

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan salah satu sumber energi listrik yang beroperasi berdasarkan prinsip konversi energi termal menjadi energi mekanik, yang kemudian diubah menjadi energi listrik. Proses dasar konversi energi dalam PLTU banyak dijelaskan melalui siklus Rankine, yaitu siklus termal ideal yang umum digunakan dalam pembangkit listrik berbasis uap. Secara prinsip, siklus Rankine dimulai dengan pemanasan air di dalam boiler, di mana energi dari sumber panas, seperti pembakaran bahan bakar fosil, digunakan untuk mengubah air menjadi uap panas. Uap tersebut kemudian diarahkan ke turbin, di mana energi kinetiknya dimanfaatkan untuk memutar turbin dan menggerakkan generator sehingga menghasilkan listrik. Penelitian menunjukkan bahwa tekanan dan temperatur uap yang masuk ke turbin berpengaruh signifikan terhadap efisiensi siklus. Efisiensi termal dapat ditingkatkan dengan mempertahankan tekanan dan temperatur yang optimal saat uap memasuki turbin (Abbas et al., 2020; Irawan et al., 2021; Saputri et al., 2023).

Setelah melewati turbin, uap akan mengalami ekspansi dan kemudian didinginkan di dalam kondensor. Pada tahap ini, uap yang telah kehilangan energi panasnya kembali berubah menjadi air untuk digunakan kembali dalam siklus. Efisiensi siklus Rankine sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk kualitas campuran di kondensor, kondisi kerja pompa, serta performa turbin. Efisiensi termal siklus ini juga dapat bervariasi tergantung pada jenis fluida kerja dan temperatur operasional (Ahluriza et al., 2023; Dwinanto, 2023). Seiring perkembangan teknologi, konsep *Organic Rankine Cycle* (ORC) mulai banyak diteliti untuk memanfaatkan sumber panas bersuhu rendah. Fluida kerja organik pada ORC memungkinkan pengoperasian pada temperatur yang lebih rendah dibandingkan dengan air, sehingga memberikan fleksibilitas lebih besar dalam pemanfaatan energi terbarukan (Etu et al., 2022; Putera & Rosyid, 2021).

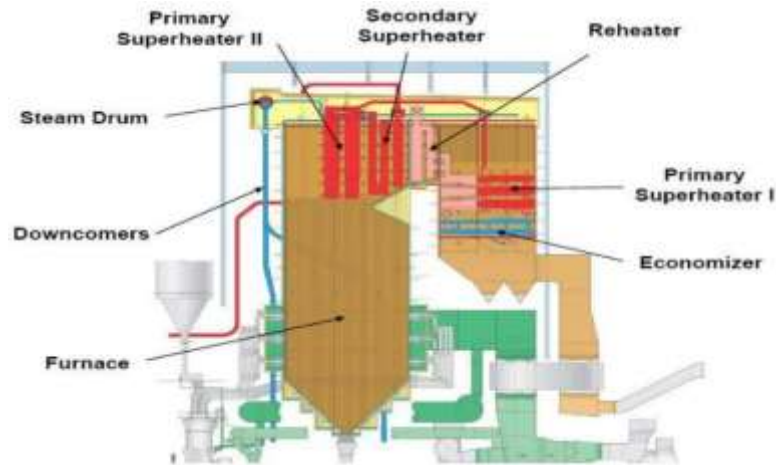
Selain aspek teknis, faktor ekonomi dan lingkungan juga menjadi pertimbangan utama dalam perancangan serta operasional PLTU. Penerapan teknologi yang ramah lingkungan dan efisien dalam penggunaan bahan bakar merupakan tuntutan penting bagi pengembangan PLTU modern. Hal ini terkait erat dengan isu lingkungan akibat emisi dari pembakaran bahan bakar fosil yang perlu dikelola dengan hati-hati (Abbas et al., 2020; Saputri et al., 2023). Prinsip dasar konversi energi pada PLTU melibatkan pemanasan air menjadi uap, konversi energi mekanik melalui turbin, serta pengembalian air ke siklus, dengan mempertimbangkan aspek efisiensi dan keberlanjutan. Optimalisasi faktor teknis, ekonomi, dan lingkungan menjadi kunci dalam memaksimalkan keluaran energi sekaligus meminimalkan dampak ekologis.

Dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap, terdapat beberapa komponen utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan energi listrik. Boiler berfungsi sebagai penghasil uap bertekanan dan bertemperatur tinggi yang digunakan untuk menggerakkan turbin uap. Energi mekanik yang dihasilkan turbin kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui generator. Setelah melewati turbin, uap dialirkan menuju kondensor untuk didinginkan dan dikondensasikan kembali menjadi air, sehingga dapat digunakan ulang dalam siklus. Proses pendinginan ini didukung oleh sistem pendingin, yang berperan menjaga kinerja kondensor tetap optimal. Sinergi dari komponen-komponen tersebut menjamin kontinuitas siklus Rankine dan efisiensi operasional pembangkit listrik tenaga uap.

1. Boiler

Salah satu komponen utama yang memiliki peran krusial dalam sistem pembangkit tenaga listrik adalah boiler atau steam generator, yang lazim disebut sebagai ketel uap. Boiler berfungsi sebagai alat penukar kalor, di mana energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar dikonversi menjadi energi potensial dalam bentuk uap. Uap yang dihasilkan memiliki tekanan dan temperatur tinggi, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai media penggerak utama pada turbin uap. Energi panas tersebut diperoleh melalui proses pembakaran bahan bakar di ruang bakar, yang kemudian

ditransfer ke fluida kerja hingga mencapai kondisi yang memungkinkan terjadinya ekspansi dan konversi energi di turbin.



Gambar 2.1 Boiler
(Sumber : M.Ihsan, 2019)

Gambar 2.1 merupakan bagian dari Boiler. Boiler berfungsi menghasilkan uap pada tekanan dan temperatur tinggi (*superheated vapor*). Proses perubahan fase dari cair menjadi uap dilakukan dengan memanfaatkan energi panas yang diperoleh dari pembakaran bahan bakar. Pada PLTU Paiton, boiler menggunakan batubara jenis low rank coal sebagai bahan bakar utama. Transfer panas dari hasil pembakaran menuju air demineralisasi terjadi melalui mekanisme radiasi dan konveksi.

Komponen furnace berperan sebagai ruang pembakaran utama, yang dilengkapi dengan beberapa bagian penting seperti *refractory*, ruang perapian, burner, *exhaust for flue gas*, serta *charge and discharge door*. Bagian dinding boiler disebut *wall tube*, yaitu kumpulan pipa (tube) yang disatukan oleh membran. Air yang akan dididihkan dialirkan melalui pipa-pipa tersebut.

Dinding pipa boiler dirancang dengan ulir di bagian dalamnya agar aliran air menjadi turbulen. Kondisi aliran turbulen ini meningkatkan efektivitas penyerapan panas, mendistribusikan panas secara lebih merata, serta mencegah terjadinya *overheating* akibat penguapan awal air pada pipa yang menerima radiasi langsung dari ruang bakar. Untuk menahan penyebaran panas keluar dari sistem, bagian luar *wall tube* dilapisi dengan

dinding isolasi berbahan mineral fiber, yang berfungsi menjaga efisiensi termal dan keamanan operasi boiler.

2. Turbin Uap

Turbin uap merupakan mesin konversi energi yang berfungsi mengubah energi panas (*thermal energy*) menjadi energi mekanis dalam bentuk energi putar. Secara konstruktif, turbin terdiri atas rumah turbin (*casing*) atau stator yang bersifat statis, serta rotor sebagai komponen berputar. Pada bagian rotor dipasang sudu-sudu jalan yang disusun melingkar dan berjejer sepanjang rotor, dengan posisi berselang-seling terhadap sudu tetap.

Proses konversi energi diawali ketika energi panas pada uap diubah menjadi energi kinetik melalui nozzle. Uap berkecepatan tinggi tersebut kemudian diarahkan menuju rotor, sehingga menumbuk dan mendorong sudu berputar. Setelah melewati sudu berputar, aliran uap diteruskan ke sudu tetap, lalu dipantulkan kembali menuju sudu berputar berikutnya. Mekanisme ini terjadi secara berulang hingga uap akhirnya keluar melalui exhaust turbin menuju kondensor. Dengan demikian, proses konversi energi dari kinetik menjadi energi mekanis berlangsung pada interaksi berkesinambungan antara sudu tetap dan sudu berputar dalam turbin uap, seperti pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Turbin Uap

(Sumber: Local Media Training, 2021)

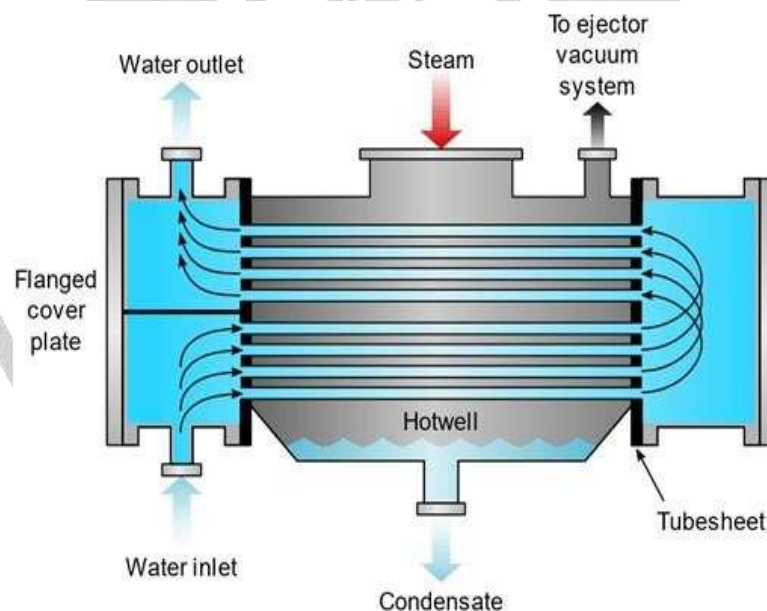
Berdasarkan tipe turbin yang digunakan dalam sistem pembangkit listrik, klasifikasinya dapat dibedakan menurut tingkat tekanannya, yaitu

turbin tekanan rendah, turbin tekanan sedang, dan turbin tekanan tinggi. Secara umum, turbin uap terdiri atas dua komponen utama, yaitu stator sebagai bagian statis dan rotor sebagai bagian berputar. Kedua komponen ini dilengkapi dengan elemen pendukung seperti bantalan, kopling, serta sistem bantu lainnya yang berfungsi untuk meningkatkan kinerja turbin.

Turbin uap bekerja dengan memanfaatkan energi kinetik yang timbul akibat peningkatan energi termal pada fluida kerja. Fungsi utamanya adalah mengonversi energi panas yang terkandung dalam uap menjadi energi mekanis berupa putaran. Uap bertekanan dan bertemperatur tinggi dialirkan melalui nozzle, sehingga kecepatannya meningkat dan mampu mendorong sudu-sudu turbin. Dorongan ini menyebabkan poros turbin berputar, menghasilkan energi mekanik yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan generator dalam proses pembangkitan listrik.

3. Kondensor

Kondensor merupakan salah satu komponen penukar kalor (heat exchanger) yang berfungsi mengubah uap bekas dari turbin menjadi kondensat dalam bentuk air. Gambar 2.3 merupakan ilustrasi prinsip kerja kondensor.



Gambar 2.3 Kondenser (Sumber: saVRee,2026)

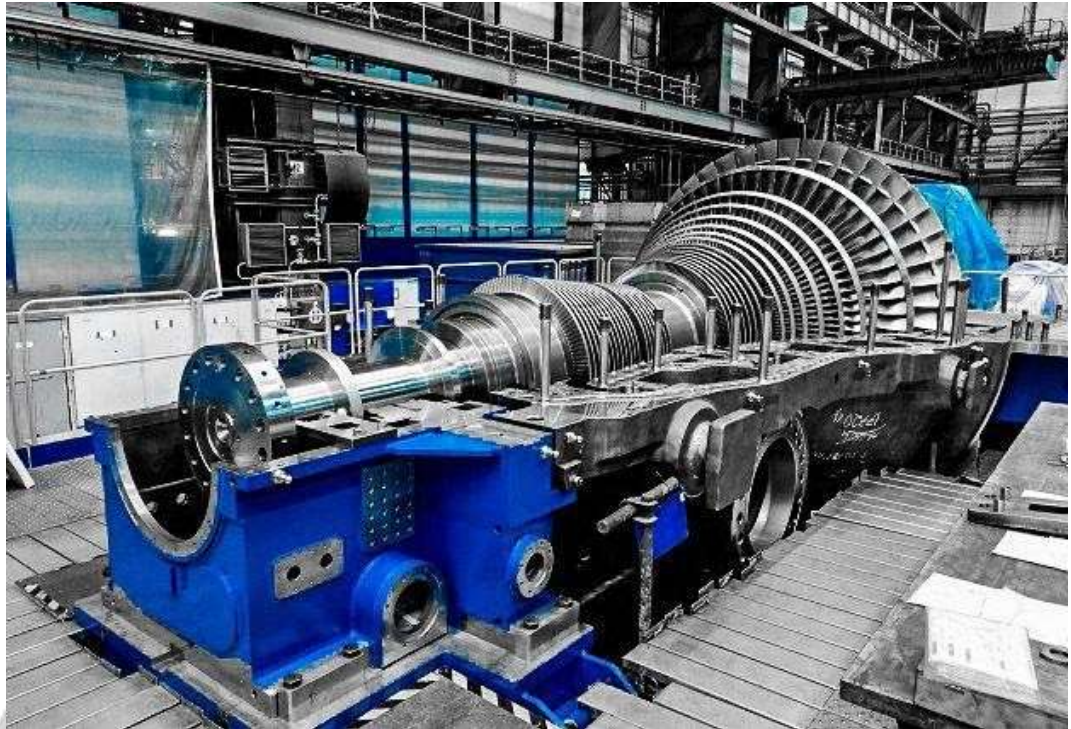
Pada prinsip kerja kondensor, air hasil kondensasi tersebut ditampung pada hotwell, kemudian disirkulasikan kembali menuju boiler untuk diproses ulang menjadi uap. Dengan demikian, kondensor berperan penting dalam menjaga kesinambungan siklus termal pada pembangkit listrik tenaga uap sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan fluida kerja.

Proses utama yang terjadi pada kondensor adalah perpindahan panas, di mana panas dari uap bekas turbin dialirkan menuju fluida pendingin melalui permukaan perpindahan panas. Permukaan ini umumnya berupa pipa-pipa berdinding tipis dengan jumlah banyak, sehingga mampu meningkatkan efektivitas transmisi panas. Dalam pengoperasiannya, kondisi vakum pada kondensor harus senantiasa dijaga agar uap dapat bergerak dengan lancar dari sudu terakhir turbin tekanan rendah (*low pressure turbine*).

Hasil kondensasi berupa air ditampung dalam hotwell, kemudian dialirkan kembali ke boiler melalui feedwater heater. Pada instalasi ini, kondensor yang digunakan adalah jenis shell and tube, dengan fluida pendingin yang berasal dari danau atau air laut. Untuk mendukung proses ini, diperlukan sistem Water Treatment Plant (WTP) yang berfungsi menghilangkan kandungan mineral (demineralisasi) dari raw water, yakni air bebas garam tetapi masih mengandung mineral logam.

Secara umum, alur proses WTP meliputi: air laut → desalination plant → raw water tank (air tawar) → demineralization plant (air demin) → make up water tank → unit (condenser - deaerator - steam drum - steam turbine). Dengan demikian, kondensor tidak hanya berfungsi sebagai penukar kalor, tetapi juga menjadi bagian integral dalam siklus air-uap pada pembangkit, yang menuntut dukungan sistem pengolahan air untuk menjamin kualitas fluida kerja serta efisiensi operasi.

4. Generator



Gambar 2.4 Generator
(Sumber: Fauzi,2023)

Gambar 2.4 merupakan generator yang digunakan pada obyek penelitian. Generator merupakan suatu perangkat yang berfungsi menghasilkan energi listrik melalui masukan berupa energi mekanik. Dengan demikian, peran utama generator adalah mengonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Dalam operasionalnya, generator sangat bergantung pada sistem eksitasi, yang memiliki keterkaitan erat dengan kerja Automatic Voltage Regulator (AVR). Prinsip dasar AVR adalah mengatur besar kecilnya arus eksitasi pada exciter, sehingga tegangan keluaran generator dapat dikendalikan.

Sistem eksitasi sendiri merupakan penyedia arus searah (DC) yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet pada generator. Besarnya tegangan listrik yang dihasilkan generator ditentukan oleh kuatnya arus eksitasi yang diberikan. Oleh karena itu, sistem eksitasi memegang peran

yang sangat vital dalam proses pembangkitan listrik, karena secara langsung menentukan stabilitas dan kualitas tegangan keluaran generator.

5. Sistem Pendingin

Sistem pendingin merupakan salah satu subsistem penting dalam operasi pembangkit listrik tenaga uap, karena berfungsi menjaga kinerja kondensor dan memastikan keberlangsungan siklus termodinamika (siklus Rankine). Pendinginan diperlukan untuk mengembunkan uap bekas dari turbin menjadi air (kondensat), sehingga dapat disirkulasikan kembali menuju boiler. Dengan demikian, sistem pendingin berperan dalam meningkatkan efisiensi siklus serta menjaga stabilitas operasi turbin dan generator.

Proses pendinginan pada kondensor terjadi melalui mekanisme perpindahan panas, di mana panas dari uap buang dialirkan ke fluida pendingin (umumnya air). Fluida pendingin ini menyerap energi panas sehingga uap terkondensasi menjadi air. Agar proses ini berlangsung optimal, diperlukan suplai fluida pendingin yang stabil dan dalam jumlah besar.

Perbandingan karakteristik antara teknologi subcritical, supercritical, dan ultra-supercritical (USC) merupakan aspek penting dalam memahami efisiensi serta performa sistem pembangkit listrik berbasis uap. Masing-masing teknologi memiliki kelebihan dan keterbatasan yang memengaruhi desain maupun operasional pembangkit. Teknologi subcritical beroperasi pada tekanan dan suhu yang relatif lebih rendah, yaitu di bawah 18 MPa dan 540 °C, dengan efisiensi konversi energi berkisar 35–38% (Niegodajew et al., 2020). Keterbatasan utama teknologi ini terletak pada rendahnya efisiensi serta kemampuan yang kurang optimal dalam mengendalikan emisi, khususnya CO₂. Kehadiran dua fase, yakni cair dan uap, juga menimbulkan fenomena krisis penguapan (boiling crisis) yang dapat memengaruhi performa keseluruhan sistem (Song & Liu, 2021).

Sebaliknya, teknologi supercritical beroperasi pada tekanan di atas 22 MPa dengan suhu mendekati 600 °C. Pada kondisi ini, fase transisi antara cair dan uap dapat dieliminasi, sehingga efisiensi konversi energi meningkat hingga 40–45% (Siddiqui, 2021). Peningkatan ini terjadi berkat densitas energi yang lebih tinggi dan berkurangnya kehilangan panas. Efisiensi yang lebih baik ini telah

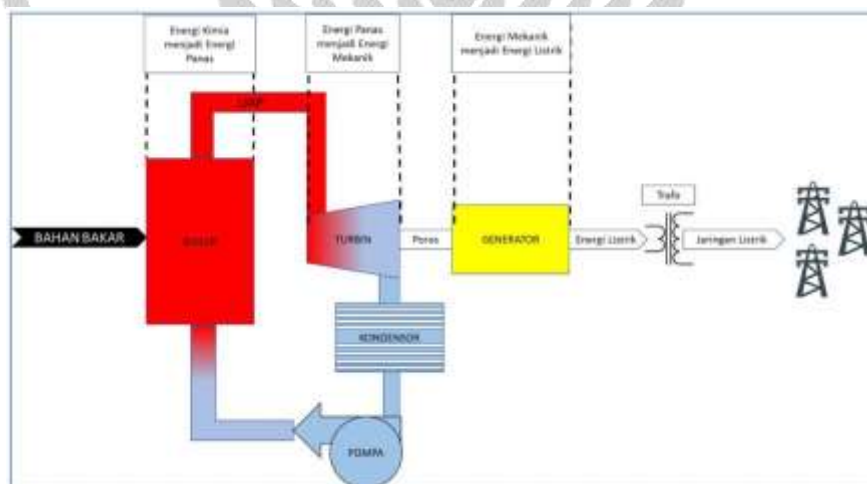
diaplikasikan secara luas, baik dalam siklus Rankine dengan pemanfaatan supercritical fluids (SFs) (Chen et al., 2021) maupun dalam sistem pemulihan panas limbah (Saadon & Nasir, 2020).

Adapun teknologi ultra-supercritical (USC) beroperasi pada kondisi yang lebih ekstrem, dengan tekanan sekitar 32 MPa dan suhu 600–650 °C. Efisiensinya dapat mencapai 45–50%, sehingga menawarkan peningkatan signifikan dalam konversi energi sekaligus pengurangan emisi gas rumah kaca (Wu et al., 2023; Yokobori et al., 2022). Keunggulan ini dimungkinkan oleh penggunaan material canggih yang mampu bertahan pada kondisi termal dan tekanan tinggi, sehingga menjadikan teknologi USC sebagai pilihan utama dalam pembangkit listrik modern (Wu et al., 2023; Yokobori et al., 2022). Dengan demikian, masing-masing teknologi memiliki posisi strategis dalam pengembangan energi berkelanjutan dan peningkatan efisiensi energi global. Pemilihan antara teknologi subcritical, supercritical, maupun ultra-supercritical ditentukan oleh faktor kebutuhan spesifik, biaya investasi, ketersediaan sumber daya, serta kebijakan lingkungan yang berlaku.

Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) *Ultra-Supercritical* (USC), efisiensi termal yang tinggi serta karakteristik desain yang khusus menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja maupun dampak lingkungannya. Teknologi USC dioptimalkan untuk beroperasi pada kondisi tekanan dan temperatur yang lebih ekstrem dibandingkan dengan teknologi subcritical dan supercritical, sehingga mampu menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi sekaligus menekan konsumsi batubara. Secara umum, PLTU USC beroperasi pada temperatur uap sekitar 600–650 °C dan tekanan 30–35 MPa (Wahyuningtyas & Yuliyani, 2020). Dengan kondisi tersebut, efisiensi termal dapat mencapai lebih dari 45% (Irsan & Istiqomah, 2023). Peningkatan temperatur dan tekanan tidak hanya meningkatkan efisiensi konversi energi, tetapi juga berkontribusi dalam menurunkan emisi gas rumah kaca per unit energi yang dihasilkan, sehingga teknologi ini dinilai lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan sistem konvensional.

Dari sisi desain, boiler pada PLTU USC berbeda secara signifikan dengan boiler pada teknologi subcritical maupun supercritical. Boiler USC harus menggunakan material khusus yang tahan terhadap kondisi tekanan dan temperatur ekstrem, misalnya baja paduan berkekuatan tinggi, guna mencegah kerusakan serta memastikan keandalan operasi (Mubarak & Djunuda, 2022). Selain itu, superheater dengan efektivitas tinggi diterapkan untuk memaksimalkan penghangatan uap sebelum memasuki turbin, sehingga uap yang digunakan memiliki nilai entalpi optimal. Efisiensi tinggi pada PLTU USC juga berdampak pada pengurangan konsumsi batubara. Dengan kapasitas konversi energi yang lebih baik, jumlah batubara yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik menjadi lebih sedikit. Studi menunjukkan bahwa PLTU USC mampu menghemat konsumsi batubara hingga 20–30% dibandingkan dengan PLTU subcritical dalam kondisi operasi yang serupa (Anggara et al., 2021).

Untuk memaksimalkan potensi teknologi USC, penerapan desain yang mendukung efisiensi tinggi menjadi krusial, termasuk penerapan sistem pengendalian kualitas udara yang ketat serta optimasi proses pembakaran untuk meningkatkan efisiensi penggunaan batubara sekaligus menekan emisi (Prameswari et al., 2021). Teknologi PLTU USC menawarkan solusi yang menjanjikan dalam menghadapi tantangan penyediaan energi yang efisien, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan di era modern. Gambar 2.5 merupakan ilustrasi proses perubahan energi PLTU.



Gambar 2.5 Proses Perubahan Energi di PLTU (Sumber: Tirumala,2017)

Proses pembangkitan listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) melibatkan serangkaian konversi energi yang berlangsung secara berkesinambungan. Tahap awal dimulai dari proses pembakaran bahan bakar di dalam boiler, di mana energi kimia yang tersimpan dalam batubara atau bahan bakar fosil lainnya dikonversi menjadi energi panas. Energi panas tersebut digunakan untuk memanaskan air hingga berubah menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi. Uap ini kemudian dialirkan ke turbin uap, sehingga mendorong sudu-sudu turbin dan menghasilkan energi mekanik berupa putaran poros turbin. Poros turbin terhubung langsung dengan generator, sehingga energi mekanik dari putaran turbin dapat dikonversi menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan selanjutnya disalurkan ke transformator (trafo) untuk dinaikkan tegangannya, sebelum akhirnya didistribusikan melalui jaringan transmisi listrik menuju konsumen. Ilustrasi perubahan energi pada PLTU seperti pada Gambar 2.5.

Sementara itu, uap yang telah melewati turbin dialirkan menuju kondensor, tempat terjadinya proses kondensasi yang mengubah uap menjadi air kembali (kondensat). Air hasil kondensasi tersebut ditampung, kemudian dipompa kembali ke boiler untuk dipanaskan ulang, sehingga membentuk suatu siklus termodinamika tertutup. Dengan cara ini, PLTU dapat beroperasi secara kontinu dalam menghasilkan energi listrik. Proses konversi energi yang terjadi di dalam PLTU dari energi kimia menjadi energi panas, kemudian energi mekanik, hingga akhirnya energi listrik—menunjukkan pentingnya integrasi antarkomponen dalam menjaga efisiensi serta keandalan sistem pembangkit listrik tenaga uap.

2.2 Sistem Kondensor dan Pendinginan PLTU

Kondensor memiliki peran yang sangat vital dalam siklus termal Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Fungsi utamanya adalah mendinginkan uap buang dari turbin dan mengubahnya kembali menjadi air (kondensat), sehingga dapat didaur ulang dalam sistem. Proses ini tidak hanya menjaga kesinambungan siklus, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan efisiensi termal serta optimalisasi kinerja pembangkit. Dalam operasionalnya, kondensor mampu meningkatkan efisiensi sistem dengan menurunkan tekanan di dalam siklus,

sehingga memungkinkan turbin beroperasi lebih efisien dan menghasilkan energi listrik yang lebih besar dengan konsumsi bahan bakar yang lebih rendah.

Salah satu mekanisme utama peningkatan efisiensi melalui kondensor adalah pemanfaatan air pendingin, yang umumnya diperoleh dari sumber alami seperti sungai atau laut. Air pendingin ini berfungsi menyerap panas dari uap yang keluar dari turbin, sehingga menurunkan suhu dan tekanan di dalam kondensor. Penurunan ini memfasilitasi proses kondensasi uap menjadi air, yang kemudian dapat dialirkan kembali ke boiler untuk memulai siklus baru (Rahmadhani et al., 2023). Dengan demikian, tercipta suatu siklus tertutup yang efisien, yang menjadi dasar efektivitas sistem PLTU.

Efektivitas kinerja kondensor sangat dipengaruhi oleh sejumlah faktor, antara lain temperatur operasi, laju aliran air pendingin, serta perbedaan suhu antara uap dan fluida pendingin. Penelitian menunjukkan bahwa variasi temperatur, tekanan, serta kualitas air pendingin memiliki dampak signifikan terhadap performa kondensor (ZA et al., 2023). Misalnya, semakin rendah tingkat fouling pada air pendingin, semakin tinggi pula efisiensi perpindahan panas yang dicapai. Sebagai contoh, pada PLTU Tanjung Awar-Awar, sistem pendingin menggunakan air laut dengan metode sirkulasi, yang terbukti efektif dalam menjaga kestabilan temperatur dan tekanan sistem (Rahmadhani et al., 2023).

Upaya peningkatan efisiensi kondensor juga memerlukan desain dan rekayasa yang optimal. Pendekatan teknik, seperti perbaikan aliran fluida dan pengurangan kehilangan tekanan, dapat mendukung kinerja kondensor agar mampu beroperasi secara lebih efektif dan berkelanjutan (Irawan et al., 2021). Selain itu, desain yang efisien juga membantu mengurangi dampak lingkungan serta konsumsi energi jangka panjang. Kondensor merupakan bagian integral dari siklus termal PLTU. Desain, pengelolaan, serta operasional yang tepat dari unit ini berperan penting dalam menjamin efisiensi, keandalan, dan performa keseluruhan sistem pembangkit listrik tenaga uap.

Kondensor memiliki peran yang krusial dalam sistem pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) sebagai alat penukar panas yang mendinginkan uap dari turbin dan mengubahnya kembali menjadi air, yang kemudian dapat didaur ulang ke

dalam boiler. Dalam konteks ini, analisis perpindahan panas sangat penting, dan beberapa parameter utama dalam mekanisme perpindahan panas di kondensor termasuk *Log Mean Temperature Difference* (LMTD), koefisien perpindahan panas total (U), dan faktor kebersihan (*cleanliness factor*).

1. *Log Mean Temperature Difference* (LMTD)

LMTD adalah metode yang digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas dalam kondensor dengan mempertimbangkan perbedaan suhu antara dua fluida yang terjadi pada dua ujung kondensor dan mengintegrasikan nilai-nilai tersebut dengan cara yang seimbang. Pada kondensor, LMTD dipakai untuk menentukan dan menghitung laju perpindahan panas yang terjadi saat uap panas mengalir dan bersentuhan dengan air pendingin di dalam pipa. Penelitian di PLTU Tanjung Awar-Awar menunjukkan bahwa nilai LMTD berhubungan langsung dengan suhu fluida pada inlet dan outlet dari kondensor, yang sangat mempengaruhi efisiensi kondensor tersebut Rahmadhani et al. (2023).

2. Koefisien Perpindahan Panas (U)

Koefisien perpindahan panas total, yang dilambangkan dengan U , adalah parameter penting dalam menentukan efisiensi transfer panas dalam kondensor. U mencakup konveksi dan konduksi panas, dan nilainya dapat dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk kondisi aliran, kualitas permukaan pipa, dan efisiensi perpindahan panas Alfani et al. (2021). Penelitian juga menunjukkan bahwa peningkatan nilai U berbanding lurus dengan laju perpindahan panas, di mana nilai U yang lebih tinggi memastikan lebih banyak panas ditransfer dalam waktu yang lebih singkat Ardiansyah & Imansyah (2024).

3. Cleanliness Factor

Faktor kebersihan (*cleanliness factor*) mengacu pada seberapa bersih permukaan kondensor dari fouling atau kerak yang mungkin terbentuk dan menghambat laju perpindahan panas. Adanya fouling pada pipa kondensor dapat menurunkan nilai koefisien perpindahan panas (U) dan mengurangi efisiensi kondensor secara keseluruhan Fadillah & Soegiarto (2023). Dengan

menjaga kebersihan kondensor, efisiensi perpindahan panas dapat dipertahankan pada tingkat optimal, sehingga laju perpindahan panas tetap tinggi dan menghindari penurunan kinerja Anggraeni et al. (2023). Penelitian menunjukkan bahwa perlu dilakukan pemantauan dan pembersihan kondensor secara berkala untuk meningkatkan efektivitas operasional dan mencegah penurunan laju perpindahan panas Wijaya & Gunadi (2024).

Hubungan antara tekanan kondensor (*backpressure*), *Cooling Water Inlet Temperature* (CWIT), dan kevakuman sistem pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) merupakan aspek penting dalam menentukan efisiensi serta kinerja operasional sistem. Ketiga variabel tersebut saling berkaitan erat, di mana perubahan pada salah satunya akan berdampak langsung terhadap performa kondensor dan efisiensi termal siklus secara keseluruhan.

Tekanan kondensor, atau *backpressure*, adalah tekanan yang timbul pada sisi kondensor akibat uap yang mengalami kondensasi. Tekanan ini bertindak sebagai hambatan bagi aliran uap menuju kondensor. Semakin tinggi tekanan kondensor, semakin sulit uap mengalir ke dalam sistem, sehingga efisiensi termal mengalami penurunan. Peningkatan tekanan pada kondensor juga dapat mengurangi laju perpindahan panas, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi operasional pembangkit (Etu et al., 2022).

Cooling Water Inlet Temperature (CWIT). Suhu masuk air pendingin (CWIT) memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja kondensor. CWIT yang lebih rendah meningkatkan kemampuan kondensor dalam menurunkan suhu uap yang terkondensasi, sehingga memperbesar perbedaan suhu antara uap dan fluida pendingin. Kondisi ini berkontribusi terhadap peningkatan laju perpindahan panas. Selain itu, penurunan CWIT juga berkorelasi dengan penurunan tekanan kondensor, karena kondisi ini membantu mempertahankan kevakuman optimal dalam sistem (Shanahan & Chalim, 2023).

Kevakuman yang baik pada sistem kondensor memegang peran penting dalam menjaga efisiensi operasional PLTU. Kevakuman yang lebih tinggi berarti tekanan di dalam kondensor lebih rendah, yang memfasilitasi aliran uap sekaligus mempercepat proses kondensasi. Hubungan timbal balik antara tekanan

kondensor, CWIT, dan kevakuman menunjukkan bahwa semakin rendah CWIT, semakin rendah pula tekanan kondensor, sehingga kevakuman meningkat. Kondisi ini memungkinkan kondensor bekerja lebih efisien dalam mengubah uap menjadi air, yang sangat krusial untuk efisiensi siklus termal PLTU secara keseluruhan (Midiani et al., 2021; Siswanto et al., 2024).

Perbandingan antara sistem pendingin air tawar dan air laut dalam konteks operasional pembangkit listrik dan industri laut memiliki sejumlah kelebihan dan kekurangan yang signifikan, termasuk tantangan yang dihadapi dalam setiap sistem. Di bawah ini adalah analisis rinci mengenai masing-masing sistem:

1. Sistem Pendingin Air Tawar

a. Kelebihan:

Kualitas Air yang Lebih Baik: Air tawar umumnya memiliki kadar garam dan mineral yang lebih rendah dibandingkan air laut, sehingga mengurangi risiko korosi dan fouling pada sistem perpipaan dan peralatan (Susanto et al., 2020).

Kinerja Peralatan yang Konsisten: Sistem pendingin berbasis air tawar cenderung memiliki efisiensi lebih baik karena dapat menghindari masalah fouling yang sering terjadi pada sistem yang menggunakan air laut (Ziliwu et al., 2021).

b. Kekurangan:

Keterbatasan Sumber: Sumber air tawar terbatas, terutama di daerah yang mengalami kekeringan atau memiliki curah hujan yang rendah, sehingga dapat mengakibatkan masalah pasokan dalam operasi jangka panjang (Aji et al., 2021).

Peningkatan Biaya Pengolahan: Adanya kebutuhan untuk mengelola dan memurnikan air tawar sering kali memerlukan biaya tambahan dan teknologi yang lebih mahal (Ihsan et al., 2021).

c. Tantangan Operasional:

Ketersediaan Air: Dalam konteks operasional, tantangan utama adalah memastikan ketersediaan air tawar yang cukup, terutama di wilayah yang dipengaruhi oleh perubahan iklim (Ziliwu et al., 2021).

Perawatan Sistem: Air tawar yang mengandung berbagai kontaminan harus dikelola secara efektif agar tidak menurunkan kinerja sistem pemanasan dan pendinginan, serta untuk menghindari masalah kesehatan lingkungan(Susanto et al., 2020).

2. Sistem Pendingin Air Laut

a. Kelebihan:

Ketersediaan Sumber Tak Terbatas: Air laut sebagai sumber pendingin melimpah dan tersedia secara luas di lokasi pesisir, memungkinkan operasi jangka panjang tanpa risiko kekurangan(Dadang et al., 2023).

Kinerja dalam Suhu Tinggi: Air laut berfungsi baik sebagai media pendingin dalam suhu tinggi karena daya hantar panas yang baik, yang dapat membantu dalam mengoptimalkan efisiensi sistem pendinginan(Pongkessu et al., 2021).

b. Kekurangan:

Korosi dan Fouling: Kadar garam yang tinggi dan kandungan mineral di dalam air laut meningkatkan risiko korosi dan fouling pada peralatan, yang dapat menurunkan efisiensi dan menambah biaya pemeliharaan(Ihsan et al., 2021).

Dampak Lingkungan: Penggunaan air laut dapat menyebabkan dampak ekologis, seperti pemanasan dan pencemaran yang merusak ekosistem perairan saat airnya dibuang kembali ke lingkungan(Surbakti et al., 2022).

c. Tantangan Operasional:

Perawatan yang Intensif: Sistem pendingin air laut membutuhkan pemeliharaan rutin untuk membersihkan saluran dari akumulasi biofouling dan korosi, serta untuk menjaga efisiensi(Ziliwu et al., 2021).

Perubahan Tingkat Salinitas: Fluktuasi salinitas dan kestabilan suhu di perairan laut dapat memengaruhi kinerja sistem dan memerlukan penyesuaian(Ihsan et al., 2021).

Sistem pendingin air tawar dan air laut adalah dua jenis sistem yang paling umum digunakan dalam pembangkit listrik termal. Kedua sistem memiliki karakteristik yang berbeda dan dipilih berdasarkan lokasi pembangkit serta

ketersediaan sumber daya alam setempat. Sistem pendingin air tawar memanfaatkan air dari sungai, danau, atau reservoir untuk mendinginkan kondensor. Kelebihan utama dari sistem ini adalah ketersediaan air tawar yang lebih stabil dalam hal salinitas dan temperatur dibandingkan air laut. Selain itu, air tawar cenderung lebih murah dan tidak menimbulkan masalah korosi setinggi air laut, sehingga pemeliharaan sistem pipa kondensor menjadi lebih mudah dan lebih murah (Kehlhofer et al., 2009). Namun, kekurangan dari sistem ini adalah sensitivitas terhadap fluktuasi musim. Pada musim kemarau, volume air tawar bisa berkurang drastis, dan suhu air bisa meningkat, mengurangi efektivitas proses pendinginan. Selain itu, sistem ini cenderung memiliki keterbatasan kapasitas di wilayah dengan ketersediaan air tawar yang terbatas (Ganapathy, 2011).

Di sisi lain, sistem pendingin air laut lebih umum digunakan pada pembangkit listrik yang terletak di wilayah pesisir. Keuntungan utama dari sistem ini adalah ketersediaan air yang melimpah dan relatif konstan sepanjang tahun, baik dari segi volume maupun suhu, meskipun dapat mengalami sedikit variasi musiman. Selain itu, air laut memiliki kapasitas pendinginan yang lebih besar dibandingkan air tawar karena kapasitas panas spesifiknya yang lebih tinggi (Boyce, 2012). Namun, penggunaan air laut menghadirkan tantangan operasional yang signifikan, seperti biofouling (organisme laut yang menempel pada pipa dan kondensor), korosi pada peralatan, dan pengelolaan *thermal discharge* (pembuangan air panas kembali ke laut), yang dapat berdampak negatif pada ekosistem laut (Badr et al., 2009). Selain itu, air laut juga memiliki salinitas tinggi, yang meningkatkan risiko korosi dan merusak peralatan dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, sistem pendingin air tawar lebih cocok di wilayah dengan sumber air tawar yang stabil, namun menghadapi tantangan pada musim kemarau atau di daerah dengan ketersediaan air terbatas. Sebaliknya, sistem pendingin air laut menawarkan keuntungan dalam ketersediaan sumber daya yang konstan, tetapi dihadapkan pada tantangan terkait korosi, biofouling, dan dampak lingkungan terkait pembuangan air panas. Pemilihan antara kedua sistem ini bergantung pada kondisi geografis, sumber daya alam, dan pertimbangan biaya jangka panjang (Kehlhofer et al., 2009; Boyce, 2012).

2.3 Cooling Water Inlet Temperature (CWIT) dan Dampaknya terhadap Kinerja PLTU

Cooling Water Inlet Temperature (CWIT) adalah suhu air pendingin yang masuk ke kondensor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Parameter ini menjadi salah satu variabel operasi yang paling penting karena secara langsung memengaruhi kondisi termodinamika di kondensor. CWIT menentukan temperatur saturasi uap buang turbin, sehingga memengaruhi tekanan backpressure turbin, efisiensi siklus Rankine, serta daya netto yang dihasilkan (Kehlhofer et al., 2009).

Karakteristik utama CWIT adalah sangat dipengaruhi oleh sumber air pendingin. Pada sistem pendingin terbuka (*open cooling system*), CWIT bergantung pada temperatur lingkungan (suhu air laut, sungai, atau danau), sedangkan pada sistem pendingin tertutup (*closed cooling system*), CWIT ditentukan oleh performa menara pendingin (Badr et al., 2009). Di wilayah tropis, CWIT relatif tinggi dan stabil sepanjang tahun, sehingga memberikan tantangan tersendiri dalam menjaga efisiensi termal pembangkit.

Kenaikan CWIT akan meningkatkan heat rate (kJ/kWh), artinya lebih banyak energi panas dari bahan bakar dibutuhkan untuk menghasilkan listrik dalam jumlah yang sama. Selain itu, CWIT yang tinggi mengurangi *margin operasi* karena menekan daya netto dan meningkatkan fuel cost penalty (EPRI, 2007). Sebaliknya, CWIT yang rendah akan memberikan kondisi operasi yang lebih efisien. Oleh karena itu, CWIT tidak hanya menjadi parameter teknis, tetapi juga indikator ekonomis, karena memengaruhi Biaya Pokok Produksi (BPP) listrik jangka panjang (Boyce, 2012).

Dengan demikian, CWIT dapat dipandang sebagai parameter operasi utama pada PLTU, yang menghubungkan aspek lingkungan, performa termodinamika, dan biaya operasi. Pemantauan CWIT secara real-time serta strategi pengelolaan kondisi pendingin menjadi kunci untuk menjaga efisiensi dan daya saing PLTU, khususnya di daerah pesisir tropis.

CWIT memiliki hubungan erat dengan tekanan kondensor, yang menjadi salah satu parameter kunci dalam siklus Rankine di PLTU. Kondensor berfungsi

mengubah uap buang turbin menjadi air kondensat dengan bantuan air pendingin. Semakin tinggi CWIT, semakin tinggi pula temperatur rata-rata permukaan kondensasi. Karena tekanan uap jenuh berbanding lurus dengan temperatur, maka kenaikan CWIT akan meningkatkan tekanan kondensor (*backpressure*) (Kehlhofer et al., 2009).

Hubungan ini penting karena tekanan kondensor yang lebih tinggi berarti turbin kehilangan sebagian potensi kerja ekspansi. Akibatnya, efisiensi siklus Rankine menurun, daya netto berkurang, dan heat rate meningkat (Moran et al., 2014). Misalnya, studi EPRI (2007) menunjukkan bahwa kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat meningkatkan tekanan kondensor sebesar 0,3–0,5 kPa, tergantung desain kondensor dan kualitas perpindahan panasnya.

Karakteristik hubungan CWIT–tekanan kondensor juga dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas pipa kondensor, luas permukaan perpindahan panas, dan kondisi fouling. Jika terjadi fouling pada pipa kondensor, resistansi termal meningkat sehingga tekanan kondensor akan lebih sensitif terhadap perubahan CWIT (Badr et al., 2009). Oleh karena itu, manajemen CWIT tidak hanya sebatas pemantauan temperatur air pendingin, tetapi juga harus disertai pemeliharaan kondensor agar hubungan antara CWIT dan tekanan kondensor tetap terkendali.

Secara ekonomis, kenaikan tekanan kondensor akibat CWIT yang tinggi menghasilkan *fuel cost penalty*, *opportunity loss daya netto*, dan penurunan margin operasi. Oleh karena itu, pemahaman mengenai hubungan ini menjadi dasar bagi strategi optimasi operasi sistem pendingin dan desain kondensor pada PLTU modern (Boyce, 2012).

Proses kondensasi dalam siklus *Rankine* pada PLTU terjadi di kondensor, di mana uap buang turbin dikondensasikan dengan bantuan air pendingin. Efektivitas proses ini sangat dipengaruhi oleh *Cooling Water Inlet Temperature* (CWIT). Semakin rendah CWIT, semakin besar *driving temperature difference* antara uap buang dan air pendingin, sehingga laju perpindahan panas meningkat dan kondensasi berlangsung lebih efektif (Kehlhofer et al., 2009). Sebaliknya, kenaikan CWIT memperkecil beda temperatur logaritmik rata-rata (LMTD),

menurunkan koefisien perpindahan panas efektif, dan membuat proses kondensasi kurang optimal (Moran et al., 2014).

Kondensor bekerja sebagai *heat exchanger* tipe permukaan, sehingga efektivitas perpindahan panasnya dapat dianalisis menggunakan persamaan:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (2.1)$$

Di mana Q adalah laju perpindahan panas, U adalah koefisien perpindahan panas keseluruhan, A luas permukaan perpindahan panas, dan ΔT_{lm} adalah beda temperatur logaritmik rata-rata antara uap dan air pendingin (Ganapathy, 2011). Ketika CWIT naik, ΔT_{lm} mengecil, sehingga Q berkurang walaupun U dan A tetap. Dampaknya adalah peningkatan tekanan kondensor (*backpressure*) serta menurunnya efisiensi turbin (EPRI, 2007).

Selain faktor CWIT, *fouling* pada pipa kondensor juga memperburuk efektivitas perpindahan panas karena menambah resistansi termal. Pada kondisi *fouled*, efek kenaikan CWIT menjadi lebih parah, karena sistem kehilangan margin transfer panas. Oleh karena itu, pengendalian CWIT harus selalu diikuti dengan pemeliharaan kondensor (Badr et al., 2009).

Secara praktis, pengaruh CWIT terhadap kondensasi dan efektivitas perpindahan panas mencerminkan hubungan langsung antara faktor lingkungan dengan performa termodinamika pembangkit. Dengan demikian, CWIT tidak hanya parameter monitoring, tetapi juga variabel kritis untuk strategi efisiensi energi dan pengendalian biaya bahan bakar.

Net Plant Heat Rate (NPHR) adalah ukuran utama kinerja termal pembangkit, yang menunjukkan jumlah energi panas (kJ) yang diperlukan untuk menghasilkan 1 kWh listrik netto. Semakin rendah NPHR, semakin tinggi efisiensi pembangkit. Nilai ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah Cooling Water Inlet Temperature (CWIT) pada kondensor.

Kenaikan CWIT meningkatkan tekanan kondensor (*backpressure*), sehingga memperkecil entalpi jatuh (*enthalpy drop*) pada turbin uap. Akibatnya, daya bruto yang dihasilkan turbin menurun. Pada saat yang sama, daya bantu

(*auxiliary power*) untuk pompa sirkulasi bisa meningkat jika debit pendingin dinaikkan untuk mengimbangi tingginya CWIT. Kedua faktor tersebut menurunkan daya netto. Karena NPHR dihitung berdasarkan energi panas masuk dibagi energi listrik netto yang dihasilkan, maka penurunan daya netto akibat CWIT tinggi akan menghasilkan kenaikan NPHR (Kehlhofer et al., 2009; Moran et al., 2014).

Dengan kata lain, kenaikan CWIT menuju NPHR maka naik efisiensi termal turun. Studi EPRI (2007) menunjukkan bahwa kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat meningkatkan NPHR sekitar 0,2–0,4%, tergantung desain kondensor dan kondisi fouling. Efek ini semakin signifikan di wilayah tropis di mana CWIT relatif tinggi sepanjang tahun.

Selain itu, dari perspektif efisiensi termal siklus Rankine, hubungan ini dapat dijelaskan melalui persamaan:

$$\eta = (e)/Q \quad (2.2)$$

Di mana η adalah efisiensi termal, W_{net} adalah daya netto, dan Q_{in} adalah energi panas bahan bakar. Karena W_{net} berkurang akibat CWIT tinggi sementara Q_{in} tetap, maka efisiensi η menurun. Dengan demikian, CWIT yang tinggi tidak hanya menurunkan kinerja teknis, tetapi juga meningkatkan fuel cost penalty, BPP listrik, dan menekan margin operasi (Boyce, 2012).

CWIT merupakan salah satu parameter kunci yang menentukan performa termal PLTU. CWIT secara langsung memengaruhi proses kondensasi di kondensor, di mana kenaikan CWIT menyebabkan tekanan kondensor (*backpressure*) meningkat. Peningkatan *backpressure* mengurangi entalpi jatuh (*enthalpy drop*) pada turbin uap, sehingga daya turbin bruto yang dihasilkan berkurang (Kehlhofer et al., 2009; Moran et al., 2014).

Dampaknya terhadap daya netto bahkan lebih besar, karena selain daya turbin yang menurun, daya bantu (*auxiliary power*) untuk pompa sirkulasi air pendingin cenderung naik jika debit pendingin ditingkatkan guna mengkompensasi CWIT tinggi. Dengan demikian, daya netto PLTU menurun lebih signifikan dibanding daya bruto turbin. EPRI (2007) mencatat bahwa

kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat mengurangi output netto pembangkit sekitar 0,3–0,5% tergantung desain kondensor dan kualitas air pendingin.

Jika kondisi ini berlangsung terus-menerus, maka terjadi penurunan kapasitas efektif pembangkit (*derating*). Kapasitas terpasang (*installed capacity*) memang tidak berubah, tetapi kapasitas yang dapat dikirim ke jaringan (*net dependable capacity*) menurun. Penurunan kapasitas ini bukan hanya masalah teknis, tetapi juga berdampak ekonomi karena berkurangnya energi jual dan *opportunity loss* pendapatan listrik (Boyce, 2012; Pérez-Arriaga, 2014).

Secara konsisten, riset internasional menunjukkan bahwa kenaikan CWIT menaikkan tekanan kondensor, menurunkan daya/efisiensi, dan memperburuk heat rate/NPHR. Studi model dan pengukuran pada PLTN dan PLTU melaporkan elastisitas yang searah: Attia (2015) menemukan bahwa setiap +1 °C pada CWIT menurunkan daya sekitar 0,444% dan efisiensi termal 0,152% pada sistem nuklir sekunder; simpulan ini kemudian ditegaskan ulang dalam telaah komprehensif terbaru yang memodelkan perubahan CWIT 10–28 °C dan menunjukkan penurunan daya kumulatif ~91 MW serta penurunan efisiensi ~2,8 poin pada plant skala utilitas (Wang et al., 2023). Temuan serupa muncul pada studi desain PLTN berpendingin air laut: kenaikan temperatur air pendingin ~15 °C diproyeksikan menurunkan efisiensi ~2 poin dan daya ~6% pada unit 1450 MWe (Kim, 2013). Kajian termoeкономи CCGT juga memperlihatkan CWIT yang lebih tinggi (kasus “summer”) meningkatkan biaya produksi per kWh dan menurunkan arus kas tahunan karena daya turun dan NPHR naik (Alus, 2017). Secara mekanistik, hubungan ini dijelaskan oleh bertambahnya tekanan kondensor akibat naiknya temperatur kondensasi; simulasi dan pengujian memperlihatkan kenaikan CWIT mengerek backpressure dan entalpi uap keluar turbin, sehingga enthalpy drop menyusut dan output turun (Putra & Melkias, 2022; Putman, 2000).

Tingkat nasional/Indonesia, studi praktis di lingkungan PLTU dan laboratorium pendidikan teknik menguatkan pola sensitivitas yang sama. Analisis pada kondensor PLTU menunjukkan bahwa variasi temperatur air pendingin masuk berkorelasi dengan kenaikan tekanan kondensor/vakum, penurunan daya turbin, dan penurunan efisiensi siklus dengan implikasi langsung pada derating

kapasitas dan konsumsi bahan bakar (Mahmud, 2015; Talumesang et al., 2022; Polban, 2022). Kajian tugas akhir/riset terapan menambahkan bukti bahwa makin tinggi suhu air pendingin, LMTD menyusut, koefisien perpindahan panas efektif turun, dan beban kalor kondensor meningkat, sehingga efisiensi termal siklus menurun (Bhoi et al., 2015). Studi lapangan di PLTU pesisir juga menekankan pentingnya menjaga debit dan kualitas air pendingin karena penyusutan debit/kenaikan suhu masuk mempercepat hilangnya daya netto dan meningkatkan risiko *trip* unit (Rahmadhani et al., 2022). Secara kuantitatif, beberapa studi terbaru memodelkan sensitivitas efisiensi terhadap CWIT pada beban 240–290 MW dan menunjukkan bahwa +2 °C CWIT menurunkan efisiensi sekitar 0,13–0,46% tergantung beban/konfigurasi (Do Cao & Khac, 2024).

2.4 Tren Kenaikan Suhu Permukaan Laut

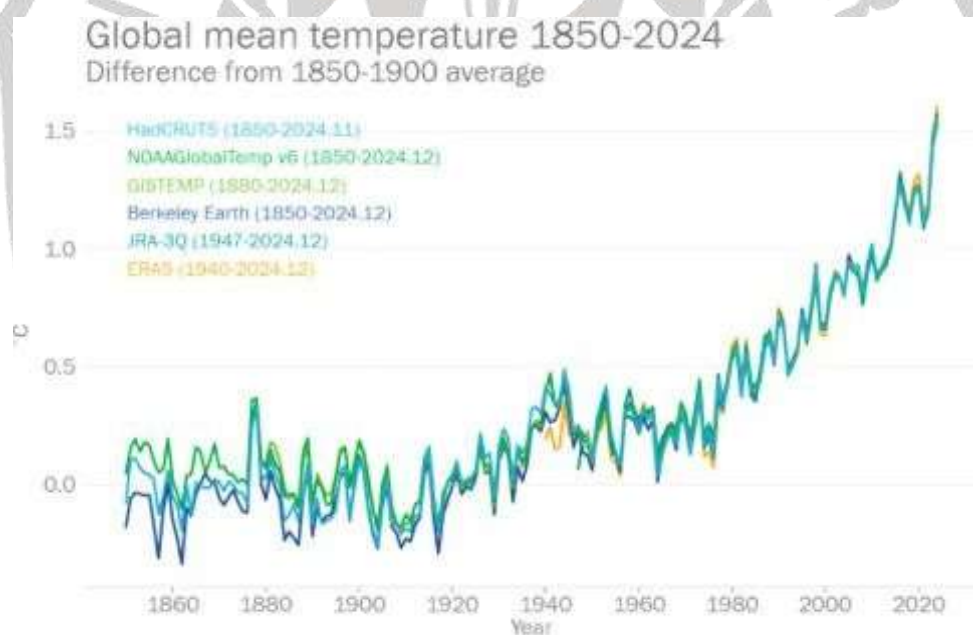
Suhu permukaan laut (SPL) merupakan salah satu faktor yang penting bagi kehidupan organisme di lautan, karena suhu mempengaruhi baik aktivitas metabolisme maupun perkembangbiakan dari organisme-organisme tersebut. SPL juga digunakan sebagai indikasi penentuan kualitas suatu perairan (Anggrayeni et al., 2011). Suhu perairan terutama lapisan permukaan sangat kuat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, namun terdapat pula faktor-faktor meteorologis lain yang dapat berpengaruh terhadap variasi SPL seperti curah hujan, kecepatan angin, penguapan, suhu udara, kelembaban, dan keadaan awan (Farita, 2006).

Suhu permukaan laut merupakan faktor utama penggerak siklus musim, baik di daerah tropis maupun subtropis. Suhu permukaan laut akan mempengaruhi kondisi atmosfer, cuaca, dan musim. Fenomena El Niño dan La Niña dapat dipelajari melalui suhu permukaan laut. Banyak hal yang terkait dengan aplikasi yang dapat dipengaruhi oleh suhu permukaan laut, diantaranya kesuburan perairan serta bidang perikanan (Sukresno, 2006).

Suhu permukaan laut global menunjukkan tren yang semakin tinggi. Sejak tahun 1905, laju kenaikan suhu permukaan laut rata-rata mencapai 0,70 °C/100 tahun. Di wilayah Indonesia, tren kenaikan suhu permukaan laut berkisar antara 0,80 – 1,50°C/100 tahun. Tren tersebut masih sebanding dengan tren kenaikan temperatur global sebesar $0,78 \pm 0,18^\circ\text{C}$ (IPCC, 2007). Perubahan iklim global

telah menjadi salah satu isu lingkungan paling kritis saat ini, yang berdampak signifikan terhadap kondisi atmosfer, pola cuaca, dan ekosistem laut di seluruh dunia. Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan wilayah laut yang luas, sangat rentan terhadap perubahan suhu laut (Sea Surface Temperature/SST). Kenaikan suhu laut tidak hanya memengaruhi produktivitas perikanan dan ekosistem terumbu karang, tetapi juga berdampak pada pola curah hujan, intensitas badai tropis, dan risiko bencana pesisir.

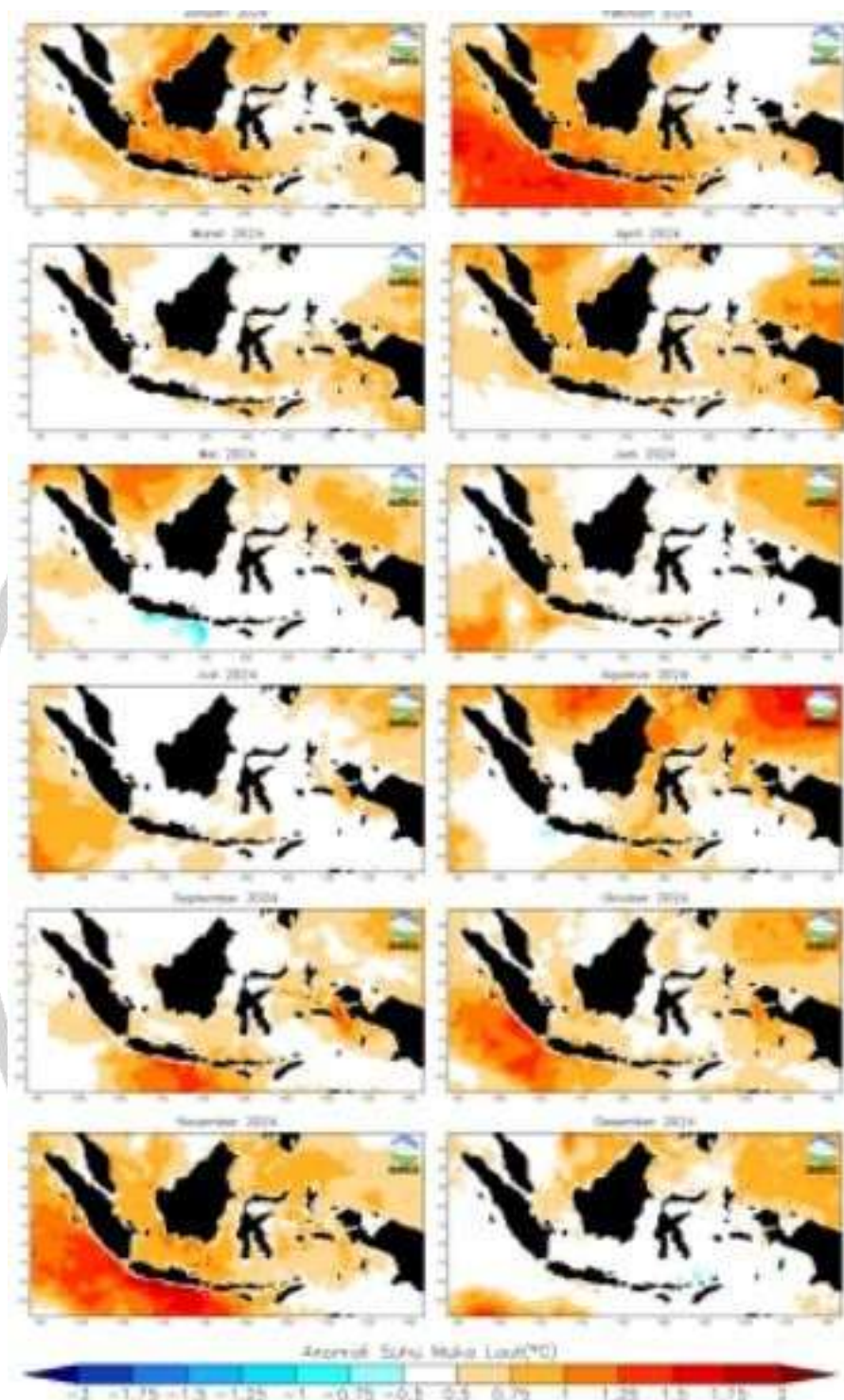
Data klimatologi BMKG periode 1901–2015 menunjukkan adanya tren pemanasan laut di Indonesia. Rata-rata suhu permukaan laut meningkat sebesar 0,414°C dari nilai rata-rata 28,49°C, dengan tren kenaikan signifikan pada periode 2006–2015. Selain itu, kandungan panas laut meningkat sebesar $2,48 \times 10^{17}$ J. Variasi tren tersebut juga dipengaruhi oleh fenomena Pacific Decadal Oscillation (PDO), yang berperan terhadap perubahan kandungan panas laut di perairan Indonesia. Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 merupakan ilustrasi anomali kenaikan suhu air laut.



Gambar 1.1. Anomali suhu rata-rata global dari tahun 1850–2024
(Sumber: WMO 2024)

Gambar 2.6 Anomali Suhu Rata-Rata Global dari tahun 1850-2024

(Sumber: WMO 2024)



Gambar 2.7 Anomali Suhu Muka Laut di Perairan Indonesia pada Tahun 2024 (Sumber data: MGD SST - JMA)

Selain data nasional dari BMKG, informasi global mengenai tren pemanasan laut juga dapat diperoleh dari Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). IPCC merupakan lembaga internasional yang menyajikan laporan ilmiah komprehensif mengenai perubahan iklim, termasuk kondisi atmosfer, lautan, dan sistem iklim global. Laporan IPCC menjadi rujukan penting bagi pemerintah, ilmuwan, dan pembuat kebijakan dalam memahami dampak pemanasan global di berbagai wilayah, termasuk perairan tropis seperti Indonesia.

Data dan analisis dari IPCC menunjukkan bahwa suhu permukaan laut di wilayah tropis, termasuk kawasan perairan Indonesia, telah mengalami pemanasan lebih cepat dibandingkan dengan rata-rata global sejak pertengahan abad ke-20. Tren ini dipengaruhi oleh faktor-faktor kompleks seperti sirkulasi atmosfer-laut, perubahan aliran Indonesian *Throughflow* (ITF), dan variabilitas iklim seperti El Niño dan La Niña. Informasi dari IPCC penting untuk memperluas perspektif lokal, sehingga temuan BMKG dapat ditempatkan dalam konteks global, membantu memahami implikasi jangka panjang pemanasan laut terhadap ekosistem, cuaca ekstrem, dan kehidupan masyarakat pesisir.

Berikut ini akan disajikan temuan dan data dari IPCC terkait tren kenaikan suhu laut secara global dan relevansinya bagi perairan Indonesia. Periode pengamatan yang dicatat oleh IPCC dimulai sejak tahun 1950 hingga saat ini. Temuan utama menunjukkan bahwa suhu permukaan laut tropis, termasuk perairan Indonesia, telah mengalami pemanasan lebih cepat dibandingkan dengan wilayah lain sejak pertengahan abad ke-20. Temuan utama, menghasilkan jabaran data sebagai berikut:

- a. Suhu permukaan laut tropis, termasuk perairan Indonesia, telah mengalami pemanasan lebih cepat dibandingkan dengan wilayah lain sejak tahun 1950.
- b. Pemanasan ini dipengaruhi oleh kombinasi faktor, termasuk coupling atmosfer-laut lokal, Indonesian *Throughflow* (ITF), dan tren dalam sirkulasi Walker.
- c. Peningkatan ITF telah dikaitkan dengan tren pendinginan di Pasifik dan pemanasan di Samudra Hindia (IPCC, "Chapter 9: Ocean, Cryosphere and

Sea Level Change," dalam *Climate Change, 2021): The Physical Science Basis*, 2021.

Variasi spasial dan musiman suhu permukaan laut (SST) di perairan pesisir Indonesia merupakan aspek penting yang dipengaruhi oleh sejumlah faktor, termasuk fenomena iklim global seperti El Niño dan Indian Ocean Dipole (IOD). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa SST di perairan Indonesia bervariasi secara signifikan tergantung pada musim dan kondisi atmosferik. Misalnya, Ariska et al. melaporkan bahwa selama musim hujan (Desember-Januari-Februari), SST cenderung lebih tinggi dibandingkan musim lainnya, berkontribusi pada peningkatan evaporasi yang dapat memicu pembentukan awan dan hujan (Ariska et al., 2022). Hal ini sejalan dengan temuan Saputra, yang menunjukkan bahwa variasi SST tidak merata di seluruh wilayah pesisir, dengan SST tertinggi biasanya terjadi di musim transisi antara Maret dan Mei, yang bertepatan dengan peningkatan aktivitas biologis di akuarium laut (Saputra, 2020).

Penelitian oleh Fadlan et al. juga menggarisbawahi pentingnya variasi SST di Samudera Hindia yang dapat memengaruhi pola cuaca dan iklim di Indonesia, mengingat pengaruh dari IOD dalam perubahan SST musiman (Fadlan et al., 2021). Secara lebih spesifik, variabilitas suhu di Indonesia juga dipengaruhi oleh struktur morfologi serta koneksi dengan pola iklim global. El Niño, misalnya, dapat menyebabkan fluktuasi SST yang signifikan di perairan Indonesia, yang selanjutnya berdampak pada pola curah hujan dan distribusi ekosistem laut (As-syakur, 2015). North dan rekan-rekannya menambahkan bahwa perubahan dalam komponen suhu musiman serta harmonik tahunannya memiliki pengaruh penting dalam memicu berbagai proses ekologis dan pertanian yang berkaitan dengan kesesuaian kondisi suhu (North et al., 2020).

Sebagai kesimpulan, variasi spasial dan musiman SST di perairan pesisir Indonesia adalah fenomena yang kompleks, berkaitan erat dengan faktor atmosfer dan kondisi ekuinoks. Penelitian yang berkelanjutan dan pemantauan secara real-time menjadi sangat penting untuk memahami lebih dalam tentang dampak variasi ini terhadap ekosistem pesisir dan perubahan iklim global.

Fenomena iklim, khususnya El Niño dan pemanasan global, memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja dan keberlanjutan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di kawasan pesisir Indonesia. El Niño diakui sebagai faktor yang dapat mengubah pola cuaca dan mempengaruhi suhu permukaan laut. Selama fase El Niño, terjadi peningkatan suhu permukaan laut yang dapat memperburuk efisiensi operasional PLTU yang bergantung pada sistem pendinginan (Putri & Sahara, 2021). Penelitian oleh Suhendra et al. menunjukkan bahwa peningkatan suhu air laut dapat mengurangi efisiensi pada sistem pendinginan PLTU, yang mengakibatkan penurunan output daya listrik yang dihasilkan (Jufrizen et al., 2020).

Lebih lanjut, pemanasan global, sebagai dampak dari aktivitas manusia, telah menyebabkan lapisan atmosfer semakin hangat, yang berdampak langsung pada ekosistem pesisir dan kualitas sumber daya air. Meningkatnya suhu menciptakan tantangan bagi industri pembangkit listrik, terutama dalam hal memadai pasokan air untuk proses pendinginan. Dalam konteks ini, Ashari dan kawan-kawan mencatat bahwa peningkatan suhu dapat memperparah kondisi lingkungan di sekitar kawasan PLTU, seperti mencemari ekosistem perairan, yang dapat berdampak pada kualitas hasil tangkapan ikan dan kesehatan ekosistem laut secara keseluruhan (Yuliantoro, 2019).

Kondisi-kondisi iklim ekstrim yang dipicu oleh fenomena seperti El Niño juga berpotensi menyebabkan kerusakan dan gangguan pada infrastruktur PLTU. Dalam kajian oleh Jufrizen et al., dijelaskan bahwa pembangkit listrik yang beroperasi di daerah pesisir rentan terhadap perubahan arus laut dan peningkatan gelombang, yang dapat merusak fasilitas pemeliharaan dan operasi (Nugraha & Heliyani, 2022). Hal ini membutuhkan peningkatan biaya untuk perbaikan dan dapat menyebabkan jeda produksi yang signifikan, mempengaruhi pasokan listrik bagi komunitas lokal dan industri.

Di sisi lain, adaptasi PLTU terhadap perubahan iklim juga menjadi fokus penting untuk meningkatkan keberlanjutan operasional. Inovasi dalam teknologi pendinginan yang lebih efisien dan ramah lingkungan menjadi solusi yang menarik, seperti penerapan sistem pemanfaatan energi terbarukan dan teknologi

penghematan energi. Melalui peningkatan efisiensi operasional dan investasi dalam teknologi hijau, PLTU dapat mengurangi dampak negatif dari fenomena iklim ekstrem seperti El Niño dan pemanasan global, seperti diuraikan dalam penelitian oleh Hardanti dan Riyono tentang pentingnya inovasi dalam manajemen sumber daya energi (Hardanti & Riyono, 2022).

Kesimpulannya, fenomena iklim seperti El Niño dan pemanasan global memiliki pengaruh yang kompleks terhadap operasional PLTU di pesisir Indonesia. Penanganan yang terencana dan berbasis data yang tidak hanya fokus pada efisiensi energi tetapi juga pada pengelolaan lingkungan dapat membantu meningkatkan ketahanan PLTU terhadap perubahan iklim yang terus berlanjut.

Kenaikan suhu laut sebagai dampak dari perubahan iklim global, terutama pemanasan global dan fenomena El Niño, memiliki implikasi jangka panjang yang signifikan terhadap performa sistem pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Penelitian menunjukkan bahwa panas berlebih yang berasal dari suhu laut yang meningkat dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem pendingin yang menggunakan air sebagai media pendingin (Loew et al., 2020)(Quijano et al., 2015; . Dalam konteks ini, kinerja PLTU sangat tergantung pada suhu air yang tersedia untuk proses pendinginan; jika suhu air pendingin terlalu tinggi, efisiensinya dapat menurun drastis, mempengaruhi output energi dan mengakibatkan sejumlah masalah operasional (Wang et al., 2019).

Sistem pendinginan yang umum digunakan oleh PLTU, terutama sistem pendingin "once-through," sangat rentan terhadap perubahan suhu dan ketersediaan air. Henry dan Pratson menekankan bahwa peningkatan suhu pada intake air dapat menyebabkan turunnya efisiensi termal karena batasan suhu maksimum yang harus dipatuhi (Henry & Pratson, 2016). Selain itu, Loew et al. menunjukkan bahwa jika sistem pendingin tidak dirancang dengan baik untuk menampung perubahan iklim, maka kapasitas dan efisiensi PLTU dapat terancam di lokasi tertentu (Loew et al., 2020).

Penelitian oleh Quijano et al. menunjukkan bahwa peningkatan suhu air tidak hanya mempengaruhi fungsi pendinginan, tetapi juga dapat menyebabkan dampak eksternal, seperti pembentukan ganggang berbahaya yang dapat

menyumbat sistem pendinginan dan meningkatkan risiko masalah ekologis di sekitar sumber air yang digunakan (Quijano et al., 2015; Wang et al., 2022). Hal ini semakin memperburuk situasi bagi PLTU yang berada di wilayah pesisir, di mana dampak perubahan iklim seringkali lebih terasa.

Lebih jauh lagi, berdasarkan studi oleh Madden et al., pemanasan yang berkelanjutan dapat mendorong PLTU untuk beroperasi jauh di bawah kapasitas optimalnya, berpotensi menyebabkan pemadaman dan mengganggu pasokan listrik yang dibutuhkan untuk berbagai sektor (Madden et al., 2013). Peningkatan frekuensi dan intensitas peristiwa cuaca ekstrem akibat perubahan iklim juga dapat menyebabkan gangguan operasional, meningkatkan ketidakpastian dalam perencanaan operasional jangka panjang Vliet et al., 2013).

Untuk mengatasi tantangan ini, PLTU perlu melakukan adaptasi terhadap sistem pendingin mereka dengan mempertimbangkan perubahan iklim. Peralihan dari sistem pendingin "once-through" ke sistem "recirculating" telah direkomendasikan sebagai langkah untuk meningkatkan ketahanan terhadap perubahan iklim dan menjaga efisiensi operasional (Quijano et al., 2015; Vliet et al., 2013). Beradaptasi dengan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan adalah kunci untuk kelangsungan hidup PLTU dalam menghadapi tantangan suhu laut yang terus meningkat di masa depan.

Secara keseluruhan, implikasi jangka panjang kenaikan suhu laut terhadap performa sistem pendingin PLTU mencerminkan kebutuhan mendesak untuk merencanakan dan mengimplementasikan strategi adaptasi yang efektif. Hal ini penting tidak hanya untuk menjaga produksi energi, tetapi juga untuk melindungi ekosistem lokal dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

2.5 Dampak Ekonomi Perubahan (CWIT) terhadap Operasi PLTU

Dalam pembangkitan tenaga listrik berbasis termal, *heat rate* merupakan parameter utama yang menunjukkan efisiensi konversi energi dari bahan bakar menjadi energi listrik. *Heat rate* didefinisikan sebagai jumlah energi panas yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu satuan energi listrik, biasanya dinyatakan dalam satuan Btu/kWh atau kJ/kWh (Kothari et al., 2011). Semakin rendah nilai

heat rate, maka semakin efisien pembangkit dalam memanfaatkan energi bahan bakar.

Kenaikan heat rate menunjukkan penurunan efisiensi pembangkit, yang berimplikasi langsung pada meningkatnya konsumsi bahan bakar per kWh listrik yang dihasilkan. Kondisi ini menimbulkan fenomena yang dikenal sebagai *fuel cost penalty*, yaitu tambahan biaya bahan bakar yang harus ditanggung akibat meningkatnya heat rate (Boyce, 2012). Secara sederhana, jika heat rate meningkat, maka konsumsi bahan bakar per unit energi listrik bertambah, sehingga biaya operasional juga meningkat.

Beberapa faktor dapat menyebabkan kenaikan heat rate, antara lain degradasi peralatan turbin, penurunan kinerja boiler, fouling pada heat exchanger, serta operasi pembangkit di luar titik beban optimal (Kehlhofer et al., 2009). Dalam jangka panjang, fuel cost penalty menjadi signifikan karena biaya bahan bakar umumnya merupakan komponen terbesar dalam struktur biaya operasi pembangkit listrik berbasis batubara maupun gas (Pérez-Arriaga, 2014).

Dengan demikian, pemahaman mengenai hubungan antara heat rate dan fuel cost penalty sangat penting dalam perencanaan operasi, pemeliharaan, dan kebijakan efisiensi energi pada sistem pembangkitan listrik. Upaya menekan kenaikan heat rate melalui pemeliharaan preventif, modernisasi peralatan, dan pengoperasian optimal dapat secara langsung menurunkan fuel cost penalty serta meningkatkan keekonomian sistem tenaga listrik.

Kenaikan *Cooling Water Inlet Temperature* (CWIT) meningkatkan tekanan kondensasi (*backpressure*) pada kondensor, menurunkan rasio ekspansi turbin uap dan efisiensi siklus Rankine. Secara termodinamika, kondisi ini meningkatkan heat rate pembangkit (kJ/kWh), sehingga kebutuhan panas per kWh bertambah dan pada akhirnya mendorong konsumsi batubara lebih tinggi untuk menghasilkan energi netto yang sama (Kehlhofer et al., 2009; Moran et al., 2014). Pendekatan perhitungan yang umum digunakan menerjemahkan perubahan CWIT menjadi kenaikan heat rate (ΔHR) melalui kurva performa pabrik/hasil uji atau analisis keseimbangan energi–eksergi; selanjutnya, tambahan konsumsi batubara dihitung dari tambahan panas masuk yang dibutuhkan dibandingkan nilai kalor

batubara dan efisiensi pembakaran/kualitas perpindahan panas di boiler (Babcock & Wilcox, 2011; ASME, 2010). Untuk produksi listrik netto E (kWh) selama suatu periode, tambahan massa batubara dapat diperkirakan dengan hubungan sederhana:

$$\Delta(o) = (\Delta R \times) / ((oer) \times (o)) \quad (2.3)$$

Di mana ΔHR adalah kenaikan heat rate (kJ/kWh), η_{boiler} adalah efisiensi pembangkitan panas efektif dari sistem pembakaran-boiler (termasuk rugi-rugi), dan LHV_{coal} adalah nilai kalor rendah batubara (kJ/kg). Dalam praktiknya, ΔHR diperoleh dari *heat balance* desain atau *test corrections* yang memetakan pengaruh CWIT terhadap tekanan kondensor dan daya/efisiensi turbin; koreksi ini selaras dengan prinsip pengujian kinerja kondensor dan turbin yang diatur dalam standar performa (ASME, 2010; Kehlhofer et al., 2009). Karena biaya bahan bakar merupakan komponen dominan OPEX, konversi Amcoal menjadi biaya tambahan dilakukan dengan mengalikan massa batubara tambahan dengan harga batubara, setelah mempertimbangkan kadar air/abu serta variabilitas LHV aktual (Babcock & Wilcox, 2011). Dengan demikian, rantai hubungan CWIT, backpressure, efisiensi siklus, heat rate, konsumsi batubara memberikan dasar kuantitatif bagi evaluasi *fuel penalty* dan justifikasi tindakan mitigasi seperti peningkatan kinerja kondensor, optimasi aliran air pendingin, atau strategi operasi saat suhu air lingkungan tinggi (Kehlhofer et al., 2009; Moran et al., 2014).

CWIT adalah suhu air pendingin yang masuk ke kondensor pada sistem pembangkitan listrik berbasis turbin uap. CWIT memiliki peran penting karena memengaruhi efisiensi kondensasi uap dan pada akhirnya menentukan tekanan backpressure turbin. Semakin tinggi CWIT, maka tekanan kondensasi meningkat sehingga efisiensi siklus Rankine menurun. Dampaknya, daya netto yang dihasilkan pembangkit mengalami penurunan (Kehlhofer et al., 2009).

Perubahan daya netto akibat kenaikan CWIT sering disebut sebagai *opportunity loss*, yaitu kehilangan potensi produksi listrik karena faktor termodinamika yang mengurangi kapasitas output. Secara ekonomis, penurunan daya netto berarti menurunnya jumlah energi listrik yang dapat dijual ke sistem

atau pasar. Hal ini menimbulkan kerugian finansial berupa penurunan pendapatan listrik (*revenue loss*), terutama pada kondisi harga energi listrik yang tinggi (EPRI, 2007).

Menurut Boyce (2012), setiap kenaikan CWIT sebesar 1 °C dapat menyebabkan penurunan output turbin sekitar 0,2–0,5% tergantung pada desain pembangkit dan sistem pendingin yang digunakan. Dengan demikian, pada sistem dengan harga bahan bakar dan listrik yang fluktuatif, variasi CWIT dapat menjadi faktor kritis dalam menentukan profitabilitas operasi. Studi lain oleh Badr et al. (2009) juga menekankan bahwa pembangkit dengan pendinginan berbasis air permukaan sangat rentan terhadap fluktuasi suhu musiman, yang berimplikasi pada stabilitas daya dan pendapatan.

Oleh karena itu, monitoring CWIT serta optimasi sistem pendingin menjadi strategi penting untuk meminimalkan opportunity loss daya netto dan kerugian pendapatan. Beberapa langkah mitigasi yang direkomendasikan meliputi penggunaan sistem pendingin hybrid, perbaikan desain kondensor, serta integrasi teknologi prediksi suhu air pendingin berbasis data lingkungan (Ganapathy, 2011). Dengan langkah-langkah tersebut, dampak negatif kenaikan CWIT terhadap kinerja teknis maupun finansial pembangkit dapat ditekan.

Dalam konteks PLTU (pembangkit listrik tenaga uap) berbahan bakar batubara, Biaya Pokok Produksi (BPP) yang secara konsep sepadan dengan *unit cost of generation* atau komponen biaya dalam *levelized cost of electricity (LCOE)* ditentukan oleh penjumlahan biaya bahan bakar, operasi–pemeliharaan (O&M) tetap dan variabel, serta porsi pemulihan modal per kWh yang dipengaruhi faktor kapasitas (*capacity factor*) dan kinerja termal (IEA & NEA, 2020; Pérez-Arriaga, 2014). Peningkatan *heat rate* (efisiensi turun) dan/atau kenaikan auxiliary power (beban bantu) langsung menaikkan fuel cost per kWh sehingga mendorong BPP naik; besarnya mengikuti $\text{Fuel cost} \approx \text{HR} \times \text{Harga BB} / \eta_{\text{boiler}}$, sehingga setiap degradasi heat rate menghasilkan *fuel cost penalty* yang bersifat linier terhadap harga batubara (Babcock & Wilcox, 2011; Kehlhofer et al., 2009). Selain itu, kondisi operasi yang menurunkan daya netto—misalnya CWIT tinggi yang menaikkan backpressure kondensor—akan menekan energi jual (kWh) pada

periode tertentu, menurunkan faktor kapasitas efektif, lalu menyebarkan biaya tetap (FOM dan komponen pemulihan modal) ke kWh yang lebih sedikit; efek ini meningkatkan BPP total walau biaya tetap nominal tidak berubah (ASME, 2010; IEA & NEA, 2020).

Dari sisi margin operasi, yang secara sederhana dapat dipandang sebagai selisih antara pendapatan energi (tarif atau harga pasar kali kWh terjual) dan biaya variabel (terutama bahan bakar + VOM), kenaikan BPP, terutama komponen bahan bakar akibat *heat-rate penalty* akan memperkecil spark/dark spread setara batubara, bahkan dapat membuat operasi berada di bawah *break-even* ketika harga listrik rendah (EPRI, 2007; Stoft, 2002). Pada rezim kontraktual/regulated, margin juga sensitif terhadap ketidaksesuaian antara formula penyesuaian tarif/kompensasi dengan dinamika biaya aktual (mis. volatilitas harga batubara, kualitas/LHV, dan derating musiman). Strategi pengendalian BPP dan perlindungan margin karenanya bertumpu pada: menjaga efisiensi *heat balance* (perbaikan kondensor, pengurangan fouling, optimasi sootblowing), pembatasan konsumsi *auxiliaries*, peningkatan reliabilitas untuk menjaga faktor kapasitas, serta *hedging* harga batubara dan pengaturan *dispatch* saat periode harga/kebutuhan sistem tinggi (Kehlhofer et al., 2009; Pérez-Arriaga, 2014).

PLTU berpendingin air laut di wilayah tropis menghadapi tantangan unik akibat tingginya temperatur air laut dan variabilitas musiman yang relatif kecil dibandingkan wilayah subtropis. Air laut yang hangat menyebabkan CWIT berada pada level yang tinggi sepanjang tahun, sehingga tekanan kondensor meningkat, efisiensi siklus Rankine menurun, dan heat rate jangka panjang cenderung lebih buruk dibanding pembangkit di daerah dengan air pendingin lebih dingin (Kehlhofer et al., 2009). Kondisi ini menyebabkan konsumsi batubara yang lebih tinggi per kWh listrik yang dihasilkan, sehingga meningkatkan biaya bahan bakar secara kumulatif dalam horizon waktu puluhan tahun operasi (Moran et al., 2014).

Implikasi ekonominya signifikan. Pertama, Biaya Pokok Produksi (BPP) listrik meningkat karena komponen bahan bakar mendominasi struktur biaya PLTU. Peningkatan BPP jangka panjang dapat mengurangi daya saing PLTU dibandingkan pembangkit berbasis gas atau energi terbarukan, terutama di pasar

dengan kompetisi harga listrik (IEA & NEA, 2020). Kedua, margin operasi menyusut karena tambahan fuel cost penalty tidak selalu dapat dikompensasi oleh penyesuaian tarif listrik, khususnya dalam rezim tarif regulasi. Hal ini menempatkan operator PLTU pada risiko kerugian finansial jika harga batubara atau harga karbon meningkat (EPRI, 2007; Pérez-Arriaga, 2014).

Selain itu, pemanfaatan air laut sebagai media pendingin menimbulkan tantangan eksternalitas lingkungan jangka panjang. Pembuangan air dengan temperatur lebih tinggi (*thermal discharge*) berpotensi menimbulkan dampak ekologis pada ekosistem pesisir tropis yang sensitif. Hal ini dapat memicu regulasi lingkungan yang lebih ketat dan menambah biaya investasi untuk sistem mitigasi seperti pendingin hybrid, *outfall diffuser*, atau bahkan retrofit dengan teknologi *dry cooling* yang jauh lebih mahal (Badr et al., 2009).

Secara keseluruhan, implikasi ekonomi jangka panjang bagi PLTU berpendingin air laut di wilayah tropis meliputi: kenaikan BPP struktural, penurunan margin operasi, meningkatnya ketergantungan pada harga batubara, dan potensi biaya tambahan akibat regulasi lingkungan. Dengan tren global menuju dekarbonisasi dan peningkatan penetrasi energi terbarukan, keberlanjutan ekonomis PLTU di wilayah tropis menjadi semakin tertekan. Oleh karena itu, strategi adaptasi yang penting mencakup peningkatan efisiensi termal, diversifikasi portofolio energi, serta penerapan teknologi pendingin yang lebih efisien dan ramah lingkungan (IEA & NEA, 2020; Ganapathy, 2011).

2.6 Pendekatan Teknis untuk Mitigasi Dampak Kenaikan CWIT

Salah satu strategi untuk mengurangi dampak kenaikan CWIT pada kinerja PLTU adalah dengan meningkatkan debit air pendingin yang dialirkan ke kondensor. Peningkatan debit air pendingin menurunkan ΔT antara uap buang turbin dan air pendingin, sehingga temperatur saturasi di kondensor menurun dan backpressure turbin dapat dijaga pada level lebih rendah. Hal ini berdampak positif terhadap efisiensi siklus Rankine dan menurunkan *heat rate penalty* akibat kondisi CWIT yang tinggi (Kehlhofer et al., 2009; ASME, 2010).

Namun demikian, peningkatan debit air pendingin membawa konsekuensi pada kenaikan beban daya bantu (*auxiliary power*), khususnya pompa sirkulasi.

Semakin besar debit yang dipompakan, semakin besar daya yang diperlukan untuk mengatasi losses hidraulis di sistem pipa dan kondensor. Boyce (2012) menekankan bahwa peningkatan kecepatan alir pendingin menghasilkan hubungan kuadratis dengan daya pompa ($P \sim Q^2$), sehingga strategi ini harus dievaluasi dari sisi *trade-off* antara penurunan *backpressure* (daya netto naik) dan tambahan konsumsi daya bantu (daya netto turun).

Dalam jangka panjang, peningkatan debit air pendingin dapat meningkatkan O&M cost, karena pompa beroperasi pada titik beban yang lebih tinggi, yang mempercepat keausan impeller dan meningkatkan frekuensi perawatan (Ganapathy, 2011). Selain itu, dari sisi desain, kapasitas hidraulis kanal masuk (intake) dan sistem penyaringan air laut menjadi faktor pembatas yang tidak selalu memungkinkan debit dinaikkan tanpa investasi tambahan (Badr et al., 2009). Oleh karena itu, strategi ini harus dilihat sebagai solusi teknis yang efektif namun bersyarat, bergantung pada keseimbangan antara keuntungan netto daya yang dihasilkan dan biaya tambahan akibat auxiliary power serta O&M.

Kondensor merupakan komponen penting dalam siklus Rankine pada PLTU, karena berfungsi mengkondensasikan uap buang dari turbin dan menjaga tekanan *backpressure* tetap rendah. Efisiensi termal siklus sangat bergantung pada performa perpindahan panas di kondensor. Salah satu masalah utama yang sering terjadi adalah fouling atau pengotoran permukaan pipa kondensor akibat endapan mineral, lumpur, biofouling (ganggang, kerang), maupun korosi (Kehlhofer et al., 2009). Fouling meningkatkan resistansi termal, memperbesar *temperature approach*, dan akhirnya meningkatkan tekanan kondensasi, sehingga menurunkan efisiensi turbin serta menaikkan *heat rate* (EPRI, 2007).

Untuk menjaga efisiensi termal, dilakukan pembersihan kondensor secara berkala baik dengan metode mekanis (pigging, brushing, *hydro jetting*) maupun kimia (descaling). Selain pembersihan periodik, teknologi online cleaning system seperti *condensor tube cleaning balls* yang beredar terus-menerus dengan aliran air pendingin dapat digunakan untuk mencegah terbentuknya fouling yang signifikan (Ganapathy, 2011). Pengelolaan biofouling juga dapat melibatkan

injeksi klorin dosis rendah atau teknik alternatif ramah lingkungan, misalnya ozonasi atau sistem ultraviolet (Badr et al., 2009).

Secara ekonomi, pembersihan dan pengelolaan fouling dapat mengurangi fuel cost penalty akibat kenaikan heat rate, serta memperbaiki daya netto yang hilang karena backpressure tinggi. Studi EPRI (2007) menunjukkan bahwa kerugian biaya bahan bakar akibat fouling kondensor yang tidak dikelola dapat mencapai jutaan dolar per tahun pada unit berkapasitas besar. Oleh karena itu, manajemen fouling bukan hanya persoalan teknis, tetapi juga strategi pengendalian biaya operasi jangka panjang.

Sistem pendingin terbuka (*Open Cooling Water System* / OCWS) banyak digunakan pada PLTU berlokasi di pesisir karena memanfaatkan air laut dalam jumlah besar sebagai media pendingin kondensor. Kelebihan utama sistem ini adalah biaya investasi awal yang relatif lebih rendah dibanding sistem pendingin tertutup, karena tidak memerlukan menara pendingin besar. Namun, OCWS memiliki tantangan utama berupa fluktuasi temperatur air laut (CWIT) dan masalah fouling akibat organisme laut, endapan, maupun korosi (Badr et al., 2009).

Optimalisasi operasi OCWS bertujuan menurunkan *fuel cost penalty* akibat kenaikan backpressure kondensor dan daya bantu pompa sirkulasi. Strategi optimalisasi mencakup:

1. Pengaturan debit pompa sirkulasi dengan pendekatan *variable frequency drive (VFD)* agar debit pendingin disesuaikan dengan kondisi termal aktual. Dengan cara ini, sistem dapat menjaga efisiensi perpindahan panas sekaligus meminimalkan konsumsi daya bantu (Ganapathy, 2011).
2. Monitoring online CWIT dan backpressure dengan sistem kontrol prediktif berbasis data lingkungan, sehingga operator dapat mengantisipasi fluktuasi musiman suhu air laut tropis (Kehlhofer et al., 2009).
3. Pengendalian fouling melalui injeksi kimia, *online condenser cleaning*, dan manajemen biofouling untuk menjaga transfer panas optimal (EPRI, 2007).

4. Optimasi intake design termasuk pemanfaatan air laut lebih dalam atau modifikasi jalur pengambilan, agar temperatur masuk lebih rendah dan kualitas air pendingin lebih stabil (Boyce, 2012).

Secara ekonomi, optimalisasi OCWS meningkatkan efisiensi termal PLTU, menurunkan heat rate, dan menjaga daya netto tetap tinggi. Dengan demikian, biaya bahan bakar per kWh berkurang, BPP listrik dapat ditekan, dan margin operasi meningkat. Dalam jangka panjang, strategi ini juga membantu keberlanjutan operasi PLTU di wilayah tropis yang memiliki CWIT tinggi sepanjang tahun.

PLTU berpendingin air laut sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan laut, seperti fluktuasi temperatur, salinitas, sedimentasi, dan biofouling. Di wilayah tropis, temperatur air laut yang relatif tinggi sepanjang tahun menekan performa kondensor dengan meningkatkan backpressure turbin, sedangkan biofouling dan korosi dapat mempercepat degradasi peralatan (Badr et al., 2009). Oleh karena itu, diperlukan strategi adaptasi baik pada tahap desain maupun dalam kontrol operasional pembangkit.

Dari sisi desain, adaptasi dapat berupa oversizing kondensor agar tersedia margin transfer panas lebih besar ketika CWIT meningkat, atau penerapan material tahan korosi seperti paduan tembaga–nikel dan titanium untuk pipa kondensor (Kehlhofer et al., 2009). Selain itu, desain intake air laut juga perlu mempertimbangkan lokasi dan kedalaman pengambilan agar terhindar dari fluktuasi suhu permukaan yang ekstrem, serta dilengkapi sistem *screening* untuk mengurangi debris dan organisme laut (Ganapathy, 2011).

Sementara itu, dari sisi operasional, adaptasi melibatkan kontrol dinamis debit pompa sirkulasi dengan teknologi *variable frequency drive (VFD)*, sehingga laju alir air pendingin dapat dioptimalkan sesuai kondisi termal dan konsumsi daya bantu (Boyce, 2012). Sistem online monitoring terhadap CWIT, salinitas, dan tekanan kondensor sangat penting untuk memberikan data real-time, yang memungkinkan operator melakukan penyesuaian cepat terhadap perubahan lingkungan (EPRI, 2007). Selain itu, penerapan biofouling management berbasis

injeksi kimia ramah lingkungan, ozonasi, atau UV treatment juga menjadi bagian integral dari strategi kontrol jangka panjang (Badr et al., 2009).

Secara ekonomi, adaptasi desain dan kontrol operasional memungkinkan pembangkit mempertahankan efisiensi termal, mengurangi *fuel cost penalty*, serta memperpanjang umur teknis peralatan. Hal ini penting untuk menjaga keberlanjutan operasi PLTU di tengah kondisi laut tropis yang dinamis dan kecenderungan regulasi lingkungan yang semakin ketat.

PLTU modern menghadapi tantangan efisiensi akibat faktor lingkungan seperti kenaikan CWIT, fouling kondensor, konsumsi daya bantu, dan regulasi lingkungan. Oleh karena itu, berbagai strategi mitigasi telah diterapkan di sejumlah unit pembangkit untuk menjaga efisiensi termal sekaligus menekan biaya operasi jangka panjang.

Salah satu contoh adalah penerapan online condenser tube cleaning system di PLTU berbasis batubara di Jerman dan Jepang, yang menggunakan bola karet (*sponge rubber balls*) untuk membersihkan pipa kondensor secara kontinu selama operasi. Teknologi ini terbukti mampu menjaga *heat transfer coefficient* kondensor tetap tinggi dan menurunkan *fuel cost penalty* hingga 2–3% (Kehlhofer et al., 2009).

Di Asia Tenggara, beberapa PLTU modern dengan sistem pendingin air laut telah mengadopsi material pipa kondensor berbasis titanium untuk meningkatkan ketahanan terhadap korosi dan biofouling. Hal ini secara signifikan memperpanjang umur teknis komponen sekaligus mengurangi biaya O&M yang terkait dengan penggantian pipa akibat korosi (Ganapathy, 2011).

Strategi lain adalah penggunaan Variable Frequency Drive (VFD) pada pompa sirkulasi air pendingin di PLTU India, yang memungkinkan pengaturan debit pendingin sesuai kebutuhan aktual. Teknologi ini mampu menekan konsumsi daya bantu pompa hingga 15–20% tanpa menurunkan performa pendinginan (Boyce, 2012).

Selain itu, di beberapa PLTU pesisir di Amerika Serikat, diterapkan pengolahan biofouling ramah lingkungan dengan ozonasi atau sistem sinar ultraviolet (UV) sebagai pengganti injeksi klorin dosis tinggi. Langkah ini tidak

hanya menjaga efisiensi perpindahan panas, tetapi juga memenuhi standar ketat perlindungan ekosistem laut (EPRI, 2007).

Beberapa PLTU di Indonesia yang menerapkan strategi mitigasi termasuk PLTU Tanjung Awar Awar, PLTU Suralaya, dan PLTU Jawa 7, yang menggunakan teknologi bersih seperti desulfurisasi (FGD), burner rendah NO_x, dan teknologi ultra-supercritical (USC) untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi. Selain itu, PT PLN menerapkan strategi mitigasi perubahan iklim di 40 PLTU Grupnya melalui teknologi co-firing biomassa, serta berencana menerapkan carbon capture and storage (CCS), memensiunkan dini PLTU, dan menggunakan hidrogen.



