermal**

### **2.2.1 Definisi Panas Buang**

Panas buang (*waste heat atau residual heat*) adalah energi panas yang tidak dimanfaatkan dan dilepaskan ke lingkungan selama proses produksi energi. Dalam sistem PLTP, panas buang dapat berasal dari fluida geothermal yang telah



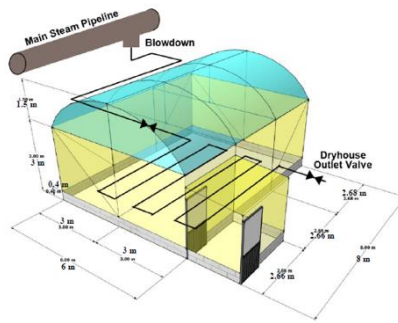
keseluruhan sistem PLTP dengan mengurangi laju destruksi eksergi dan meningkatkan kinerja termodinamika secara menyeluruh.

### **2.2.2 Pemanfaatan Panas Buang**

Sebagaimana dijelaskan pada sub-bab sebelumnya, panas buang dari PLTP merupakan sumber energi yang masih memiliki potensi untuk dimanfaatkan lebih lanjut. Kajian literatur mengenai teknologi pemanfaatan panas buang mencakup penerapan siklus tambahan (*bottoming cycle*) pada PLTP dengan siklus biner, yang memanfaatkan panas sisa dari siklus utama. Panas dari fluida geotermal dialirkan ke evaporator ORC untuk menggerakkan jaringan termal, sehingga memungkinkan pemanasan langsung untuk berbagai aplikasi. Analisis tekno-ekonomi yang komprehensif telah mengevaluasi potensi energi yang dapat diekstraksi dari fluida geothermal [18]

Selain untuk pembangkitan listrik, panas buang geothermal juga dapat dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi lain, seperti industri, pertanian, akuakultur, dan pariwisata. Dalam sektor industri, panas buang dapat digunakan untuk pengeringan hasil industri, pemanas ruangan, serta dalam proses manufaktur yang membutuhkan energi panas. Sebagai contoh, sistem pengeringan geothermal telah diterapkan dalam pengolahan makanan dan minuman serta pengolahan bahan mentah industri lainnya. Selain itu, pemanfaatan panas buang dalam sistem refrigerasi absorpsi LiCl–H<sub>2</sub>O dapat digunakan untuk pemanasan dan pendinginan.

Di sektor pertanian, teknologi geothermal dryhouse menjadi salah satu inovasi penting dalam pengeringan produk pertanian seperti kopi, teh, dan kelapa. Sistem ini menggunakan uap geothermal dari blowdown pipa utama sebagai sumber panas yang stabil, sehingga memungkinkan operasi yang berkelanjutan tanpa bergantung pada kondisi cuaca. Panas dari uap dialirkan melalui pipa pemanas, mentransfer energi ke udara di dalam dryhouse, dan memastikan distribusi panas yang merata untuk menjaga suhu optimal selama proses pengeringan [19] desain dari geothermal dryhouse pengeringan biji kopi di Area Kamojang, dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini.



**Gambar 6** Geothermal dryhouse pengering biji kopi [19]

Studi menunjukkan bahwa penggunaan geothermal dryhouse dapat mempercepat durasi pengeringan kopi dari metode konvensional 2–3 minggu menjadi hanya 1–2 minggu, sekaligus menjaga kualitas kopi kering dengan mempertahankan cita rasa serta mencegah timbulnya bau belerang. Tabel 3 Tabel 3 dibawah ini menunjukkan perbandingan waktu pengeringan antara metode konvensional dan metode berbasis energi geothermal.

**Tabel 3** Perbandingan waktu pengeringan [19]

	Pengeringan konvensional	Pengeringan geothermal
<i>Full/Geothermal wash</i>	7 – 9 hari	3 – 4 hari
<i>Honey skin contact</i>	14 – 20 hari	6 – 7 hari
<i>Natural quick dry</i>	30 – 45 hari	8 – 10 hari

\* Lama waktu pengeringan untuk mencapai target kelembaban sebesar 12%

Di sektor akuakultur, pemanfaatan panas buang geothermal digunakan dalam budidaya ikan dengan menciptakan lingkungan air yang hangat, yang memungkinkan peningkatan efisiensi pertumbuhan ikan dan hasil produksi yang lebih tinggi. Misalnya, di Way Ratai, teknologi ini telah diterapkan untuk mencampurkan air tawar dengan fluida geothermal guna menciptakan kondisi optimal bagi pertumbuhan ikan.

Dalam sektor pariwisata, pemanfaatan panas buang telah dikembangkan dalam berbagai fasilitas rekreasi, seperti pemandian air panas dan penghangat ruangan di daerah beriklim dingin. Contohnya adalah Lao-Lao Geopark di Tomohon, Sulawesi Utara, yang menggunakan teknologi heat exchanger untuk memanaskan air dengan memanfaatkan energi geothermal dari fluida yang belum terutilisasi. Teknologi ini mampu menghasilkan air hangat dengan suhu sekitar 37 - 39°C, yang cocok untuk

pemandian umum air panas. Fasilitas pemanfaatan panas buang geothermal di Indonesia beserta lokasi nya dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini [20].

**Tabel 4** Fasilitas pemanfaatan panas buang di Indonesia

No	Nama Fasilitas	Lokasi & Tahun	Sektor	Deskripsi
1	Budidaya Jamur	Pangalengan (1999)	Pertanian	Mengganti penggunaan LPG dalam proses sterilisasi media tumbuh jamur
2	Pengeringan Kelapa	Way Ratai (2003 – 2008)	Pertanian	Pengeringan kelapa menjadi kopra menggunakan geothermal untuk meningkatkan kualitas produk.
3	Pengeringan Teh	Pangalengan (2010)	Pertanian	Pengeringan daun teh menggunakan energi geothermal menggantikan minyak diesel.
4	Pengolahan Gula Aren	Lahendong (2006)	Pertanian	Memanfaatkan panas buang (uap) dari PLTP dalam memproduksi kristal gula aren.
5	Budidaya Ikan	Way Ratai (2010)	Akuakultur	Budidaya ikan di campuran air tawar dan fluida geothermal.
6	Penghangat Ruangan	Patuha (2010)	Pariwisata	Memanfaatkan uap panas dari geothermal untuk menghangatkan ruangan.
7	Darajat Pass	Darajat	Pariwisata	Mengalirkan air yang dipanaskan oleh energi geothermal ke area hotel dan taman bermain.
8	Pengering Kopi	Kamojang (2023)	Pertanian	Mengalirkan uap panas dari blowdown pipa utama.

Secara keseluruhan, pemanfaatan panas buang geothermal menawarkan banyak manfaat dalam berbagai sektor. Teknologi yang terus berkembang, seperti sistem poligenerasi dan pemanfaatan *screw expander* serta *thermoelectric generator* (TEG), telah meningkatkan efisiensi konversi energi panas menjadi daya listrik, yang selanjutnya dapat dimanfaatkan dalam berbagai proses industri. Sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi eksergi hingga 30,89%, tetapi juga mampu menghasilkan berbagai produk energi lainnya. Pendekatan holistik dalam pemanfaatan panas buang memiliki potensi besar untuk mengoptimalkan kinerja pembangkit listrik geothermal sekaligus mengurangi limbah energi. Oleh karena itu, pengembangan dan implementasi teknologi pemanfaatan panas buang harus terus didorong guna mendukung keberlanjutan energi dan pengurangan emisi karbon secara global.

### **2.2.3 Perkembangan Pemanfaatan Panas Buang dengan ORC**

PLTP memanfaatkan panas dari reservoir geotermal untuk menghasilkan listrik. Namun, tidak seluruh energi geothermal dapat dikonversi secara langsung menjadi listrik, sehingga sebagian besar energi yang tersisa terbuang sebagai panas buang. Teknologi ORC telah dikembangkan sebagai solusi untuk meningkatkan efisiensi konversi energi dengan memanfaatkan panas buang ini. ORC memungkinkan penggunaan sumber panas bersuhu rendah hingga menengah secara lebih optimal, terutama pada PLTP yang mengandalkan sistem flash dan biner.

Berdasarkan data terbaru yang tersedia, kapasitas terpasang global untuk PLTP mencapai sekitar 16.318 MW, tersebar di 198 lapangan geothermal dengan 673 unit pembangkit individu [5]. Dari jumlah tersebut, unit biner tipe ORC menyumbang 25,1% dari total kapasitas terpasang, menjadikannya komponen yang signifikan dalam pembangkitan listrik geothermal. Hal ini mencerminkan adopsi yang semakin meningkat terhadap teknologi ORC dalam pemanfaatan sumber daya geothermal, terutama di wilayah dengan reservoir bersuhu lebih rendah. Amerika Serikat, Indonesia, dan Filipina merupakan negara yang memimpin dalam pembangkitan listrik geothermal, dengan kapasitas terpasang gabungan mencapai 8.000 MW pada tahun 2023. Indonesia memiliki potensi geothermal yang besar, dengan 357 lokasi sumber daya geothermal yang telah teridentifikasi. Dari jumlah tersebut, sekitar 254 lokasi memiliki suhu rendah hingga menengah, menunjukkan potensi besar untuk penerapan ORC. Namun, pemanfaatannya masih terbatas.

Teknologi ORC pertama kali diuji dalam konteks PLTP oleh perusahaan Amerika, Ormat Technology, pada awal 1980-an. Sejak itu, sistem pembangkit listrik biner berbasis ORC menjadi metode yang umum digunakan dalam industri geotermal.

Selain diterapkan pada sistem biner, ORC juga dapat digunakan dalam kombinasi dengan sistem flash. Dalam konfigurasi ini, brine yang tersisa setelah proses pemisahan uap masih mengandung panas yang cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai sumber panas sekunder dalam siklus ORC. Kombinasi sistem flash dan biner ini meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi geothermal secara keseluruhan, memungkinkan pemanfaatan lebih maksimal dari sumber daya yang tersedia.

Teknologi ORC diklasifikasi menjadi dua jenis; ORC satu tahap dan ORC dua tahap. ORC satu tahap menggunakan fluida kerja dengan titik didih rendah untuk memanfaatkan panas dari fluida geotermal. Siklus ini lebih sederhana dan cocok untuk sumber panas dengan suhu menengah, tetapi efisiensinya terbatas karena adanya perbedaan suhu yang signifikan antara fluida geotermal dan fluida kerja, yang dapat menyebabkan kehilangan energi dalam proses perpindahan panas. ORC dua tahap terdiri dari dua siklus ORC dengan tekanan berbeda, yang memungkinkan pemanfaatan panas lebih efisien karena profil suhu fluida geotermal dan fluida kerja lebih selaras. Studi menunjukkan bahwa konfigurasi ini dapat meningkatkan daya keluaran bersih hingga 8,44%–12,20% dibandingkan ORC satu tahap, meskipun terkadang disertai dengan sedikit penurunan efisiensi termal.

Ormat Technologies Inc merupakan salah satu pelopor teknologi ORC geothermal yang dimana perjalanannya dapat dilihat pada Tabel 5 dibawah ini:

**Tabel 5 Perkembangan teknologi ORC oleh Ormat Technologies Inc**

<b>Tahun</b>	<b>Nama Proyek</b>	<b>Negara</b>	<b>Kapasitas</b>
1984	PLTP ORC Wabuska pertama dioperasikan secara komersial	AS	700 kW
1986	PLTP ORC Ormesa I mulai beroperasi	AS	30 MW
1992	PLTP Combined Cycle Puna (Hawaii) pertama	AS	N/A
1995	PLTP Combined Cycle Leyte	Filipina	130 MW
2006	PLTP Dora I	Turkey	7,4 MW
2013	PLTP Binary Ngatamariki	Selandia Baru	100 MW
2018	PLTP Combined Cycle Sarulla Operations Ltd	Indonesia	330 MW
2018	PLTP Olkaria III (ekspansi)	Kenya	150 MW

Implementasi teknologi ORC dalam PLTP di Indonesia dimulai dengan beroperasinya PLTP Sarulla pada tahun 2018, dengan kapasitas total 330 MW. Sistem ini memanfaatkan energi geothermal dalam dua fase, yaitu uap dan cair, untuk menghasilkan listrik.

Proses dimulai dari sumur produksi dengan fluida dua fasa, yang kemudian dipisahkan menggunakan unit separator. Fase uap diarahkan ke turbin uap utama untuk menggerakkan generator listrik. Setelah melewati turbin utama, uap yang tersisa dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan listrik menggunakan teknologi

ORC. Sementara itu, fase cair hasil pemisahan juga dialirkan ke sistem ORC untuk konversi energi tambahan. Energi geothermal hasil keluaran dari kedua sistem tersebut kemudian dialirkan ke sumur reinjeksi untuk dikembalikan ke dalam reservoir. Keseluruhan sistem ini dikenal sebagai sistem kombinasi, yang meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi geothermal dengan mengoptimalkan penggunaan uap dan cairan geothermal secara berkelanjutan.

Selain itu, contoh lainnya yang menginisiasi penerapan ORC di Indonesia adalah analisis potensi pemanfaatan panas limbah brine di sumur X lapangan geothermal Sorik Marapi. Penelitian ini menunjukkan bahwa sisa panas dari brine yang dihasilkan PLTP masih dapat digunakan untuk membangkitkan listrik. Dengan semakin terbatasnya reservoir berentalpi tinggi, penerapan teknologi ORC di Indonesia berpotensi berkembang untuk mengoptimalkan sumber daya yang tersedia [21].

Efisiensi ORC sangat bergantung pada pemilihan fluida kerja. Beberapa fluida yang umum digunakan antara lain: n-pentana dan isopentana, yang memiliki performa optimal pada suhu geothermal menengah. R245fa dan R134a, yang sering digunakan karena sifat termodinamikanya yang mendukung efisiensi konversi energi. R123 dan R141b, yang memiliki potensi efisiensi tinggi, meskipun penggunaannya harus mempertimbangkan dampak lingkungan seperti *Global Warming Potential (GWP)* dan *Ozone Depletion Potential (ODP)*.

Pertumbuhan kapasitas terpasang diiringi dengan inovasi teknologi yang bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas biaya sistem ORC geothermal. Kemajuan ini mencakup pengembangan fluida kerja yang lebih canggih, konfigurasi siklus yang dioptimalkan, serta hibridisasi dengan sumber energi terbarukan lainnya [22], [23]. Misalnya, penggunaan sistem ORC superheated dan recuperative telah terbukti meningkatkan efisiensi energi serta menekan biaya, sehingga membuat sistem ORC geothermal semakin layak diterapkan dalam berbagai kondisi [24].

Masa depan sistem ORC terlihat menjanjikan, dengan penelitian dan pengembangan yang terus dilakukan untuk mengatasi tantangan yang ada, seperti risiko eksplorasi yang tinggi, biaya pengeboran yang mahal, dan ketersediaan

sumber daya. Enhanced Geothermal Systems (EGS) dan teknologi pengeboran inovatif diperkirakan akan memainkan peran penting dalam memperluas pemanfaatan energi geothermal, terutama di wilayah dengan potensi yang belum dijamah. Selain itu, integrasi sistem ORC geothermal dengan sumber energi terbarukan lainnya, seperti tenaga surya dan biomassa, diprediksi akan semakin meningkatkan efisiensi dan keandalannya [25].

Pemanfaatan panas buang dari energi geothermal melalui ORC telah membuka peluang baru dalam meningkatkan efisiensi energi dan mendukung transisi menuju energi yang lebih berkelanjutan. Dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya eksplorasi sumber daya berentalpi rendah hingga menengah, ORC berpotensi menjadi solusi utama dalam pemanfaatan geothermal di masa depan. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan efisiensi sistem ORC, termasuk eksplorasi fluida kerja baru dan inovasi teknologi yang dapat meningkatkan daya guna energi geothermal dalam berbagai aplikasi industri dan pembangkitan listrik.

#### **2.2.4 Inovasi Teknologi dalam Pemanfaatan Panas Buang**

Tinjauan tentang pentingnya keberlanjutan sumber panas dalam menentukan aplikasi pemanfaatan, karena panas buang yang tidak stabil atau fluktuatif sulit dimanfaatkan secara optimal.

Produksi hidrogen hijau berbasis energi geothermal merupakan solusi inovatif yang memanfaatkan panas buang dari PLTP [26]. Dalam produksi ini, panas buang digunakan untuk menggerakkan proses elektrolisis air, yang memecah air menjadi hidrogen dan oksigen. Sistem ini sangat bergantung pada parameter seperti suhu fluida geothermal, laju aliran fluida, jenis siklus termodinamika yang digunakan di pembangkit, serta karakteristik fluida kerja dalam ORC.

Dengan menggunakan panas buang, produksi hidrogen hijau tidak hanya mendiversifikasi output PLTP, tetapi juga memberikan solusi untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi jejak karbon [26]. Hidrogen yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi, mulai dari bahan bakar industri hingga penyimpanan energi. Implementasi teknologi ini menunjukkan potensi besar untuk mendukung transisi energi bersih sekaligus meningkatkan nilai ekonomi dari

pembangkit geothermal, menjadikannya salah satu cara yang menjanjikan untuk mencapai target dekarbonisasi global.

### **Aplikasi Pemanfaatan Lainnya**

Pemanfaatan energi geothermal telah menunjukkan berbagai temuan penting dalam mendukung transisi menuju energi berkelanjutan. Sistem berbasis geothermal yang mengintegrasikan siklus Kalina, chiller absorpsi dua-efek, dan sistem refrigerasi kompresi uap dapat menghasilkan listrik, air bersih, beban pendingin, dan air panas secara simultan. Dalam mode dasar pada salah satu penelitian, sistem ini mampu menghasilkan daya bersih sebesar 63,45 kW dengan efisiensi energi dan eksergi masing-masing sebesar 62,28 % dan 45,67 %, serta memproduksi 20,82 liter/jam air bersih[27]. Hal ini menunjukkan bahwa energi geothermal tidak hanya dapat dimanfaatkan untuk pembangkitan listrik, tetapi juga untuk diversifikasi keluaran energi, termasuk penyediaan air bersih dan pengendalian suhu, yang meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem [28].

## **2.3 Metode Analisis dalam Studi Panas Buang Geothermal**

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi antara analisis bibliometrik dan tinjauan pustaka sistematis.

### **2.3.1 Analisis Bibliometrik**

Analisis bibliometrik merupakan metode ilmiah yang menggunakan teknik kuantitatif untuk mengevaluasi literatur ilmiah berdasarkan data bibliometrik seperti publikasi, kutipan, dan topik penelitian. Metode ini telah menjadi semakin populer dalam berbagai disiplin ilmu, karena kemampuannya untuk mengolah dan menganalisis volume data ilmiah yang besar secara sistematis dan mendalam. Popularitas analisis bibliometrik didorong oleh kemajuan perangkat lunak seperti VOSviewer, Gephi, dan Leximancer, serta ketersediaan basis data ilmiah seperti Scopus dan Web of Science yang memudahkan akses dan akuisisi data yang relevan [29]. Selain itu, pendekatan ini menawarkan wawasan strategis untuk mengidentifikasi tren penelitian, pola kolaborasi, dan struktur intelektual suatu bidang ilmu.

Pada dasarnya, analisis bibliometrik dibagi menjadi dua kategori utama: analisis kinerja (*performance analysis*) dan pemetaan ilmu pengetahuan (*science mapping*) [30]. Analisis kinerja berfokus pada evaluasi kontribusi elemen penelitian seperti penulis, institusi, dan jurnal berdasarkan metrik tertentu, seperti jumlah publikasi atau kutipan. Sebaliknya, pemetaan ilmu pengetahuan bertujuan untuk memahami hubungan antara elemen-elemen tersebut guna mengungkap struktur dan dinamika perkembangan ilmu pengetahuan dalam suatu bidang. Dengan memanfaatkan teknik ini, peneliti dapat memperoleh gambaran menyeluruh tentang evolusi suatu bidang penelitian, mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan, serta merumuskan ide-ide baru untuk investigasi lebih lanjut.

Prosedur analisis bibliometrik melibatkan langkah-langkah sistematis, mulai dari perolehan data bibliometrik hingga visualisasi dan interpretasi hasil. Dalam pelaksanaannya, analisis ini mengintegrasikan berbagai teknik seperti analisis kutipan, analisis kata kunci, dan klusterisasi jaringan untuk menghasilkan wawasan yang kaya. Misalnya, analisis kutipan dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak suatu karya atau penulis, sedangkan pemetaan kata kunci membantu mengidentifikasi tema-tema penelitian yang sedang berkembang. Visualisasi hasil, seperti peta jaringan atau peta topik, memungkinkan peneliti untuk memahami pola hubungan yang kompleks dalam data [31].

Namun, meskipun analisis bibliometrik menawarkan banyak manfaat, ada tantangan dalam penerapannya. Salah satunya adalah risiko memberikan pemahaman yang terbatas jika hanya menggunakan satu pendekatan tanpa menggabungkannya dengan metode lain, seperti pemetaan ilmu pengetahuan atau analisis tematik yang lebih mendalam. Oleh karena itu, penting bagi peneliti untuk merancang studi yang holistik dengan mengintegrasikan berbagai teknik analisis dan mempertimbangkan interpretasi data yang objektif maupun subjektif [32].

Sebagai sebuah metode yang semakin berkembang, analisis bibliometrik tidak hanya membantu peneliti mendapatkan wawasan retrospektif tentang suatu bidang, tetapi juga mendukung perumusan strategi penelitian masa depan. Dengan pendekatan ini, literatur yang kompleks dapat diuraikan secara sistematis,

memberikan landasan yang kuat untuk memperluas pengetahuan dan kontribusi yang bermakna dalam disiplin ilmu terkait.

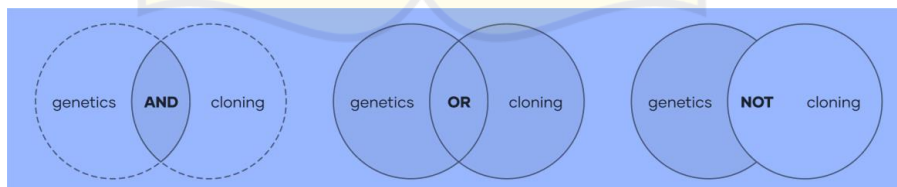
Scopus dipilih sebagai basis data dalam penelitian ini karena keunggulannya yang mencakup cakupan literatur yang luas dan reputasi terpercaya di dunia akademik. Scopus menyediakan akses ke jurnal-jurnal bereputasi tinggi yang terindeks secara ketat, menjamin kualitas dan validitas literatur yang digunakan [33]. Basis data ini juga dilengkapi dengan data bibliometrik yang kaya, yang mendukung analisis mendalam, seperti sitasi dan jaringan kolaborasi antar peneliti, yang esensial dalam studi bibliometrik. Selain itu, pembaruan yang dilakukan secara berkala pada Scopus memastikan bahwa penelitian dapat mengikuti tren dan temuan terbaru. Dengan pengakuan yang luas di kalangan akademisi global, penggunaan Scopus memperkuat kredibilitas tinjauan literatur dalam penelitian ini.

Dalam pencarian pada data Scopus, diharuskan menggunakan kata kunci yang sesuai dan ditambahkan dengan boolean operator yang merupakan kata “AND”, “OR”, and “NOT” dimana ilustrasinya terlihat pada Gambar 7 dengan keterangan berikut ini;

**AND:** mempersempit pencarian dimana seluruh keyword harus ditemukan.

**OR:** memperluas pencarian dimana kata yang manapun yang berhubungan dapat dimunculkan.,

**NOT:** mempersempit pencarian dengan mengeleminasi pencarian yang tidak diinginkan. Namun harus diperhatikan karena bisa saja materi yang dieleminasi malah yang diperlukan.



**Gambar 7** Ilustrasi fungsi boolean operator

Zhong et al. menganalisis secara bibliometrik dan sistematis 2.613 studi yang ditemukan dalam *Web of Science Core Collection (WoSCC)* dari tahun 2003 hingga 2021 untuk mengeksplorasi tren penelitian karbon biru menggunakan paket

Bibliometrix di R studio dan perangkat lunak VOSviewer [34]. Temuan dari penelitian tersebut memberikan wawasan mengenai tren karbon biru selama delapan belas tahun terakhir, penelitian berfokus pada area yang memerlukan lebih banyak investasi penelitian ke depannya.

### **2.3.2 Tinjauan Pustaka Sistematis**

Tinjauan pustaka sistematis (SLR) adalah pendekatan kualitatif yang terstruktur dan terstandarisasi untuk menilai, menganalisis, dan mensintesis literatur yang relevan secara mendalam. Pendekatan ini memastikan bahwa penelitian dilakukan secara komprehensif dan bebas bias dengan mengikuti tahapan yang jelas, seperti identifikasi sumber data, seleksi literatur berdasarkan kriteria inklusi-eksklusi, dan evaluasi kritis terhadap hasil. Dalam studi ini, SLR digunakan untuk mengevaluasi teknologi-teknologi pemanfaatan panas buang geothermal, analisis efektivitasnya, serta potensi aplikasinya. Melalui metode ini, hasil yang diperoleh bersifat valid, dapat diandalkan, dan mendalam, yang mendukung penyusunan rekomendasi yang berbasis bukti.

### **2.3.3 Integrasi Analisis Bibliometrik - Tinjauan Pustaka Sistematis**

Integrasi antara analisis bibliometrik dan tinjauan pustaka sistematis (B-SLR) memberikan pendekatan yang holistik dalam menganalisis literatur ilmiah. Metode ini memadukan keunggulan kuantitatif dari analisis bibliometrik untuk menggambarkan tren global dan keunggulan kualitatif dari SLR untuk mendapatkan wawasan mendalam terhadap teknologi spesifik. Dalam studi panas buang geothermal, pendekatan ini memungkinkan identifikasi teknologi pemanfaatan yang relevan sekaligus mendalami efektivitas dan implementasinya. Hasil integrasi ini tidak hanya memberikan pemetaan menyeluruh terhadap literatur, tetapi juga menghasilkan rekomendasi strategis yang komprehensif untuk mendukung pengembangan aplikasi panas buang geothermal secara optimal.

Pendekatan ini dapat ditingkatkan lebih lanjut melalui penerapan *science mapping*, sebuah metode yang menggabungkan analisis bibliometrik dengan visualisasi jaringan untuk memahami struktur, evolusi, dan dinamika suatu bidang penelitian secara mendalam. Dengan menggunakan *science mapping*, hubungan antara tema utama dalam pemanfaatan panas buang geothermal dapat divisualisasikan melalui

jaringan ko-sitasi yang menunjukkan perkembangan konseptual dan pola kolaborasi antarpeleliti. *Science mapping* juga memungkinkan analisis tahap evolusi teknologi dalam domain ini, mulai dari tahap konseptualisasi ide hingga kodifikasi standar implementasi. Selain itu, metode ini dapat membantu mengidentifikasi kontribusi transformatif dan memetakan jalur sitasi yang relevan, sehingga memberikan pandangan yang lebih komprehensif terhadap literatur terkait.

Dengan mengintegrasikan analisis bibliometrik, tinjauan pustaka sistematis, dan *science mapping*, penelitian dapat mengidentifikasi celah penelitian yang signifikan, menentukan tren teknologi terbaru, serta memahami dinamika pengembangan teknologi panas buang geothermal. Pendekatan ini tidak hanya relevan untuk membangun landasan teoretis yang kuat tetapi juga memberikan panduan praktis bagi pengembangan strategi dan kebijakan yang mendukung pengelolaan sumber daya geothermal secara berkelanjutan.

