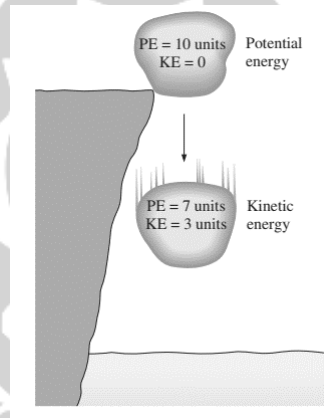


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

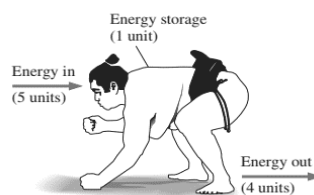
2.1 Termodinamika

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari energi, yaitu kemampuan untuk melakukan kerja atau menyebabkan perubahan. Salah satu prinsip dasar dalam termodinamika adalah hukum kekekalan energi, yang menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, hanya bisa berubah bentuk. Contohnya pada Gambar 2.1, batu yang jatuh dari tebing mengubah energi potensialnya menjadi energi kinetik saat kecepatannya bertambah



Gambar 2. 1 Hukum pertama termodinamika (Cengel, 2011)

Contoh lain kekekalan energi adalah pada tubuh manusia seperti pada Gambar 2.2, di mana makanan diubah menjadi energi untuk mendukung aktivitas. Jika asupan energi melebihi pengeluaran, kelebihan energi disimpan sebagai lemak (menyebabkan kegemukan). Sebaliknya, jika pengeluaran energi lebih besar dari asupan, tubuh akan menggunakan cadangan lemak sebagai sumber energi, menyebabkan penurunan berat badan.



Gambar 2. 2 Prinsip konservasi energi pada tubuh manusia (Cengel, 2011)

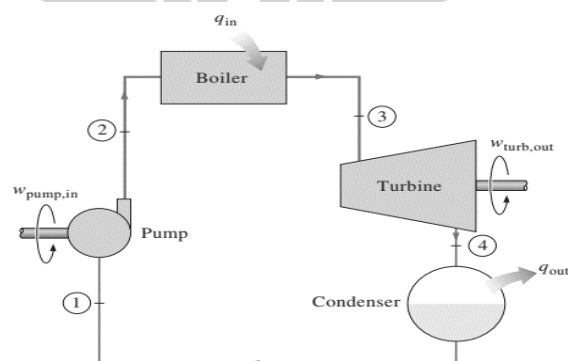
Termodinamika mempelajari konversi dan perpindahan energi, berdasarkan hukum-hukum seperti hukum pertama tentang kekekalan energi dan hukum kedua yang menentukan arah proses alami. Ilmu ini berkembang sejak abad ke-18 dengan penemuan mesin uap. Termodinamika terbagi menjadi klasik, yang mengkaji sifat makroskopik zat, dan statistik, yang fokus pada perilaku partikel. Penerapannya mencakup mesin, pembangkit tenaga, peralatan rumah tangga, hingga tubuh manusia.

2.2 Siklus Daya Termodinamika

Siklus termodinamika adalah rangkaian proses transfer panas dan kerja, dengan perubahan tekanan dan suhu. Siklus ini mengubah energi panas menjadi kerja atau sebaliknya, seperti pada pompa kalor. Siklus bisa tertutup (hanya energi berpindah) atau terbuka (energi dan materi berpindah). Pembangkit listrik termal umumnya menggunakan siklus daya tertutup tanpa perpindahan massa ke lingkungan.

a. Siklus Rankine

Pembangkit listrik termal, yang menghasilkan sebagian besar listrik dunia, menggunakan siklus Rankine untuk mengubah energi panas menjadi energi mekanik, dengan air atau uap sebagai fluida kerja. Namun, pembangkit listrik nyata tidak ideal dan mengalami kerugian termodinamika, yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti gesekan, pencampuran cairan, perpindahan panas terbatas, hambatan listrik, dan reaksi kimia. Siklus Rankine secara sederhana digambarkan pada gambar 2.3 berikut:



Gambar 2. 3 Skema siklus Rankine ideal (Cengel, 2011)

Dalam pemodelan pembangkit listrik nyata, efisiensi komponen, terutama turbine dan pompa, harus disesuaikan dengan efisiensi isentropiknya untuk memperhitungkan kerugian.

Siklus Rankine terdiri dari empat proses utama:

Proses 1–2: Kompresi Isentropik (Pompa)

Air bertekanan rendah dari kondensor dipompa ke tekanan tinggi oleh pompa, meningkatkan tekanan tanpa menambah panas.

Proses 2–3: Pemanasan Isoentropik (*Boiler*)

Air bertekanan tinggi dipanaskan di boiler hingga menjadi uap jenuh atau uap superheated. Energi panas dari bahan bakar (atau sumber panas lain) ditransfer ke fluida kerja.

Proses 3–4: Ekspansi Isentropik (Turbin)

Uap bertekanan tinggi diekspansikan di turbin, menghasilkan kerja mekanis untuk menggerakkan generator. Tekanan dan suhu uap turun selama proses ini.

Proses 4–1: Pendinginan Isobarik (Kondensor)

Uap yang keluar dari turbin didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air di kondensor pada tekanan konstan, siap untuk siklus berikutnya.

2.3 Retrofitting

Retrofitting dalam industri rekayasa adalah proses modifikasi atau peningkatan sistem dan peralatan lama untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keamanan. Proses ini melibatkan penerapan teknologi baru atau bahan modern guna memperpanjang umur pakai dan memenuhi regulasi terbaru.

Menurut Neil et al. (2005), *retrofitting* populer karena lebih hemat biaya dibandingkan membangun sistem baru. Selain itu, *retrofitting* meningkatkan produktivitas dengan mengoptimalkan peralatan yang ada serta mengatasi keusangan teknologi. *Retrofitting* diterapkan di berbagai industri, seperti rekayasa sipil (infrastruktur), mekanikal (mesin dan HVAC), serta elektrikal (pembaruan

sistem kelistrikan). Langkah ini membantu perusahaan tetap efisien, relevan, dan sesuai perkembangan teknologi tanpa biaya besar.

Menurut Paul et al. (2014), *retrofitting* dilakukan karena beberapa alasan utama, antara lain:

- A. Peningkatan Kinerja: Mengganti komponen lama dengan yang lebih efisien, seperti mengganti lampu konvensional dengan LED, dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi biaya pemeliharaan.
- B. Peningkatan Keamanan: Menyesuaikan struktur atau sistem lama untuk memenuhi standar keamanan terbaru, seperti penguatan terhadap gempa atau peningkatan ketahanan kebakaran.
- C. Pertimbangan Lingkungan: Mengintegrasikan teknologi hemat energi untuk mengurangi emisi dan mendukung keberlanjutan lingkungan.
- D. Kepatuhan Regulasi: Menyesuaikan peralatan untuk memenuhi regulasi baru, misalnya terkait emisi atau efisiensi energi.
- E. Penghematan Biaya: Retrofitting sering lebih ekonomis dibandingkan mengganti seluruh infrastruktur, serta memperpanjang umur pakai sistem.
- F. Peningkatan Fungsionalitas: Menambah fitur baru, seperti sensor atau otomatisasi, untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem.
- G. Adaptasi dengan Teknologi Baru: Mengintegrasikan kemajuan teknologi ke dalam sistem yang sudah ada tanpa perlu membangun ulang dari awal.

Menurut Pascal et al. (2013), *retrofitting* di bidang energi bertujuan meningkatkan efisiensi dan mengurangi konsumsi energi. Caranya dengan memodifikasi sistem, seperti meningkatkan isolasi, mengganti peralatan usang, menerapkan kontrol pintar, dan mengintegrasikan energi terbarukan. Hasilnya adalah efisiensi lebih tinggi, emisi lebih rendah, serta berkurangnya ketergantungan pada bahan bakar fosil.

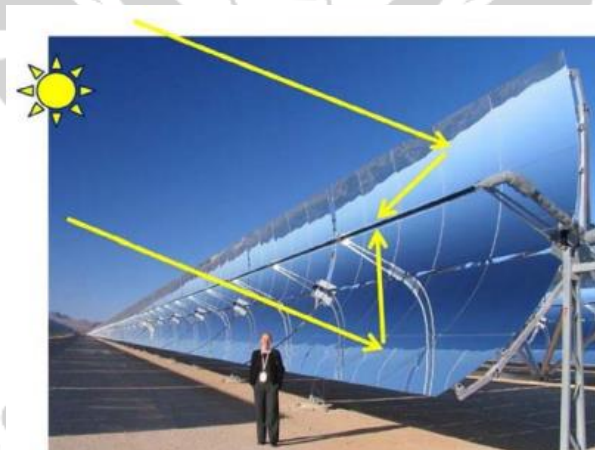
2.4 Concentrating Solar Power (CSP)

Concentrating Solar Power (CSP) adalah teknologi yang mengubah sinar matahari menjadi listrik menggunakan kolektor konsentrasi, menyediakan panas suhu tinggi untuk pembangkit listrik dengan emisi rendah (Robert, 2008). Meski potensial, CSP menghadapi tantangan seperti biaya tinggi, sistem pendingin kondensor, dan keterbatasan bahan kolektor (Harsh, 2021). Solusi yang dikembangkan termasuk sistem hibrida dan bahan tahan suhu tinggi.

CSP mulai berkembang pada 1984–1995 dan kembali meningkat sejak 2005. Pada 2019, kapasitas terpasangnya mencapai 6,3 GW, tetapi masih hanya 1% dari total kapasitas angin dan PV. CSP efektif di wilayah dengan langit cerah karena hanya menggunakan radiasi langsung, berbeda dari PV yang memanfaatkan radiasi difusi.

Berikut konfigurasi CSP yang saat ini digunakan berdasarkan urutan tingkat penerapan yang paling banyak adalah:

a) *Parabolic trough*



Gambar 2. 4 Sistem CSP tipe *Parabolic Trough*

Parabolic Trough menggunakan cermin berbentuk parabola memanjang untuk memusatkan sinar matahari ke pipa penerima yang berisi fluida termal. (Gambar 2.4) Fluida ini dipanaskan hingga suhu tinggi dan digunakan untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin guna menghasilkan listrik.

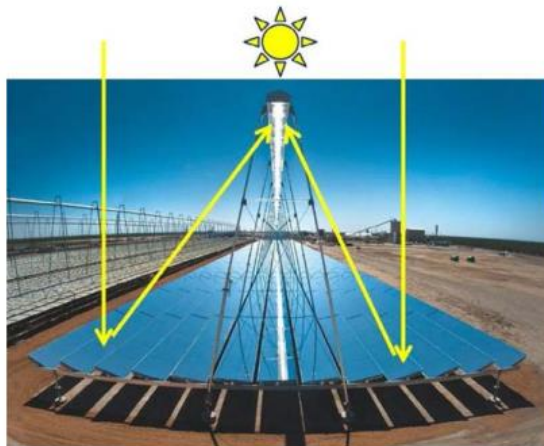
b) *Central receiver tower*



Gambar 2. 5 Sistem CSP tipe *Central Receiver Tower*

Central Receiver Tower, atau *solar power tower*, bekerja dengan memanfaatkan heliostat (cermin besar yang dapat bergerak) untuk memantulkan sinar matahari ke penerima di puncak menara. (Gambar 2.5) Panas yang dikumpulkan digunakan untuk memanaskan fluida kerja, seperti garam cair, yang kemudian menghasilkan uap untuk menggerakkan turbin.

c) *Linear Fresnel*

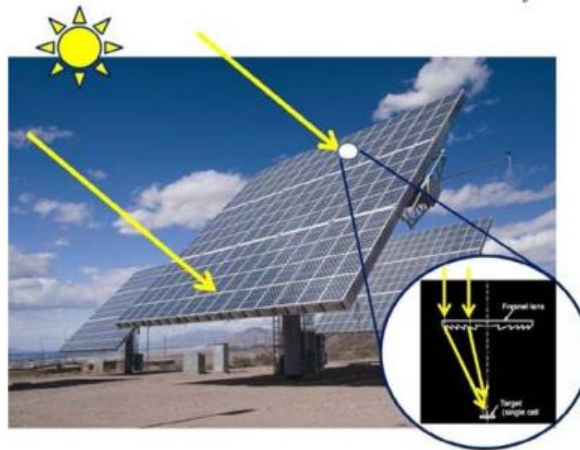


Gambar 2. 6 Sistem CSP tipe *Linear Fresnel*

Linear Fresnel memiliki prinsip kerja serupa dengan *parabolic trough*, tetapi menggunakan cermin datar atau sedikit melengkung yang memusatkan sinar matahari ke pipa penerima di atasnya. (Gambar 2.6) Fluida dalam pipa dipanaskan

untuk menghasilkan uap, yang selanjutnya digunakan untuk pembangkitan listrik.

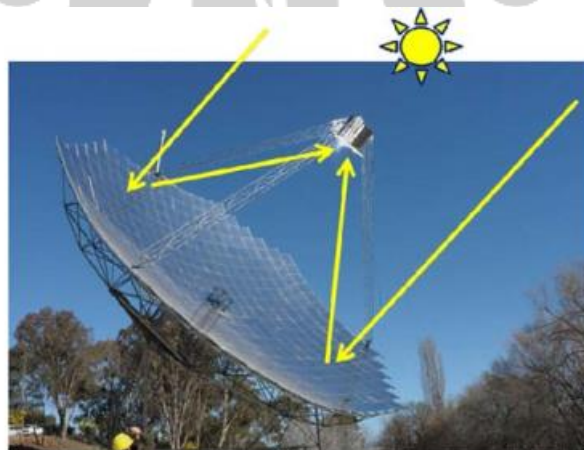
d) *Fresnel lenses (for CPV)*



Gambar 2. 7 Sistem CSP tipe *Fresnel Lenses*

Fresnel Lenses pada sistem *Concentrated Photovoltaics* (CPV) menggunakan lensa Fresnel, yang merupakan lensa tipis dengan pola konsentris, untuk memusatkan sinar matahari ke sel fotovoltaik. (Gambar 2.7) Teknologi ini meningkatkan efisiensi panel surya dengan mengurangi luas bahan semikonduktor yang diperlukan dan sering dipadukan dengan sistem pelacakan matahari.

e) *Paraboloidal dishes.*



Gambar 2. 8 Sistem CSP tipe *Paraboloidal dishes*

Paraboloidal Dishes, atau *dish Stirling system*, menggunakan cermin berbentuk parabola tiga dimensi untuk memfokuskan sinar matahari ke penerima termal pada titik *focus*. (Gambar 2.8) Panas yang terkumpul kemudian digunakan

untuk menggerakkan mesin Stirling, yang secara langsung mengubah energi panas menjadi tenaga mekanik dan listrik.

Setiap teknologi CSP memiliki keunggulan dan pasar tersendiri. Selain sistem komersial, ada juga *solar furnace* yang digunakan dalam penelitian. Solar furnace terdiri dari piringan paraboloid di laboratorium, dengan heliostat eksternal yang memfokuskan sinar matahari pada sudut tetap (Lovegrove, 2012).

2.5 Design Parameter Concentrated Solar Power

Pembangkit listrik CSP mengubah radiasi matahari menjadi panas, lalu dikonversi menjadi listrik melalui fluida suhu tinggi dan turbin uap. Berbeda dari pembangkit fosil yang bisa menyesuaikan produksi energi, CSP bergantung pada radiasi matahari yang bervariasi dan dipengaruhi oleh kondisi atmosfer seperti awan, aerosol, dan uap air.

Untuk kinerja optimal, pemanfaatan sinar matahari harus maksimal. Faktor meteorologi seperti kecepatan angin, suhu, dan kelembaban udara juga penting. Angin kencang dapat merusak cermin konsentrasi, sementara suhu dan kelembaban memengaruhi efisiensi pendinginan dan daya (Lovegrove, 2012).

2.5.1. Sumber Daya Energi Surya.

Penilaian sumber daya matahari membutuhkan data historis untuk memahami pola radiasi di lokasi tertentu. Peta sumber daya surya membantu menentukan lokasi ideal, sementara data radiasi dengan resolusi tinggi diperlukan untuk desain pembangkit yang efisien.

CSP hanya memanfaatkan radiasi sinar langsung (DNI), bukan radiasi difusi yang diukur dalam GHI seperti pada teknologi PV. DNI lebih bervariasi dibandingkan GHI, dengan nilai tertinggi di daerah subtropis sekitar 23°LU/LS, menjadikan "sabuk matahari" lokasi terbaik untuk CSP. Namun, data DNI sering sulit diperoleh dan memerlukan analisis jangka panjang agar lebih akurat, dengan deviasi rata-rata di bawah $\pm 5\%$ dari data 10 tahun (Schlecht, 2012).

2.5.2. Radiasi Energi Surya

Irradiance adalah energi matahari yang diterima per satuan luas dalam satuan waktu tertentu (W/m^2), sedangkan irradiansi menunjukkan total energi yang diterima selama periode tertentu, misalnya harian atau tahunan, dan biasanya dinyatakan dalam kWh/m^2 . Dalam klimatologi, penyinaran matahari dihitung dalam J/m^2 per hari, sementara di bidang rekayasa surya, digunakan satuan kWh/m^2 .

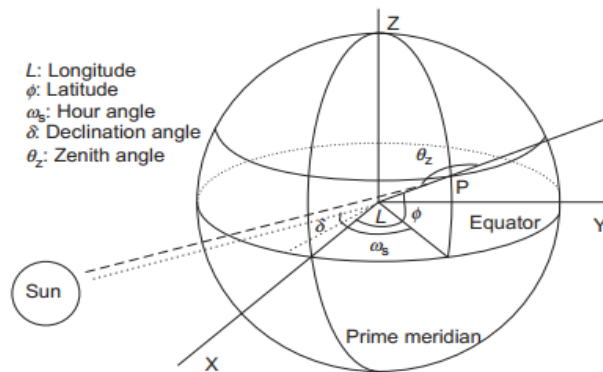
Irradiance harus selalu disertai periode waktu agar memiliki makna yang jelas. Dalam teknologi CSP, satuan yang umum digunakan antara lain $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, $\text{kWh}/(\text{m}^2\text{d})$, atau W/m^2 , dengan konversi antar satuan yang dapat dilihat di Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tabel konversi untuk nilai irradiance matahari

Unit	W/m^2	$\text{kWh}/(\text{m}^2/\text{day})$	$\text{kWh}/(\text{m}^2/\text{annual})$	$\text{MJ}/(\text{m}^2/\text{day})$
Nilai	1	0.024	8.76	11.574

Dalam meteorologi, radiasi matahari rata-rata dihitung selama 24 jam, termasuk malam. Namun, dalam teknik, radiasi hanya dihitung saat ada sinar matahari karena lebih mencerminkan intensitas sebenarnya. Radiasi harian penuh kurang relevan untuk desain.

Menurut ISO 9448 (1999), *direct normal irradiance* (DNI) adalah radiasi langsung pada bidang tegak lurus sinar matahari, sedangkan *diffuse irradiance* (DHI) adalah radiasi yang tersebar akibat scattering atmosfer. *Global horizontal irradiance* (GHI) adalah kombinasi DNI dan DHI, dihitung melalui kosinus sudut zenit matahari θ_z , sudut zenit matahari θ_z (Kalogirou, 2013).



Gambar 2. 9 Posisi matahari dalam sistem koordinat terestrial

Gambar 2.9 diatas menunjukkan representasi geometri posisi Matahari terhadap Bumi menggunakan sistem koordinat bola. Beberapa parameter penting yang digunakan dalam perhitungan posisi Matahari meliputi:

- L (*Longitude*): Garis bujur, menunjukkan posisi timur atau barat suatu lokasi dari meridian utama.
- ϕ (*Latitude*): Garis lintang, menunjukkan posisi utara atau selatan suatu lokasi dari garis khatulistiwa.
- ω_s (*Hour Angle*): Sudut waktu Matahari, menunjukkan perbedaan waktu lokal terhadap waktu Matahari tengah hari.
- δ (*Declination Angle*): Sudut deklinasi Matahari, yaitu sudut antara sinar Matahari dan bidang ekuator Bumi.
- θ_z (*Zenith Angle*): Sudut zenit, yaitu sudut antara arah tegak lurus ke atas dari permukaan Bumi dan arah sinar Matahari.

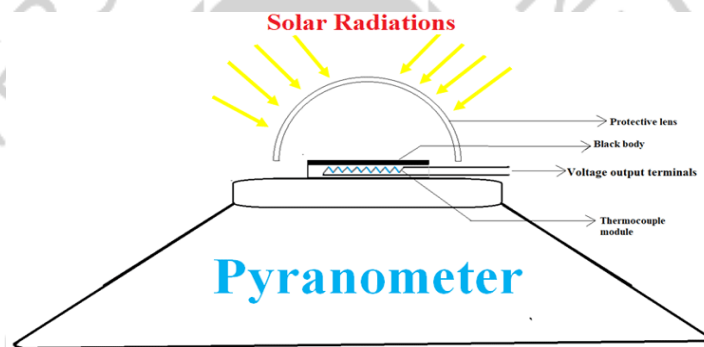
GHI dapat dihitung sebagai berikut berikut.

$$GHI = DHI + DNI \cos \theta_z \quad (2.31)$$

Untuk hari yang cerah, GHI terdiri sekitar 20% dari DHI dan 80% dari DNI $\cdot \cos (\theta_z)$. Persamaan di atas juga menjelaskan bagaimana DNI dapat diturunkan jika hanya GHI dan DHI yang diukur. (Kalogirou, 2013)

2.5.3. Pengukuran nilai radiasi matahari

Mengukur energi matahari di permukaan bumi adalah tugas kompleks. Teknologi pengukuran saat ini mengubah radiasi elektromagnetik menjadi energi yang dapat dideteksi, menggunakan fotodiode (efek fotolistrik) atau termopile (efek termoelektrik). *Pyranometer*, alat pengukur radiasi matahari dari seluruh hemisfer, mencakup gelombang pendek 300–3000 nm yang termasuk *Ultraviolet* (UV) ~300–400 nm, *Visible* (Cahaya tampak): ~400–700 nm, dan *Near-infrared* (NIR): ~700–3000 nm, serta termasuk radiasi langsung dan difus. *Pyranometer* umum digunakan dalam meteorologi, klimatologi, dan riset energi surya.



Gambar 2. 10 Skema *pyranometer*

Pyranometer menggunakan termopile untuk mengubah perbedaan suhu akibat paparan sinar matahari menjadi tegangan listrik (Gambar 2.10), mengukur radiasi global dengan bidang pandang *hemispherical*. Sementara itu, *pyrheliometer* mengukur sinar matahari langsung melalui sensor dengan bidang pandang sempit (5°) menggunakan sistem pelacakan matahari. Meski lebih kompleks secara teknis, *pyrheliometer* memberikan hasil lebih akurat untuk *direct normal irradiance* (DNI).

2.5.4. Parameter meteorologi tambahan

Radiasi matahari, khususnya *direct normal irradiance* (DNI), merupakan faktor utama yang menentukan kinerja pembangkit CSP. Selain DNI, beberapa parameter meteorologi juga mempengaruhi efisiensi, seperti suhu udara, kelembaban relatif, kecepatan angin, dan tekanan atmosfer. Meskipun pengaruhnya relatif kecil, kondisi ekstrem dapat berdampak signifikan pada performa sistem, mulai dari menurunkan efisiensi hingga meningkatkan biaya operasional (OPEX).

2.5.4.1. Suhu Udara

Suhu sekitar mempengaruhi efisiensi CSP dengan dua cara:

- *Solar Field*: Kerugian konvektif antara *heat transfer fluid* (HTF) dan udara meningkat pada suhu rendah, sehingga efisiensi solar field menurun.
- Kondensor Turbin Uap: Efisiensi kondensor meningkat saat suhu bola basah (*wet-bulb temperature*) lebih rendah, karena pendinginan lebih efektif. *Wet-bulb temperature* dipengaruhi oleh suhu udara dan kelembaban relatif, di mana efisiensi pendinginan meningkat saat kelembaban menurun.

2.5.4.2. Kelembaban Relatif

Kecepatan angin yang tinggi meningkatkan kerugian optik dan konveksi pada solar field, menurunkan efisiensi kolektor. Selain itu, angin kencang dapat menyebabkan *shutdown* darurat demi melindungi komponen, menurunkan produksi energi, serta meningkatkan risiko kerusakan mekanis dan biaya perbaikan.

2.5.4.3. Kecepatan Angin

Kecepatan angin yang tinggi meningkatkan kerugian optik dan konveksi pada solar field, menurunkan efisiensi kolektor. Selain itu, angin kencang dapat menyebabkan *shutdown* darurat demi melindungi komponen, menurunkan produksi energi, serta meningkatkan risiko kerusakan mekanis dan biaya perbaikan.

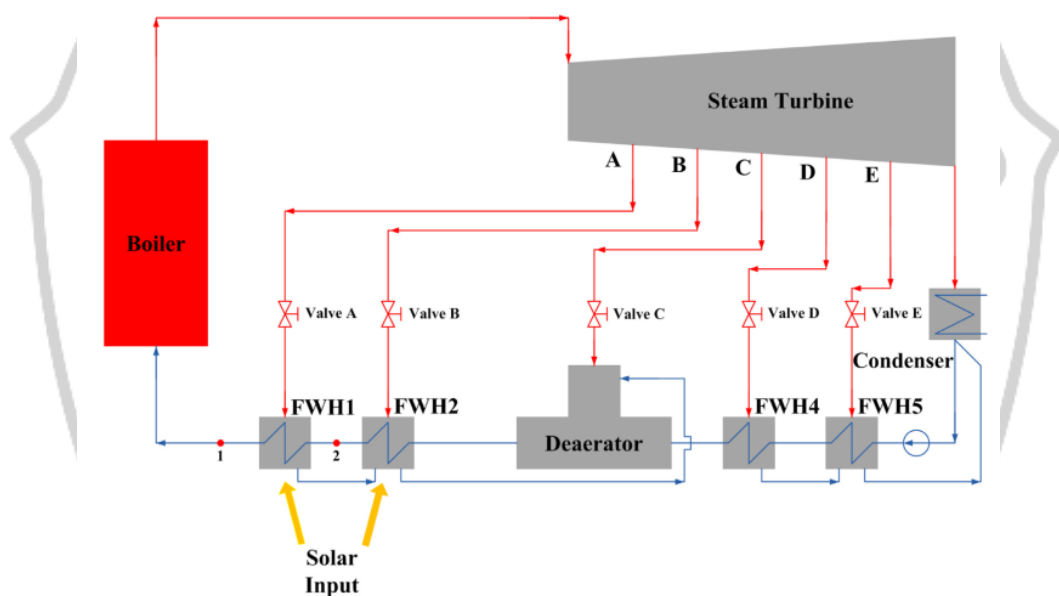
2.5.4.4. Tekanan Atmosfer

Tekanan atmosfer memengaruhi efisiensi turbin uap dan sistem pendingin. Tekanan rendah dapat mengurangi kinerja turbin, sedangkan tekanan tinggi meningkatkan densitas udara, yang mendukung proses pendinginan lebih baik di kondensor.

Dengan memahami dan menganalisis parameter-parameter ini secara menyeluruh, desain dan pengoperasian CSP dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi serta meminimalkan risiko operasional.

2.6 Solar Aided Power Generation (SAPG)

Solar Aided Power Generation (SAPG) adalah metode yang mengintegrasikan energi surya dengan pembangkit listrik berbahan bakar batubara untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya pembangkitan. SAPG memanfaatkan energi panas matahari sebagai pengganti uap ekstraksi dalam siklus *Rankine regenerative* (Gambar 2.11), yang biasanya digunakan untuk memanaskan air umpan boiler. Proses ini meningkatkan efisiensi termal tetapi mengurangi output turbin karena berkurangnya aliran massa uap (Gambar 2.12). Penelitian menunjukkan bahwa SAPG dapat menurunkan emisi gas rumah kaca dan mendukung pembangkitan listrik yang lebih berkelanjutan (Satish, 2020; Shagdar, 2022).



Gambar 2. 11 Skema diagram pembangkit listrik dengan sistem SAPG. (Shagdar, 2022)

Keterangan Gambar 2.11 diatas sebagai berikut:

Komponen Utama:

- *Boiler* (Ketel Uap) – Menghasilkan uap super panas untuk menggerakkan turbin uap.
- *Steam Turbine* (Turbin Uap) – Mengubah energi uap menjadi energi mekanik untuk menghasilkan listrik.

- *Condenser* (Kondensor) – Mendinginkan dan mengembunkan uap bekas dari turbin menjadi air kembali.
- *Deaerator* – Menghilangkan gas-gas terlarut dalam air umpan untuk mencegah korosi.
- *Solar Input* – Energi surya digunakan untuk meningkatkan suhu air sebelum masuk ke boiler.

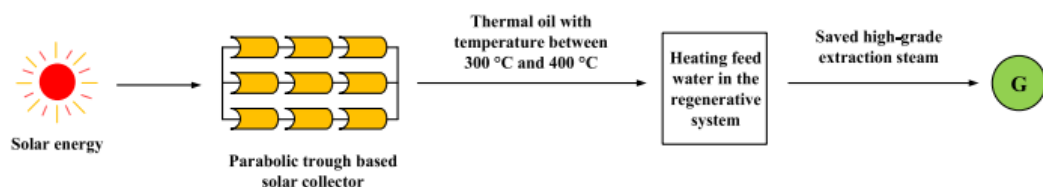
Komponen FWH (*Feedwater Heater*):

FWH (*Feedwater Heater*) adalah pemanas air umpan yang meningkatkan efisiensi siklus Rankine dengan memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin.

- FWH1 & FWH2 – Pemanas air umpan tekanan tinggi (*High-Pressure Feedwater Heater*), menerima panas dari uap ekstraksi awal (Valve A & Valve B).
- FWH4 & FWH5 – Pemanas air umpan tekanan rendah (*Low-Pressure Feedwater Heater*), menerima panas dari uap ekstraksi bagian akhir turbin (Valve D & Valve E).

Aliran Proses dalam Diagram:

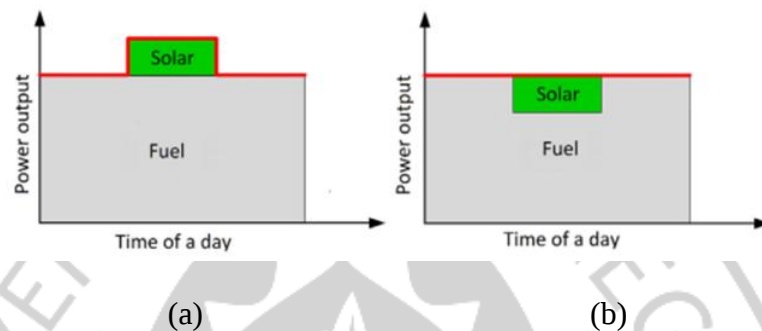
- Merah – Jalur uap (*steam*).
- Biru – Jalur air kondensat (*feedwater*).
- *Solar Input* – Menyediakan energi tambahan untuk pemanasan air sebelum masuk ke boiler



Gambar 2. 12 Konsep SAPG konvensional. (Shagdar, 2022)

Menurut Shagdar et al. (2022), SAPG adalah metode *retrofitting* yang mengintegrasikan energi surya ke pembangkit listrik batubara untuk meningkatkan kinerja dan mengurangi dampak lingkungan. SAPG dapat meningkatkan kapasitas

pembangkit hingga 5% tanpa tambahan konsumsi bahan bakar (*power boosting*) atau mempertahankan kapasitas sambil mengurangi emisi gas rumah kaca (*fuel saving*) (Gambar 2.13). Xin et al. (2019) menambahkan bahwa SAPG mengurangi biaya investasi CSP dan meningkatkan stabilitas serta keandalan pembangkitan listrik tenaga surya.



Gambar 2. 13 Alternatif mode (a) “power boosting” dan (b) “fuel saving” harian untuk pembangkit SAPG (Shagdar, 2022)

Teknologi SAPG dianggap paling efisien, ekonomis, dan berisiko rendah dalam menghasilkan tenaga surya termal karena beberapa keunggulan (Shagdar, 2022):

1. Efisiensi Tinggi: SAPG lebih efisien dibandingkan pembangkit listrik batubara dan pembangkit tenaga surya murni.
2. Biaya Rendah: Memanfaatkan infrastruktur dan jaringan pembangkit konvensional, sehingga biaya implementasi lebih murah dengan manfaat sosial, ekonomi, dan lingkungan yang besar.
3. Fleksibilitas Penerapan: Dapat diterapkan pada pembangkit baru atau dimodifikasi secara bertahap pada pembangkit yang ada tanpa risiko besar terhadap operasionalnya.
4. Kolaborasi dengan Industri Konvensional: Mendorong keterlibatan industri listrik tradisional dalam teknologi energi terbarukan untuk membantu memenuhi target energi bersih dengan biaya lebih rendah.
5. Dukungan Kolektor Suhu Rendah: SAPG bisa menggunakan kolektor surya seperti *vacuum tubes* dan *flat-plate collectors*.

Beberapa penelitian mengenai SAPG yang menghasilkan pengaruh positif antar lain, Hongjuan et al. (2013): Penelitian pada pembangkit 300 MW dengan PTC solar field (115,395 m²) menunjukkan peningkatan daya 50 MW, efisiensi solar-electricity 26.16%, pengurangan konsumsi batubara 36.27 g/kWh, dan LCOE sebesar 0.472 ¥/kWh.

Adibhatla et al. (2017): Simulasi pada pembangkit 500 MW dengan *retrofitting feedwater heater* surya menunjukkan LCOE 0.0504 \$/kWh (tanpa TES) dan 0.0519 \$/kWh (dengan TES), serta pengurangan tahunan CO₂ sebesar 258.031-ton dan FABA 87,812 ton.

Liu et al. (2021): Studi *retrofitting steam reheater* dan *feedwater preheater* pada pembangkit 600 MW menghasilkan pengurangan konsumsi batubara 13.2 g/kWh (5.2%), pengurangan CO₂ hingga 732.4 ton per hari, serta peningkatan daya 20.3–70 MW.

BAB III

