

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang berfokus pada analisis kondensor dan efisiensi turbin sangat diperlukan. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. Analisis Fenomena Fouling pada Tube Kondensor dan Dampaknya Terhadap Konsumsi Spesifik Batubara (SCC) di PLTU (2020)
Penelitian yang dilakukan oleh Santoso dan Handayani ini fokus pada dampak degradasi perpindahan panas akibat fouling pada kondensor. Hasil analisis menunjukkan bahwa akumulasi kerak dan lumpur pada permukaan tube kondensor secara signifikan menurunkan Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (U) unit, dengan penurunan terukur mencapai hingga 20% dari nilai desain. Penurunan kinerja termal kondensor ini memiliki korelasi langsung dengan peningkatan tekanan vakum, yang pada akhirnya meningkatkan Heat Rate unit. Secara ekonomi, hal ini berbanding lurus dengan kenaikan Konsumsi Spesifik Batubara (SCC) unit pembangkit, yang berarti operasi unit menjadi kurang efisien dalam penggunaan bahan bakar.
2. Analisis Korelasi Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kinerja Termal Turbin Uap pada Unit Pembangkit Skala Besar (2023)
Simbolon dan Silitonga menggunakan data operasional dari unit pembangkit skala besar untuk mengukur hubungan antara tekanan vakum dan kinerja turbin. Melalui perhitungan termodinamika dan analisis korelasi Pearson, ditemukan bahwa terdapat korelasi negatif antara tekanan vakum (dinyatakan dalam tekanan mutlak) dengan kinerja termal turbin. Hasil kuantitatif utama mereka menyimpulkan bahwa setiap kenaikan 1 kPa pada tekanan vakum kondensor dapat mengakibatkan penurunan efisiensi turbin sekitar 0.5% atau peningkatan Heat Rate yang substansial. Hal ini menegaskan bahwa

mempertahankan vakum optimal adalah kunci utama efisiensi pembangkit.

3. Modeling and Analysis of Air Ingress Effects on Steam Condenser Vacuum and Power Plant Efficiency (2022)

Chen, Zhang, dan Wang melakukan pemodelan dan simulasi untuk memahami dampak masuknya udara (air ingress) ke kondensor. Hasil studi mereka menunjukkan bahwa keberadaan gas non-kondensasi (udara) dalam shell kondensor, bahkan dalam jumlah kecil, sangat merugikan. Udara membentuk lapisan tipis (blanketing) di permukaan tube yang secara drastis menghambat perpindahan panas. Simulasi mengindikasikan bahwa laju aliran kebocoran udara yang melebihi batas desain dapat menyebabkan tekanan vakum memburuk secara eksponensial. Secara keseluruhan, kebocoran udara adalah penyebab signifikan kerugian efisiensi termal karena meningkatkan tekanan backpressure turbin.

4. The Sensitivity of Steam Turbine Heat Rate to Condenser Backpressure: A Detailed Thermodynamic Analysis (2024)

Penelitian oleh Johnson dan Peterson ini merupakan analisis termodinamika mendalam mengenai sensitivitas kinerja turbin terhadap perubahan tekanan buang (backpressure). Mereka menyajikan perhitungan Siklus Rankine yang detail untuk berbagai kondisi tekanan kondensor. Temuan kunci dari analisis mereka adalah bahwa sensitivitas efisiensi turbin terhadap backpressure bersifat non-linear, artinya, dampak kenaikan tekanan vakum pada titik operasi yang lebih tinggi akan lebih buruk dibandingkan kenaikan tekanan yang sama pada titik operasi yang lebih rendah. Oleh karena itu, penelitian ini menekankan bahwa untuk mendapatkan efisiensi termal maksimum, turbin harus dioperasikan sedekat mungkin dengan tekanan backpressure desain pabrikan.

Tabel 2. 1 Penelitian Yang Relefan

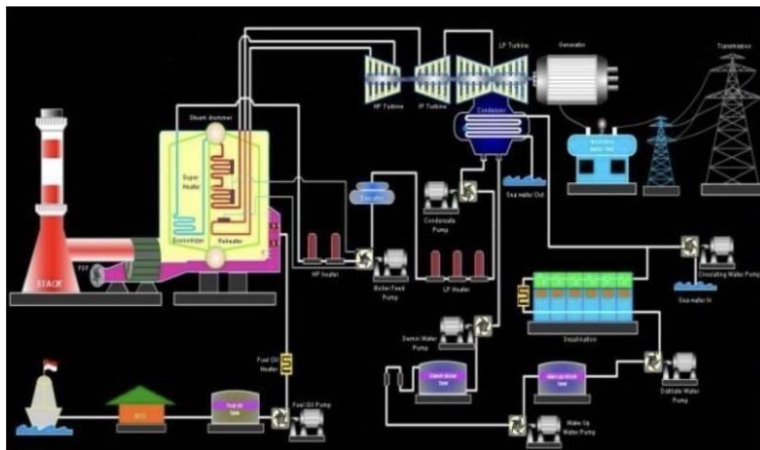
No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1	Analisis Fenomena <i>Fouling</i> pada Tube Kondensor dan Dampaknya Terhadap Konsumsi Spesifik Batubara (SCC) di PLTU (2020 - Santoso & Handayani, IT PLN)	Penurunan kinerja kondensor akibat <i>fouling</i> dan dampaknya pada konsumsi bahan bakar.	Analisis data historis kinerja U kondensor dan perhitungan SCC.	Fouling menurunkan U hingga 20%, berbanding lurus dengan kenaikan SCC.	Fokus pada SCC. Penelitian saat ini akan fokus pada korelasi langsung antara vakum dan efisiensi termal turbin (parameter termodinamika).
2	Analisis Korelasi Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kinerja Termal Turbin Uap pada Unit Pembangkit Skala Besar (2023 - Simbolon & Silitonga, IT PLN)	Mengukur pengaruh perubahan tekanan vakum terhadap <i>heat rate</i> turbin.	Studi Korelasi (Pearson) dan analisis termodinamika berbasis data DCS.	Terdapat korelasi negatif kuat antara tekanan vakum dengan kinerja turbin. Kenaikan 1 kPa tekanan vakum dapat	Masih umum pada "Unit Skala Besar". Penelitian ini akan spesifik pada PLTU Lontar , termasuk identifikasi faktor dominan lokal (<i>fouling</i> vs. kebocoran).

				menurunkan efisiensi 0.5%.	
3	Modeling and Analysis of Air Ingress Effects on Steam Condenser Vacuum and Power Plant Efficiency (2022 - Chen, Zhang, & Wang)	Dampak udara non-kondensasi (<i>air ingress</i>) terhadap vakum dan efisiensi pembangkit.	Pemodelan termodinamika dan simulasi dengan variasi laju aliran udara.	Kebocoran udara kecil dapat menyebabkan kerugian efisiensi yang besar akibat efek <i>blanketing</i> gas non-kondensasi.	Fokus pada pemodelan/simulasi . Penelitian saat ini akan melakukan verifikasi fenomena ini menggunakan data operasional aktual di PLTU Lontar.
4	The Sensitivity of Steam Turbine Heat Rate to Condenser Backpressure: A Detailed Thermodynamic Analysis (2024 - Johnson & Peterson)	Analisis sensitivitas teoritis <i>heat rate</i> turbin terhadap <i>backpressure</i> .	Analisis termodinamika mendalam dan perhitungan siklus Rankine.	Sensitivitas efisiensi turbin terhadap <i>backpressure</i> non-linear. Menekan perlunya operasi pada <i>backpressure</i> desain.	Fokus pada teori/sensitivitas . Penelitian saat ini menggunakan teori tersebut untuk evaluasi performa aktual dan memberi rekomendasi perbaikan praktis .

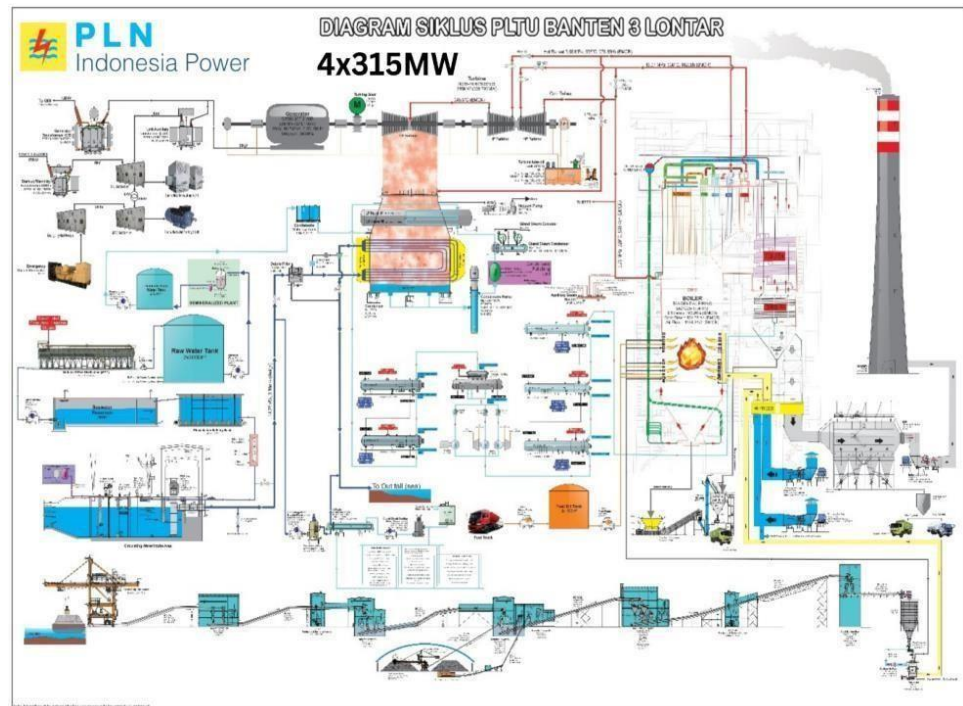
2.2 Landasan Teori

2.1.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar Pembangkit listrik termal menggunakan uap yang ditemukan di bumi untuk mengubah turbin untuk menghasilkan listrik. Uap bumi dihasilkan karena permen panas antara kompor magma dan reservoir panas bumi. Ini meningkatkan perubahan fase air dengan memanaskan titik didih agar uap menjadi super panas terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk start awal. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 2. 1 Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap
(sumber : PLTU Banten 3 Lontar)



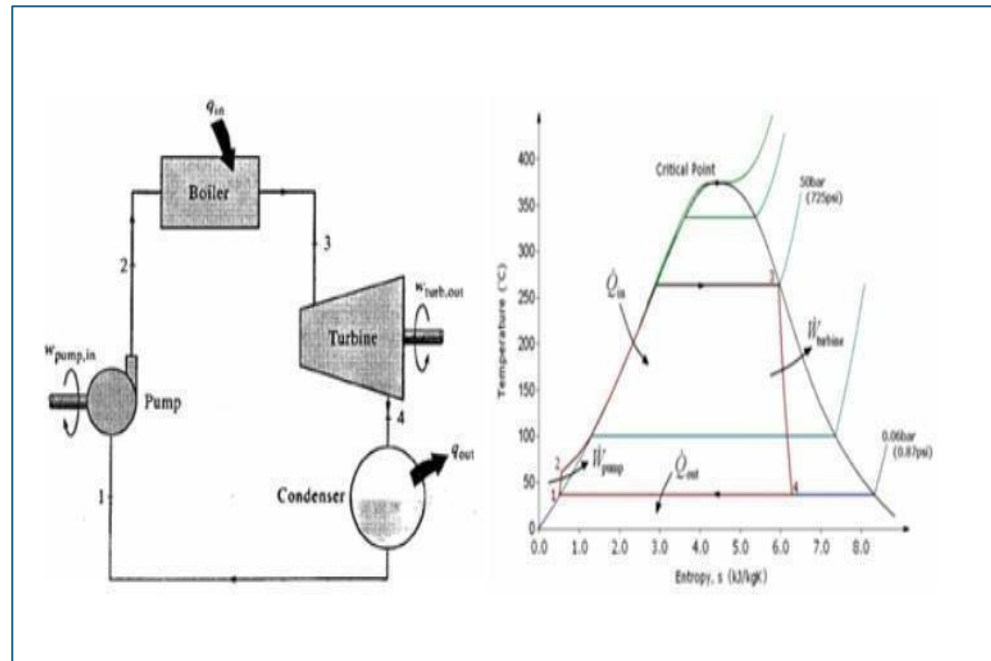
Gambar 2. 2 Prinsip kerja PLTU Lontar.
(sumber : PLTU Banten 3 Lontar)

Gambar diatas menjelaskan menjelaskan prinsip kerjapada PLTU Lontar menggunakan boiler tipe CFB (Circulating Fuidized Bed). Fluida atau media kerja yaitu air yang bersirkulasi secara tertutup. Siklus tertutup artinya menggunakan fluida yang sama secara berulang-ulang. Ada dua alur utama dalam proses produksi pada PLTU Lontar, alur batubara dan alur air/uap.

2.2.2 Siklus Rankine

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus rankine. Siklus rankine berbeda dengan siklus –siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara isothermal. Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus carnot dapat dicapai pada daerah uap basah, perubahan entalpi fluida kerja akan menghasilkan penguapan atau

kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperature. Temperature hanya diatur oleh tekanan uap fluida. Kerja pompa pada siklus rankine untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus carnot. Siklus rankine ideal dapat digambarkan dalam diagram T-S seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2. 3 Diagram termodinamika Siklus PLTU (Siklus Rankine)
(sumber : internet)

Siklus rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

- 1-2 kompresi isentropic dengan pompa.
- 2-3 penambahan panas dalam boiler secara isobar.
- 3-4 ekspansi isentropic pada turbin.
- 4-1 pelepasan panas pada condenser secara isobar dan isothermal.

Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (saturated liquid) dan dikompresi sampai tekanan operasi boiler. Temperature air akan meningkat selama kompresi isentropic karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki boiler sebagai cairan terkompresi (compressed liquid) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap superheated pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh boiler ke air pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang dihasilkan steam ini disebut sebagai steam generator.

Uap superheated pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara isentropic dan akan menghasilkan kerja untuk memutar shaft yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperature dari steam akan turun selama proses ini menuju keadan 4 steam akan masuk kondensor dan biasanya sudah berupa uap jenuh. Steam ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondensor dan akan meninggalkan kondensor sebagai cair jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

2.2.3 Siklus Air

Pada siklus air disini menggunakan 2 macam pompa yang berbeda dan salah satu pompa nya yaitu pompa CWP (Circulating Water Pump) fungsinya adalah sebagai pemompa air laut yang berfungsi sebagai air pendingin dalam condensor, dan juga ada pompa SWP (Sea Water Pump) yang memiliki fungsi untuk memompakan air umpan pada boiler untuk start awal (boiler feed pump). Pompa CWP yang berfungsi untuk memompa dan mengalirkan air pendingin kedalam kondensor, lalu mengalir sampai kembali ke laut. Pada pompa SWP yang memompa air laut yang melewati filter backwash pump lalu di pompa dan di alirkan kembali kedalam bak bak penampungan untuk mengendapkan kotoran yang terbawa pada air laut.

Kemudian air mengalir menuju ke MED (Multi Effect Deslination) MED ini berfungsi untuk mengubah air laut menjadi air tawar dengan proses salinitas air yang di destilasi sehingga air laut akan berubah menjadi air tawar. Proses kerja dalam MED uap mengalir dalam pipa pipa yang ada dalam MED kemudian air laut di semprotkan sehingga terjadi proses evaporasi. Uap air dalam MED mengalami proses kondensasi sehingga air laut berubah menjadi air tawar yang kemudian di alirkan dan di tampung ke Fresh Water Storage Tank sebagai Raw Water. Kemudian air di pompa dan dialirkan ke WTP (Water Treatment Plant) pada WTP kemudian air kembali dilakukan treatment untuk menurunkan kadar mineral yang terkandung didalamnya sehingga air benar benar murni air tanpa mineral sedikitpun (murni H₂O).

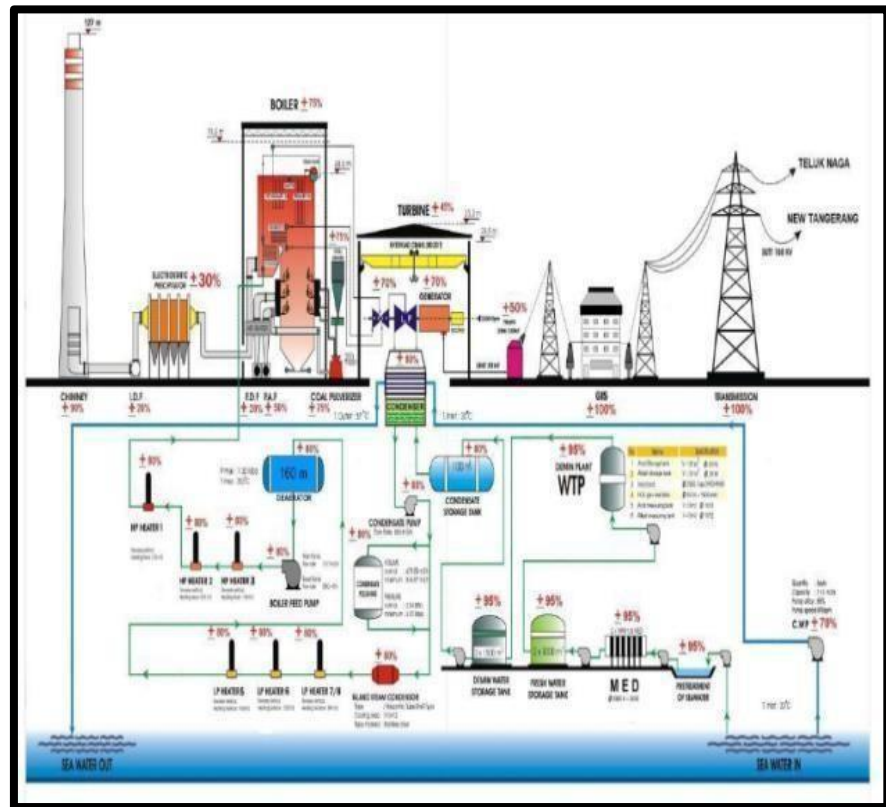
Kemudian air dari demin water dipompa dan dialirkan kedalam condensate

tank untuk di tampung dan akan di pompa apabila air dalam condensate tank dalam keadaan sedikit. Dalam tanki hotwell yang berfungsi untuk menampung air dari kondensor LP turbin di pompa oleh condensate pump. Air dari tanki kondensat di alirkan ke condensate polishing agar memurnikan air kembali karena dalam condensate polishing terdapat resin penukar ion untuk memurnikan air. Lalu air dari condensate di pompa dan di alirkan ke LP heater untuk menaikkan suhu dan memulai pemanasan awal pada air.

Kemudian air yang sudah di naikan suhunya akan mengalir ke daerator untuk kemudian di hilangkan gas-gas yang masih terkandung dalam air tersebut. Selanjutnya air akan di pompa dan dialirkan ke BFP (Boiler Feed Pump) BFP juga memiliki fungsi untuk memompa air masuk kedalam boiler dan juga untuk mengatur tekanan air pada boiler. Kemudian dari BFP air di pompa dan di alirkan menuju HP Heater untuk kembali menaikkan suhunya sehingga dapat lebih menghemat bahan bakar karena air sudah naik suhunya. Kemudian air di pompa dan dialirkan menuju ke economizer untuk melanjutkan pemanasan tingkat awal kemudian masuk ke steam drum. Air yang suhunya sudah naik namun belum menjadi uap akan turun kebawah steam drum dan akan mengalir ke pipa pipa menuju ke burner dan akan di panaskan didalam boiler.

Lalu air yang sudah menjadi uap basah akan mengalir kebagian atas steam drum dan akan mengalir menuju primary super heater dan akan menaikkan suhu dari uap tersebut. Kemudian suhu uap akan dinaikan kembali pada secondary super heater dan akan menjadi uap jenuh. Uap jenuh yang bersuhu dan tekanan tinggi kemudian akan menuju ke High pressure turbin dan kemudian melewati sudu sudu turbin dan menggerakannya sehingga turbin berputar, lalu uap sisa kerja turbin akan mengalami penurunan suhu dan temperatur kemudian akan di aliri menuju boiler dan akan di panaskan kembali suhunya.

Kemudian air dari hasil kondensasi uap akan dialirkan ke kondensat tank kembali dan akan kembali di panaskan dalam proses pemanasan awal dan siklus ini terus berulang.



Gambar 2. 4 Siklus Air PLTU Banten 3 Lontar

(sumber PLTU Banten 3 Lontar)

2.2.4 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin yang berputar pada porosnya dengan memanfaatkan energi dari uap panas yang diproduksi oleh boiler. Fungsi utama turbin ini ialah mengonversi energi potensial dari uap jadi energi kinetik, yang kemudian diubah kembali jadi energi mekanis untuk memutar poros turbin. Proses transformasi energi potensial menjadi energi mekanis dan perputaran porosnya dilakukan melalui berbagai metode. Umumnya, turbin uap tersusun atas dua komponen utama stator dan rotor, yang menjadi bagian inti dari turbin, serta dilengkapi komponen pendukung semisal kopling, bantalan, serta sistem bantu lainnya supaya performa turbin bisa maksimal. Turbin ini mendayagunakan energi kinetik dari fluida kerja yang meningkat karena adanya tambahan energi panas.

Turbin uap memiliki fungsi untuk mengonversi energi panas dari uap jadi energi mekanik berupa rotasi. Uap bertekanan tinggi serta bersuhu panas mengalir melalui nozzle, yang meningkatkan kecepatannya dan diarahkan guna mendorong bilah-bilah turbin yang terpasang pada poros. Saat uap

melewati sudu-sudu yang bergerak, terjadi perubahan momentum pada uap tersebut, menghasilkan tenaga yang digunakan untuk menggerakkan generator, yang kemudian mengubahnya menjadi listrik. Setelah melewati turbin, tekanan dan suhu uap yang telah digunakan akan menurun hingga berubah jadi uap basah. Uap ini kemudian keluar dari turbin dan dialihkan ke kondensor untuk melalui proses kondensasi atau an, sehingga menjadi air kondensat yang dapat digunakan kembali memanaskan air di boiler.



Gambar 2. 5 Turbin Uap
(sumber PLTU Banten 3 Lontar, tahun 2025)

2.2.5 Kondensor

Kondensor adalah suatu alat dalam PLTU yang berfungsi untuk mengkondensasi uap buangan dari kerja turbin kembali menjadi fase cair kembali. Peran kondensor ini sangat penting pada pembangkit listrik tenaga uap, dimana kondensor yang berfungsi sebagai alat pendingin dalam PLTU yang memiliki fungsi untuk merubah fasa dari uap diubah kembali menjadi fasa cair dalam kondensor. Dan juga dengan adanya kondensor

mengakibatkan kondisi vacuum yang terjadi pada sisi uap kondensor termasuk hotwell. Pada PLTU ini menggunakan siklus air secara tertutup. Siklus air tertutup artinya fluida atau air yang mengalir untuk siklus ini adalah fluida yang sama yang digunakan secara terus menerus dan berulang-ulang. Pada siklus tertutup ini fluida yang digunakan adalah fluida yang sama yang akan ditambahkan ketika terjadi pengurangan dalam siklus ini.



Gambar 2. 6 Kondensor
(sumber PLTU Banten 3 Lontar, tahun 2025)

2.2.5.1 Prinsip Kerja Kondensor

Kondensor adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (tubes). Uap mengalir di luar pipa-pipa (shell side) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (tube side). Kondensor seperti ini disebut kondensor tipe surface (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensor sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Air pendingin

diambil dari sumber yang cukup persediannya, yaitu dari danau, sungai atau laut. Posisi kondensor umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensor karena gravitasi. Laju perpindahan panas tergantung pada aliran air pendingin, kebersihan pipa-pipa dan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin. Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperatur jenuh, dalam hal ini kondensor berada pada kondisi vakum. Karena temperatur air pendingin sama dengan temperatur udara luar, maka temperatur air kondensatnya maksimum mendekati temperatur udara luar. Apabila laju perpindahan panas terganggu, maka akan berpengaruh terhadap tekanan dan temperatur.

Komponen-komponen utama kondensor adalah :

- a. Selongsong (Shell) Pipanya di roll padapemegang pipa pada ujung-ujungnya Untuk memungkinkan pemuaian antara pipa air masuk dan selongsong, maka fleksibel diafragma dipasang pada sisi masuk dan keluar dari selongsong. Diafragma ini berfungsi sebagai flange yang menghubungkan selongsong, plat pemegang pipa dan water box. Expansion join terbuat dari stainless steel yang terletak pada leher kondensor untuk memungkinkan diferensial expansion.
- b. Ruang Air (Water Box) Ruang-ruang air pada sisi masuk dan keluar terbuat dari baja karbon dan masing-masing mempunyai lobang lalu orang. Dengan menggunakan air yang terpisah, maka pencucian setengah kondensor dapat dilakukan pada beban rendah.
- c. Pipa dan Pemegang Pipa (Tube Plats and Tubes) Pemegang pipa terbuat dari naval brass dan pipa nya dari aluminium brass pipanya di roll ke pemegang pipa dan ditunjang dengan 6 buah penunjang pipa. Diafragma baja yang fleksibel memungkinkan diferensial expansion (pemuaian antara pipa aluminium brass dengan selongsong baja carbon).

Pemasangan pemegang pipa pada selongsong.

2.2.6 Peran Kondensor dalam Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah fondasi termodinamika bagi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), yang bertujuan mengubah energi panas menjadi energi mekanik (kerja) dan akhirnya menjadi listrik. Kondensor memainkan peran penting sebagai komponen penutup siklus yang secara fundamental memengaruhi efisiensi keseluruhan.

A. Fungsi Utama: Mengubah Fasa dan Menjaga Aliran Siklus

Secara operasional, kondensor memiliki dua fungsi primer:

- a. Mengubah Fasa: Kondensor berfungsi sebagai penukar panas (Heat Exchanger) yang tugasnya mengkondensasikan (mengubah fasa) uap bekas bertekanan rendah yang keluar dari turbin menjadi air (kondensat). Air ini kemudian dapat dipompa kembali ke boiler untuk dipanaskan ulang, sehingga siklus termodinamika dapat berlangsung secara tertutup.
- b. Menyediakan Air Umpan Berkualitas: Kondensasi juga berfungsi sebagai proses pemurnian. Uap yang telah terkondensasi (air kondensat) memiliki kualitas yang sangat tinggi, bebas mineral, sehingga melindungi boiler dan turbin dari kerusakan akibat korosi dan kerak (scaling).

B. Peran Kritis Termodinamika: Menciptakan "Vakum"

Peran yang paling krusial bagi efisiensi adalah kemampuan kondensor untuk menciptakan dan mempertahankan kondisi vakum tinggi (tekanan mutlak rendah) pada sisi buang turbin. Tekanan rendah ini disebut backpressure atau tekanan kondensor.

C. Meningkatkan Efisiensi Turbin (Heat Drop)

Efisiensi turbin (η_{turbin}) dihitung berdasarkan perbandingan antara kerja aktual yang dihasilkan dan kerja ideal (isentropik). Kerja yang dihasilkan turbin (Work Output) berbanding lurus dengan selisih entalpi (Δh) uap antara masuk dan keluar turbin, dikenal sebagai Heat Drop (W

turbin = $h_{\text{masuk}} - h_{\text{keluar}}$).

Dengan menciptakan tekanan buang (P_{buang}) serendah mungkin (vakum tinggi), kondensor memaksa uap bekas untuk berada pada entalpi (h_{buang}) yang sangat rendah. Semakin rendah h_{buang} , maka semakin besar Heat Drop (Δh) yang dihasilkan, sehingga kerja yang diekstrak dari uap menjadi maksimum dan efisiensi turbin meningkat secara signifikan (Johnson & Peterson, 2024).

D. Mengurangi Kerja Pompa

Kondensor mengubah uap buang turbin menjadi air (fasa cair) sebelum masuk ke pompa. Memompa cairan membutuhkan kerja yang jauh lebih kecil dibandingkan mengkompresi gas (uap) hingga tekanan boiler yang sangat tinggi.

Dengan mengkondensasikan uap menjadi air, kondensor memastikan kerja yang dikonsumsi oleh pompa (W_{pompa}) dalam siklus termodinamika menjadi minimal ($W_{\text{pompa}} \ll W_{\text{turbin}}$), sehingga kerja bersih siklus ($W_{\text{bersih}} = W_{\text{turbin}} - W_{\text{pompa}}$) menjadi maksimal.

2.2.7 Batasan dan Keterbatasan Kinerja

Kinerja ideal kondensor (yaitu tekanan vakum terendah) dibatasi oleh dua faktor utama (Arifin et al., 2024):

Suhu Air Pendingin Masuk ($T_{\text{cooling in}}$): Tekanan minimum kondensor secara termodinamika dibatasi oleh suhu saturasi uap yang sesuai dengan suhu air pendingin yang tersedia. Sulit mencapai tekanan uap di bawah tekanan saturasi yang sesuai dengan suhu air pendingin masuk.

Perpindahan Panas: Efisiensi perpindahan panas ditentukan oleh kondisi permukaan tube. Adanya Fouling (kerak) atau masuknya Gas Non-kondensasi (udara) akan meningkatkan resistansi termal, menghambat proses kondensasi, dan menaikkan tekanan vakum (backpressure). Hal ini secara langsung menurunkan efisiensi yang dapat dicapai oleh turbin.

Secara ringkas, kondensor berfungsi sebagai komponen krusial di ujung turbin. Semakin baik kinerjanya dalam membuang panas dan menciptakan

vakum, semakin besar potensi energi yang dapat diekstrak oleh turbin dari uap yang dihasilkan boiler.

2.2.8 Parameter Kinerja Kondensor

Kinerja kondensor diukur menggunakan beberapa parameter kunci yang melibatkan perpindahan panas dan kondisi operasional (Satrio & Widiyanto, 2023):

1. Tekanan Vakum (Backpressure): Tekanan mutlak uap di dalam kondensor. Merupakan indikator utama kinerja. Tekanan yang ideal adalah mendekati tekanan saturasi air pendingin keluar. Peningkatan tekanan vakum (penurunan nilai vakum) secara langsung menurunkan efisiensi turbin.
2. Terminal Temperature Difference (TTD):

$$TTD = T_{\text{sat,cond}} - T_{\text{condensate out}} \quad (1)$$

TTD adalah perbedaan suhu saturasi uap di kondensor ($T_{\text{sat,cond}}$) dengan suhu air kondensat keluar ($T_{\text{condensate out}}$). Nilai TTD yang ideal mendekati 0°C (sekitar 0.5 hingga 1°C dalam praktik) menunjukkan kondensor bekerja efisien dalam proses pendinginan dan kondensasi uap.

2.2.9 Faktor Penyebab Penurunan Performa Kondensor

Deviasi kinerja kondensor umumnya disebabkan oleh dua faktor utama:

Fouling dan Scaling: Penumpukan material asing (kerak, lumpur, mikroorganisme) pada permukaan luar tube kondensor. Fouling ini meningkatkan resistansi termal, menurunkan nilai koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) (Santoso & Handayani, 2020), dan secara langsung menyebabkan suhu uap di kondensor naik, sehingga vakum memburuk (Lee & Kim, 2021).

Kebocoran Udara (Air Ingress): Masuknya gas non-kondensasi (udara) ke dalam kondensor melalui seal atau flange yang bocor. Udara akan menempati ruang uap dan membentuk lapisan tipis yang menghambat perpindahan panas, yang dikenal sebagai fenomena blanketing (Hasan & Pratiwi, 2024). Akibatnya, tekanan parsial uap

menurun dan tekanan total di kondensor meningkat, secara drastis menurunkan vakum dan efisiensi.

2.2.10 Jenis Jenis Pemeliharaan

Istilah "pemeliharaan" merujuk pada berbagai prosedur yang digunakan untuk menjaga sesuatu dalam kondisi baik atau mengembalikannya ke keadaan yang layak. Secara lebih spesifik, pemeliharaan mengacu pada langkah-langkah yang dilakukan untuk memperpanjang umur mesin atau peralatan pabrik serta mencegah kerusakan atau kegagalan. Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), "pemeliharaan" didefinisikan sebagai tindakan merawat sesuatu dengan baik. Selain itu, pemeliharaan mencakup pelaksanaan tugas rutin untuk menjaga peralatan tetap berfungsi dengan baik (pemeliharaan terencana) atau mencegah potensi masalah (pemeliharaan pencegahan). (Corder, Hadi, & Sempurno, 1992).

Seiring dengan berkurangnya kerusakan pada mesin dan peralatan kerja, produktivitas serta efisiensi produksi akan meningkat, yang pada akhirnya meningkatkan keuntungan perusahaan. Pemeliharaan diklasifikasikan ke dalam enam kategori berdasarkan jenisnya, antara lain:

2.2.10.1 Breakdown Maintenance

Pemeliharaan jenis ini dilakukan setelah mesin atau peralatan kerja mengalami kerusakan, sehingga tidak dapat berfungsi secara normal atau menyebabkan penghentian operasional secara tiba-tiba. Breakdown maintenance ini harus dihindari karena akan menyebabkan kerugian atau tidak tercapainya kualitas ataupun output produksi karena berhenti beroperasi secara mendadak.

2.2.10.2 Preventive Maintenance

Pemeliharaan jenis ini dilakukan secara teratur dan terencana untuk mencegah kerusakan atau kegagalan pada mesin maupun peralatan kerja. Menjadwalkan pembersihan serta inspeksi berkala merupakan salah satu contoh pemeliharaan preventif.

2.2.10.3 Predictive Maintenance

Tujuan pemeliharaan ini adalah untuk mengantisipasi kerusakan sebelum menyebabkan gangguan total. Dengan memeriksa mesin atau peralatan kerja, pemeliharaan prediktif memperkirakan kapan suatu bagian dari mesin akan mengalami kegagalan.

2.2.10.4 Corrective Maintenance

Pemeliharaan jenis ini melibatkan penentuan sumber kerusakan dan perbaikannya guna mengembalikan operasi normal pada mesin atau peralatan kerja. Mesin atau peralatan manufaktur yang tidak berfungsi dengan baik atau masih beroperasi tetapi tidak dalam kondisi optimal akan menjalani pemeliharaan korektif.

2.2.10.5 Running Maintenance

Pemeliharaan jenis ini dilakukan saat mesin atau peralatan kerja sedang digunakan. Peralatan yang harus beroperasi terus-menerus untuk mendukung proses produksi memerlukan pemeliharaan ini.

2.2.10.6 Emergency Maintenance

Merupakan jenis maintenance yang mesti segera dilaksanakan akibat adanya kerusakan yang bersifat signifikan.

2.2.11 Kerangka Pemikiran

Sistem kondensasi pada PLTU Lontar merupakan bagian kritis dalam mendukung kontinuitas dan efisiensi operasi pembangkit, khususnya dalam proses pengubahan uap bekas hasil ekspansi turbin menjadi air kondensat. Dalam siklus Rankine, kondensor memiliki peran strategis sebagai komponen yang menciptakan kondisi vakum, di mana kinerjanya sangat memengaruhi besarnya heat drop pada turbin, konsumsi bahan bakar spesifik (heat rate), serta efisiensi termal pembangkit secara keseluruhan. Oleh karena itu, optimalisasi performa kondensor menjadi kunci utama dalam menjaga

keandalan dan keberlanjutan operasional unit pembangkit. Dalam praktik operasional, kondensor beroperasi secara kontinu dengan menggunakan air laut sebagai media pendingin utama. Kondisi lingkungan dan karakteristik air laut tersebut berpotensi menyebabkan penurunan performa seiring waktu akibat terbentuknya pengerasan (fouling) pada dinding tube, penumpukan biota laut, maupun adanya kebocoran udara (air ingress) ke sisi vakum. Namun demikian, selama unit masih dapat menghasilkan beban listrik yang diminta, penurunan kinerja kondensor sering kali terabaikan tanpa dilakukan evaluasi performa secara mendalam. Asumsi bahwa sistem masih dalam kondisi baik selama tetap beroperasi perlu dikaji lebih lanjut, karena penurunan vakum sekecil apa pun akan berdampak pada penurunan efisiensi turbin yang tidak terlihat secara kasat mata namun merugikan dari sisi energi. Analisis performa kondensor menjadi sangat penting untuk mengetahui hubungan antara parameter operasi seperti temperatur air pendingin masuk dan keluar, tekanan vakum, serta temperatur uap masuk. Melalui analisis ini, dapat dihitung nilai efektivitas dan koefisien perpindahan panas menyeluruh (U) sebagai indikator kinerja utama. Dengan membandingkan kondisi aktual kondensor terhadap standar atau spesifikasi desain (design data sheet), dapat diketahui sejauh mana penyimpangan yang terjadi dan apakah kondensor masih bekerja pada titik operasi yang optimal atau telah mengalami degradasi yang signifikan. Selain dari sisi teknis, analisis performa kondensor juga memiliki keterkaitan erat dengan efisiensi biaya operasional PLTU. Penurunan tekanan vakum pada kondensor mengakibatkan kenaikan tekanan balik (backpressure) yang memaksa turbin bekerja lebih berat untuk menghasilkan daya yang sama. Hal ini secara langsung meningkatkan nilai Heat Rate unit, yang berarti konsumsi bahan bakar batubara menjadi lebih tinggi untuk setiap kWh listrik yang dihasilkan. Apabila kondisi ini dibiarkan, maka biaya produksi listrik akan meningkat secara signifikan dan beban kerja peralatan pendukung semakin berat, yang pada akhirnya dapat memperpendek usia pakai komponen dan meningkatkan frekuensi pemeliharaan. Berdasarkan uraian tersebut, analisis performa kondensor terhadap efisiensi turbin uap di PLTU Lontar perlu dilakukan sebagai upaya untuk memastikan bahwa siklus termal beroperasi secara efisien, baik dari sisi kinerja termodinamika maupun efisiensi biaya. Hasil

analisis ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan teknis, seperti penentuan jadwal pembersihan kondensor (condenser cleaning), optimalisasi sistem pembersihan bola karet (ball cleaning system), serta perbaikan pada sistem ekstraksi udara, sehingga mendukung keandalan operasi pembangkit dan peningkatan efisiensi energi secara berkelanjutan.