

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi

2.1.1 Pengertian Energi

Energi adalah kemampuan suatu sistem untuk melakukan usaha, menciptakan perubahan, atau menghasilkan kerja. Dalam ilmu fisika, energi memiliki satuan joule (J) dan dapat hadir dalam berbagai bentuk, seperti energi kinetik, energi potensial, energi listrik, energi panas, dan energi kimia. Berdasarkan Hukum Kekekalan Energi energi tidak bisa diciptakan atau dimusnahkan, akan tetapi dapat ditransformasikan ke bentuk lainnya. Sebagai contoh, energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar dapat dikonversi menjadi energi panas melalui proses pembakaran, lalu diubah menjadi energi mekanik untuk menjalankan mesin (Satria, 2021).

Energi sangat penting dalam kehidupan manusia, baik untuk kebutuhan dasar, seperti metabolisme tubuh, hingga mendukung aktivitas modern, seperti pembangkitan listrik dan pengoperasian peralatan elektronik. Oleh karena itu, pengelolaan energi secara bijak menjadi hal krusial untuk mendukung keberlanjutan kehidupan.

2.1.2 Sumber Sumber Energi

Sumber energi dapat dikelompokkan menjadi dua kategori utama: energi terbarukan dan energi tidak terbarukan.

1. Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbarui secara alami dalam jangka waktu singkat. Beberapa contoh energi terbarukan adalah:

a. Energi Matahari.

Sumber energi matahari dapat dimanfaatkan dengan mengubahnya menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik, atau menjadi energi panas melalui kolektor surya

b. Energi Angin

Angin dimanfaatkan untuk menggerakkan turbin yang menghasilkan energi listrik. Sumber ini sangat potensial di wilayah yang memiliki kecepatan angin tinggi.

c. Energi Air

Aliran air dari sungai atau bendungan digunakan untuk memutar turbin pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), menghasilkan energi yang ramah lingkungan.

d. Biomassa

Material organik seperti limbah pertanian, kayu, atau kotoran hewan dapat diolah menjadi bahan bakar atau sumber energi.

2. Energi Tidak Terbarukan

Energi tidak terbarukan adalah energi yang bersumber dari bahan alam yang terbatas jumlahnya dan tidak dapat diperbarui dalam waktu singkat. Contohnya:

a. Batubara

Sebagai sumber energi yang tidak dapat diperbaharui, batubara banyak digunakan, terutama untuk menghasilkan listrik. Proses pembentukan batubara berasal dari fosil tumbuhan yang terkubur di bawah tekanan dan panas tinggi selama jutaan tahun. Batubara memiliki keunggulan sebagai bahan bakar dengan efisiensi tinggi dalam menghasilkan energi panas.

b. Minyak dan Gas Bumi

Minyak bumi dan gas alam adalah hidrokarbon yang terbentuk dari fosil makhluk hidup yang terkubur di bawah lapisan sedimen selama jutaan tahun. Minyak bumi dan gas alam memiliki kandungan energi yang tinggi, mudah diangkut dan diolah, serta menghasilkan emisi karbon lebih rendah dibandingkan batubara (khususnya gas alam).

c. Energi Nuklir

Energi nuklir diperoleh dari reaksi fisi inti atom, biasanya uranium-235 atau plutonium-239. Proses fisi ini melepaskan sejumlah besar energi dengan emisi karbon yang hampir tidak terdeteksi, menjadikannya pilihan sumber energi yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil seperti batubara atau minyak bumi.

2.1.3 Tantangan Energi

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi global, dunia menghadapi berbagai tantangan besar dalam memastikan ketersediaan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Tantangan-tantangan ini melibatkan aspek lingkungan, ekonomi dan teknologi. Beberapa tantangan utama tersebut adalah:

1. Ketergantungan pada Bahan Bakar Fosil

Sumber energi fosil menyumbang emisi karbon yang signifikan. Penggunaan bahan bakar fosil menghasilkan emisi karbon dan polusi udara yang merugikan kesehatan serta mempercepat perubahan iklim

2. Keterbatasan Cadangan

Sumber daya ini terbatas dan memerlukan waktu jutaan tahun untuk terbentuk kembali, sehingga penggunaannya harus diimbangi dengan pengembangan energi alternatif. Negara-negara yang bergantung pada bahan bakar fosil menghadapi risiko kelangkaan energi di masa depan, yang dapat menyebabkan krisis ekonomi dan politik.

3. Efisiensi Energi

Sebagian besar teknologi pembangkit energi yang ada saat ini memiliki tingkat efisiensi rendah. Hal ini menyebabkan pemborosan energi dalam skala besar dan meningkatkan konsumsi bahan bakar.

2.1.4 Efisiensi Energi

Efisiensi energi adalah upaya untuk memaksimalkan energi yang bermanfaat dari suatu proses sambil meminimalkan energi yang terbuang. Konsep ini penting dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, menekan dampak lingkungan, serta menurunkan biaya operasional. Semakin efisien suatu sistem, semakin sedikit energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *output* tertentu, sehingga membantu menghemat sumber daya yang semakin terbatas.

Penerapan efisiensi energi berperan besar di berbagai sektor, seperti industri, transportasi, dan rumah tangga. Di sektor industri, efisiensi dapat dicapai dengan memanfaatkan teknologi mutakhir seperti *cogeneration* dan boiler *ultra-supercritical*. Pada rumah tangga, penggunaan alat elektronik hemat energi dan perilaku hemat energi, seperti mematikan perangkat yang tidak digunakan, dapat memberikan dampak yang signifikan. Peningkatan efisiensi energi juga membantu sektor transportasi dengan mendorong penggunaan kendaraan listrik dan optimisasi sistem logistik.

Meski bermanfaat, implementasi efisiensi energi menghadapi tantangan seperti biaya awal teknologi hemat energi yang tinggi dan kurangnya kesadaran masyarakat. Oleh karena itu, strategi

seperti pengembangan teknologi, edukasi publik, serta dukungan kebijakan pemerintah sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi energi secara luas. Dengan penerapan langkah-langkah ini, pemborosan energi dapat diminimalkan, dan dampak negatif terhadap lingkungan dapat ditekan.

Sebagai langkah awal untuk memahami dan meningkatkan efisiensi energi, audit energi menjadi alat yang sangat penting. Melalui audit, pola penggunaan energi dapat dievaluasi untuk mengidentifikasi potensi penghematan dan peluang perbaikan sistem. Audit energi juga memberikan data yang dapat digunakan sebagai dasar untuk menerapkan langkah-langkah strategis dalam menciptakan sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2.2 Audit Energi

Audit energi merupakan metode yang dirancang untuk menekan konsumsi energi berlebihan, mengendalikan pemakaian yang tidak efisien, serta menghilangkan proses yang tidak diperlukan guna meningkatkan efisiensi energi. Upaya penghematan energi telah lama menjadi faktor penting dalam menurunkan biaya operasional di sektor industri. Namun, banyak industri masih belum menerapkan efisiensi energi secara maksimal. Oleh karena itu, sangatlah penting mengetahui bahwa proses produksi tersebut sudah berlangsung dengan penggunaan energi yang optimum (Al Momani et al., 2023)

Dalam dunia industri, tiga komponen utama pengeluaran operasional adalah energi, tenaga kerja, dan bahan baku. Di antara ketiganya, pengurangan penggunaan energi merupakan cara yang paling efektif untuk menekan biaya operasional secara keseluruhan (Burnett & Kiesling, 2019). Audit energi merupakan pendekatan yang efektif untuk mencapai *output* dan kualitas yang sama dengan konsumsi energi yang lebih rendah. Melalui proses audit energi, memungkinkan aspek yang membutuhkan efisiensi dapat ditemukan dan dievaluasi secara menyeluruh untuk mendukung perbaikan berkelanjutan.

Audit energi berperan sebagai pendekatan positif dalam mendukung program pengelolaan yang bersifat pencegahan serta pengawasan mutu yang penting bagi proses produksi dan penggunaan energi yang optimal. Melalui audit ini, dilakukan evaluasi terhadap pemakaian energi untuk dilihat energi yang efisien dalam pemilihan kombinasi sumber energi, hingga penentuan teknologi yang mendukung penghematan energi secara tepat guna. Proses ini juga mencakup penyusunan rekomendasi untuk meningkatkan efisiensi energi berdasarkan studi kelayakan teknis yang mempertimbangkan aspek ekonomi dan struktur organisasi dalam periode tertentu. Selain

itu, audit energi membantu menurunkan konsumsi energi per unit produk dengan tetap menjaga biaya operasional tetap rendah. Audit ini memberikan tolok ukur penting dalam manajemen energi organisasi dan menjadi dasar dalam menyusun strategi penggunaan energi yang lebih terarah dan efisien di seluruh unit kerja (Kumar et al., 2018).

Mengacu pada Peraturan Menteri ESDM No. 14 Tahun 2012 mengenai Manajemen Energi (Kementerian ESDM, 2017), klasifikasi rekomendasi peningkatan efisiensi energi dari hasil audit dibagi menjadi beberapa kategori, yaitu:

1. **Rekomendasi Tanpa Biaya Investasi**, yaitu saran yang dapat langsung diterapkan tanpa memerlukan pengeluaran dana.
2. **Rekomendasi dengan Investasi Rendah**, yaitu rekomendasi yang berpotensi menghemat energi hingga 10%, dan/atau memiliki waktu pengembalian modal kurang dari dua tahun.
3. **Rekomendasi dengan Investasi Menengah**, yaitu usulan yang diperkirakan dapat menghemat energi antara 10% hingga 20%, dan/atau memiliki periode pengembalian modal antara dua hingga empat tahun.
4. **Rekomendasi dengan Investasi Tinggi**, yaitu solusi efisiensi energi dengan potensi penghematan di atas 20%, serta/atau membutuhkan waktu lebih dari empat tahun untuk balik modal.

Berdasarkan tingkat analisis dari audit energi dibagi menjadi tiga yaitu:

1. *Walk-Through Audit* (level 1)

Audit tingkat awal ini mempunyai tujuan untuk memperoleh gambaran mengenai manajemen energi pada fasilitas industri. Proses pada audit ini melibatkan pengamatan dilapangan dan melakukan interaksi tanpa pengambilan data kuantitatif.

Bertujuan untuk mengetahui pengelolaan energi sebuah industri secara umum. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi singkat, wawancara, dan tanpa ada pengukuran langsung. *Output* dari audit ini adalah evaluasi pengelolaan energi dan tingkat konsumsi energi.

2. *Preliminary Audit* (level 2)

Audit tahap kedua ini difokuskan untuk menyusun profil pemakaian energi dan mengidentifikasi peluang efisiensi energi yang dapat segera diterapkan. Pada tahap ini, dilakukan beberapa pengukuran cepat yang bersifat sementara. Hasilnya berupa saran

efisiensi energi dengan periode yang lebih singkat serta praktis dan tidak membutuhkan perubahan besar dalam sistem yang ada.

3. Audit Energi Detail (level 3)

Audit energi detail dilakukan secara komprehensif melalui pengukuran dan analisis teknis yang lebih menyeluruh. Audit ini menghasilkan rekomendasi perbaikan energi yang terstruktur untuk periode yang singkat maupun yang lama. Selain itu, rekomendasi tersebut dilengkapi dengan analisis potensi penghematan energi, estimasi biaya investasi, serta perhitungan waktu pengembalian modal (ROI) dari upaya efisiensi energi (Setyanto & Putra, 2019)

Menurut (Wibowo et al., 2021) pelaksanaan audit energi secara mendalam dan menyeluruh pada PLTU bertujuan untuk menemukan berbagai peluang perbaikan efisiensi energi. Penelitian ini menganalisis pengaruh setiap faktor yang memicu peningkatan nilai NPHR, dengan memperhatikan perubahan parameter operasi serta kinerja perangkat utama pembangkit. Selain itu, studi ini juga merumuskan rekomendasi strategis untuk meningkatkan kinerja sistem energi secara keseluruhan.

2.3 Proses Produksi PLTU Batubara

PLTU ialah sistem pembangkit energi yang memanfaatkan gerakan uap bertekanan tinggi sebagai inti utama untuk menghasilkan listrik. Komponen inti dari sistem ini adalah generator yang terhubung langsung dalam satu poros dengan turbin. Turbin tersebut berputar akibat dorongan energi kinetik dari uap kering atau uap panas. Pada proses operasionalnya, PLTU biasanya menggunakan bahan bakar seperti batubara serta diesel digunakan proses awal penyalaan sistem.

Uap dihasilkan dari pemanasan air yang terjadi boiler. Setelah berubah fasa menjadi uap, uap kembali di panaskan menjadi uap panas lanjut berupa uap kering. Selanjutnya uap yang telah dihasilkan akan diarahkan menuju Turbin, di dalam turbin uap mengalami ekspansi melalui *nozzle* ke sudu-sudu turbin. Tenaga kinetik dari uap mendorong sudu-sudu turbin sehingga membuat poros turbin berputar. Setelah melewati sudu-sudu turbin uap sisa akan masuk ke dalam kondensor. Di dalam kondensor uap didinginkan dengan media pendingin berupa air laut yang dipasok oleh *Circulating Water Pump* dan uap berubah fasa menjadi air, air tersebut biasa disebut sebagai air kondensat. Air kondensat akan digunakan kembali sebagai air pengisi boiler. Air kondensat yang berasal dari kondensor dialirkan menggunakan *Condensate Extraction Pump* (CEP), kemudian mengalami proses pemanasan awal di *Low Pressure Heater* (LPH) sebelum diteruskan ke

Deaerator. Pada tahap ini, gas-gas terlarut dalam air dihilangkan. Selanjutnya, air yang telah mengalami proses deaerasi dipompa oleh *Boiler feedwater Pump* (BFP) menuju *High Pressure Heater* (HPH) dan dilanjutkan ke *Economizer* untuk mendapatkan pemanasan lanjutan. Setelah itu, air dialirkan ke *steam drum*. Siklus tertutup antara air dan uap ini berlangsung secara berkesinambungan selama pembangkit beroperasi.

Secara prinsip, pembangkit listrik bekerja dengan cara mengonversi satu bentuk energi menjadi energi lainnya, yang hasil akhirnya berupa energi listrik. Pada PLTU, energi kimia yang berasal dari bahan bakar diubah menjadi energi panas. Energi panas ini kemudian digunakan untuk meningkatkan temperatur air hingga menjadi uap yang bertekanan. Uap tersebut memiliki energi gerak (kinetik) yang digunakan untuk membuat turbin berputar. Putaran turbin selanjutnya menggerakkan generator yang akhirnya menghasilkan listrik.

2.4 EPRI

EPRI adalah lembaga riset independen yang berbasis di Amerika Serikat dan berfokus pada penelitian serta pengembangan teknologi di sektor ketenagalistrikan. Salah satu kontribusi penting EPRI dalam meningkatkan efisiensi pembangkit listrik adalah melalui publikasi *Heat Rate Improvement Reference Manual* yang ditujukan sebagai panduan teknis dan bahan pelatihan bagi para insinyur pembangkit dalam merancang dan melaksanakan program peningkatan efisiensi termal.

EPRI mengklasifikasikan heat rate losses dan peluang perbaikannya berdasarkan sejumlah area utama, termasuk (Tsou, 1998):

1. Pengendalian komponen utama seperti boiler dan turbin
2. Pemantauan dan optimasi *cycle isolation*
3. Penerapan program pemantauan kinerja termal
4. Penggunaan instrumen dan sensor yang akurat untuk mendeteksi deviasi performa
5. Perencanaan program peningkatan efisiensi berbasis data

Manual ini menekankan bahwa heat rate improvement bukan hanya berdampak pada penghematan bahan bakar, tetapi juga memberikan keuntungan tambahan berupa pengurangan emisi (termasuk CO₂) dan penurunan biaya operasional dan pemeliharaan. Dalam konteks ini, EPRI menekankan pentingnya sistematisasi pemantauan performa sebagai bagian dari strategi jangka panjang untuk optimasi pembangkit.

EPRI juga merekomendasikan pendekatan berbasis data melalui pemantauan parameter kinerja secara real-time dan penggunaan perangkat lunak diagnostik serta simulasi performa, untuk mendeteksi penurunan efisiensi pada komponen utama pembangkit seperti HPH, LPH, boiler, kondensor, dan turbin. Pemantauan yang berkelanjutan ini dinilai penting untuk menjaga konsistensi efisiensi sistem sepanjang umur operasionalnya. Dengan menerapkan sistem digital dan analitik kinerja secara terus-menerus, operator dapat mengidentifikasi potensi losses lebih dini, melakukan pemeliharaan secara prediktif, dan menghindari kerugian energi yang bersifat kumulatif (Tsou, 1998).

2.5 Software EES

EES adalah perangkat lunak komputasi teknik yang dirancang untuk mempermudah penyelesaian masalah teknik melalui pemecahan persamaan matematika secara simultan. EES sering digunakan dalam aplikasi termodinamika karena kemampuannya dalam menangani properti termofisika dari berbagai fluida dan zat kerja dengan akurat. Perangkat lunak ini menyediakan basis data yang komprehensif untuk sifat-sifat termodinamika seperti entalpi, entropi, tekanan, dan suhu, yang dapat diakses dengan mudah menggunakan fungsi-fungsi bawaan.

EES memiliki beberapa keunggulan, antara lain:

1. Pemecahan Persamaan Simultan: Memungkinkan pengguna menyelesaikan sistem persamaan nonlinear secara simultan dengan akurasi tinggi.
2. Integrasi Data Termodinamika: Mendukung analisis sistem termal melalui properti termodinamika yang sudah terintegrasi.
3. Visualisasi: Memiliki kemampuan untuk menghasilkan grafik dan laporan untuk membantu analisis hasil.
4. Efisiensi dan Akurasi: Mengurangi risiko kesalahan manual dalam perhitungan dan mempercepat proses analisis.

Dalam konteks audit energi pada sistem PLTU, EES dapat digunakan untuk menganalisis dan mengevaluasi efisiensi termal, kehilangan energi, dan potensi perbaikan pada sistem. Penggunaan EES mencakup beberapa aspek berikut:

1. Analisis Sirkuit Termodinamika:

EES digunakan untuk memodelkan siklus *Rankine* sederhana hingga kompleks dengan memanfaatkan persamaan konservasi massa, energi, dan momentum. Perangkat lunak ini

memungkinkan evaluasi performa komponen seperti boiler, turbin, kondensor, dan pemanas air (HPH/LPH).

2. Perhitungan *Losses* Energi:

EES dapat membantu dalam menghitung kehilangan energi di setiap komponen berdasarkan data operasional yang tersedia. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk identifikasi area yang membutuhkan peningkatan efisiensi.

3. Evaluasi Parameter Operasional:

Dengan memasukkan data operasi seperti tekanan, suhu, dan aliran massa, EES dapat menghitung parameter termodinamika utama seperti entalpi dan entropi untuk menilai kinerja aktual sistem dibandingkan dengan kondisi desain.

4. Optimasi Sistem:

Melalui simulasi berbasis EES, berbagai skenario perbaikan dapat diuji, seperti penyesuaian tekanan operasi, optimasi pemulihan panas, atau modifikasi komponen untuk mengurangi *losses*.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan EES dalam analisis kinerja pembangkit listrik. Penelitian (Radhi et al., 2024) menggunakan metode validasi model dengan EES untuk menganalisis kinerja PLTU Al-Mosyab di Irak. Studi ini menguji variasi tekanan dan suhu untuk menentukan kondisi operasi optimal, yang menghasilkan pemahaman yang lebih mendalam tentang hubungan antara parameter operasional dan efisiensi sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa EES dapat memberikan rekomendasi yang lebih akurat untuk meningkatkan efisiensi pembangkit secara keseluruhan.

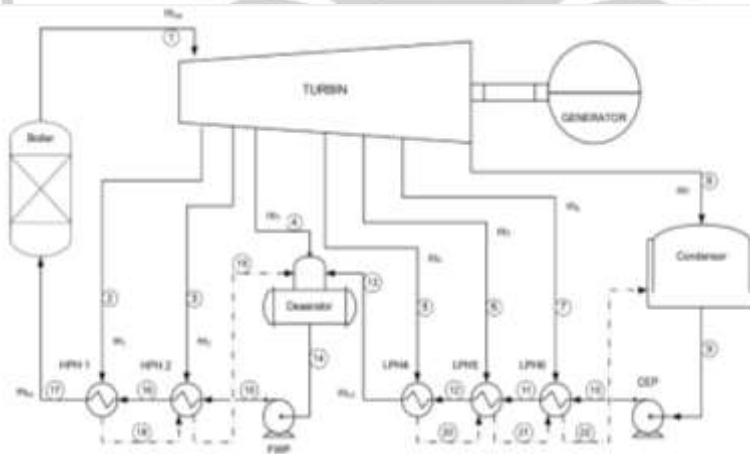
Penelitian (Ediatmaja et al., 2021) melakukan evaluasi kinerja PLTU Geothermal Ulumbu menggunakan EES untuk menganalisis termodinamika peralatan pembangkit. Penelitian ini menunjukkan bahwa dengan mengoptimalkan tekanan *inlet* turbin, SSC dapat diturunkan, sehingga meningkatkan efisiensi siklus pembangkit. Penggunaan EES dalam studi ini membuktikan efektivitasnya dalam mensimulasikan perubahan parameter operasional dan menentukan kondisi operasi terbaik untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkitan energi.

Dalam konteks perhitungan efisiensi dan NPHR pada PLTU, EES digunakan untuk mengolah data operasional pembangkit seperti tekanan dan temperatur uap, laju aliran massa, data bahan bakar, serta parameter air pendingin, dan kemudian menyelesaikan sistem persamaan yang merepresentasikan siklus Rankine. EES memiliki database termodinamika yang sangat lengkap,

termasuk properti fluida seperti air, uap, dan bahan bakar, sehingga memungkinkan pengguna untuk menghitung entalpi, entropi, efisiensi isentropik, kalor masuk dan keluar, serta energi *losses* di berbagai komponen pembangkit. Perhitungan dilakukan dengan memasukkan parameter-parameter aktual dari lapangan sebagai *input*, lalu *software* menyelesaikan persamaan konservasi energi dan massa yang relevan untuk menghitung performa siklus secara keseluruhan. Dengan fleksibilitas dalam pemodelan dan kemampuan memproses data numerik secara iteratif, EES menjadi alat bantu yang baik dalam audit energi termal dan analisis kinerja pembangkit.

2.6 Siklus Termodinamika Turbin Uap

Sebelum melakukan perhitungan *losses* energi pada PLTU, langkah awal yang harus dilakukan adalah menghitung siklus termodinamika pada turbin uap. Hal ini menjadi krusial karena untuk dapat menganalisis besarnya *losses*, diperlukan data mengenai aliran massa uap (m) yang melewati setiap titik ekstraksi pada turbin. Namun, pada tahap awal ini, nilai aliran massa uap tersebut belum diketahui secara pasti sehingga perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu. Perhitungan aliran massa uap (m) di setiap titik ekstraksi turbin dapat dilakukan dengan menerapkan prinsip keseimbangan energi yang mengacu pada kondisi termodinamika di setiap titik ekstraksi.



Gambar 2.1 Siklus PLTU 50 MW

Gambar 2.1 menunjukkan siklus PLTU 50 MW. Menentukan massa uap (m) setiap ekstraksi turbin dengan persamaan berikut:

a. Laju aliran Ekstraksi 1 untuk HPH 1 (m_1):

$$m_1 = \frac{m_{cd} (h_{17} - h_{16})}{(h_2 - h_{18})} \quad (2.1)$$

Dengan:

- m_1 : Laju aliran ekstraksi 1 [t/h]
- m_{fw} : Laju aliran *feedwater* [t/h]
- h_{17} : Entalpi *feedwater* keluar dari HPH 1 [kJ/kg]
- h_{16} : Entalpi *feedwater* masuk ke HPH 1 [kJ/kg]
- h_2 : Entalpi uap ekstraksi turbin nomor 1 [kJ/kg]
- h_{18} : Entalpi air kondensasi uap ekstraksi turbin nomor 1 [kJ/kg]

b. Laju aliran Ekstraksi 2 untuk HPH 2 (m_2):

$$m_2 = \frac{m_{fw} (h_{16} - h_{15}) - m_1 (h_{18} - h_{19})}{(h_3 - h_{19})} \quad (2.2)$$

Dengan

- m_2 : Laju aliran ekstraksi 2 [t/h]
- h_3 : Entalpi uap ekstraksi turbin nomor 2 [kJ/kg]
- h_{15} : Entalpi *feedwater* masuk ke HPH 2 [kJ/kg]
- h_{19} : Entalpi air kondensasi uap ekstraksi HPH 2 [kJ/kg]

c. Laju aliran Ekstraksi 3 untuk *Deaerator* (m_3):

$$m_3 = \frac{m_{cd} (h_{14} - h_{13}) - (m_1 + m_2) (h_{19} - h_{14})}{(h_4 - h_{14})} \quad (2.3)$$

Dengan

- m_3 : Laju aliran ekstraksi 3 [t/h]
- m_{cd} : Laju aliran *condensate water* (air kondensat) [t/h]
- h_4 : Entalpi uap pada ekstraksi turbin nomor 3 [kJ/kg]
- h_{14} : Entalpi *feedwater* masuk ke *feedwater Pump* [kJ/kg]
- h_{13} : Entalpi *feedwater* keluar dari LPH 4 [kJ/kg]

d. Laju aliran Ekstraksi 4 untuk LPH 4 (m_4):

$$m_4 = \frac{m_{cd} (h_{13} - h_{12})}{(h_5 - h_{20})} \quad (2.4)$$

Dengan

m_4 : Laju aliran ekstraksi 4 [t/h]

h_{12} : Entalpi *feedwater* masuk ke LPH 4 [kJ/kg]

h_5 : Entalpi uap pada ekstraksi turbin nomor 4 [kJ/kg]

h_{20} : Entalpi air kondensasi uap ekstraksi turbin nomor 4 [kJ/kg]

e. Laju aliran Ekstraksi 5 untuk LPH 5 (m_5):

$$m_5 = \frac{m_{cd} (h_{12} - h_{11}) - m_4 (h_{20} - h_{21})}{(h_6 - h_{21})} \quad (2.5)$$

Dengan

m_4 : Laju aliran ekstraksi 5 [t/h]

h_{12} : Entalpi uap pada ekstraksi turbin nomor 5 [kJ/kg]

h_5 : Entalpi *feedwater* masuk ke LPH 5 [kJ/kg]

h_{20} : Entalpi air kondensasi uap ekstraksi turbin nomor 5 [kJ/kg]

f. Laju aliran Ekstraksi 6 untuk LPH 6 (m_6):

$$m_6 = \frac{m_{cd} (h_{11} - h_{10}) - (m_4 + m_5) (h_{21} - h_{22})}{(h_7 - h_{22})} \quad (2.6)$$

Dengan

m_6 : Laju aliran ekstraksi 6 [t/h]

h_7 : Entalpi uap pada ekstraksi turbin nomor 6 [kJ/kg]

h_{10} : Entalpi *feedwater* masuk ke LPH 6 [kJ/kg]

h_{22} : Entalpi air kondensasi uap ekstraksi turbin nomor 6 [kJ/kg]

g. Laju aliran *steam* pada kondensor

$$m_7 = m_{ms} - (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6) \quad (2.7)$$

Dengan

m_{ms} : Laju aliran *main steam* [t/h]

m_7 : Laju aliran *steam* to kondensor [t/h]

2.7 Energi Losses

Energi *losses* adalah energi yang hilang dalam proses perubahan energi ke energi dengan bentuk lainnya, yang tidak dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan *output* yang diinginkan.

Dalam sistem pembangkit listrik, *losses* dapat terjadi pada berbagai komponen, yang berkontribusi pada penurunan efisiensi keseluruhan sistem.

Pemahaman tentang energi *losses* ini penting dalam mengoptimalkan efisiensi operasional dan mengurangi konsumsi energi. Berdasarkan hukum kekekalan energi dalam termodinamika pertama, energi tidak hilang atau muncul begitu saja, melainkan hanya mengalami perubahan bentuk. Oleh karena itu, setiap kehilangan energi dalam sistem dapat dianggap sebagai energi yang terbuang dan tidak dapat dimanfaatkan. Untuk menghitung energi *losses* dalam sistem pembangkit listrik, dapat digunakan persamaan berikut:

$$EL = E_e - E_i \quad (2.8)$$

Dengan

E_L : Energi *losses* (Joule)

E_e : Energi keluar dari sistem (Joule)

E_i : Energi masuk ke dalam sistem (Joule)

Persamaan ini menunjukkan bahwa energi *losses* (E_L) adalah selisih antara energi yang keluar dari sistem (E_e) dan energi yang masuk ke dalam sistem (E_i). Dengan memahami dan menghitung energi *losses*, langkah-langkah perbaikan dapat diidentifikasi untuk meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Energi *losses* dalam PLTU terjadi di berbagai komponen yang berfungsi dalam proses konversi energi dari bahan bakar menjadi energi listrik. Masing-masing komponen memiliki mekanisme dan penyebab yang berbeda dalam terjadinya *losses*. Berikut ini adalah beberapa jenis *losses* yang umum terjadi.

1. *Heat Losses*

Kehilangan ini terjadi ketika energi panas dari proses pembakaran tidak sepenuhnya terserap oleh fluida kerja, melainkan mengalir keluar ke lingkungan melalui permukaan luar boiler. Penyebab utama *heat losses* antara lain adalah konduksi dan konveksi panas dari permukaan boiler yang tidak terisolasi dengan baik, serta desain perpindahan panas yang tidak optimal.

2. *Radiation losses*

Radiation losses yaitu panas yang hilang dalam bentuk radiasi dari permukaan luar boiler yang bersuhu tinggi. Kehilangan radiasi ini bersifat kontinu selama boiler beroperasi, dan besarnya akan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur permukaan.

3. Blowdown Losses

Blowdown merupakan proses pembuangan sebagian air dari dalam boiler untuk menjaga konsentrasi zat terlarut (TDS) tetap dalam batas aman. Air yang dibuang dalam proses blowdown masih mengandung energi panas dalam bentuk entalpi, sehingga energi tersebut ikut terbuang dan tidak dapat dimanfaatkan.

2.7.1 Energi losses pada Boiler

Boiler merupakan salah satu komponen utama dalam PLTU, yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap dengan cara memanaskannya menggunakan energi dari pembakaran bahan bakar. Proses ini sangat penting karena uap yang dihasilkan digunakan untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan listrik. Namun, dalam proses konversi energi ini, sejumlah energi hilang sebagai energi *losses*, yang dapat mengurangi efisiensi boiler secara keseluruhan.

Untuk menganalisis energi *losses* pada boiler, kita dapat menggunakan persamaan yang menggambarkan heat loss pada boiler sebagai berikut:

$$Q_{\text{boiler}} = m_{\text{fuel}} \cdot HHV \quad (2.9)$$

Dengan

Q_{boiler} : total energi yang dihasilkan oleh boiler.

m_{fuel} : laju aliran bahan bakar (dalam satuan massa per waktu).

HHV : nilai kalori tinggi dari bahan bakar (high heating value).

2.7.2 Energi Keluar (Q_{out})

Energi yang keluar dari boiler dapat dibagi menjadi beberapa komponen, yang utama adalah energi yang digunakan untuk menghasilkan *steam* dan panas yang hilang (misalnya, melalui gas buang, radiasi, dll). Rumus dasar untuk energi yang digunakan untuk menghasilkan *steam* adalah:

$$Q_{\text{out}} = m_w \times (h_{\text{steam}} - h_{\text{water}}) \quad (2.10)$$

Dengan

m_w : laju aliran massa *steam* (Kg/s)

h_{steam} : entalpi *steam* (kJ/kg)

h_{water} : entalpi air sebelum dipanaskan (kJ/kg)

Dengan persamaan ini, kita dapat menghitung energi *losses* yang terjadi di dalam boiler. Energi *losses* dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$\text{Energi Losses} = Q_{in} - Q_{out} \quad (2.11)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, kita dapat menghitung energi *losses* pada boiler secara kuantitatif. Pengetahuan tentang energi *losses* ini sangat penting untuk melakukan evaluasi efisiensi boiler dan merumuskan langkah-langkah perbaikan yang diperlukan. Mengurangi energi *losses* pada boiler dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi keseluruhan sistem pembangkit listrik.

2.7.3 Energi Losses pada HPH dan LPH

HPH dan LPH adalah komponen penting dalam sistem pembangkit listrik yang berfungsi untuk memanaskan air umpan sebelum masuk ke dalam boiler. Dengan meningkatkan suhu air umpan, HPH dan LPH dapat mengurangi kebutuhan energi dari bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan uap, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem. Meskipun demikian, energi tetap hilang selama proses pemanasan ini. Hal ini dapat terjadi akibat beberapa faktor, termasuk efisiensi transfer panas yang tidak sempurna, konduksi, dan radiasi panas.

Energi *losses* pada HPH dan LPH dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

Berikut adalah formula langsung untuk menghitung energi *losses* pada HPH atau LPH, berdasarkan aliran massa *steam* ($\dot{m}_s$) dan *feedwater* $\dot{m}_{fw}$

$$\text{Energi Losses} = \dot{m}_s \times (h_{\text{steam}} - h_{\text{condensate}}) - \dot{m}_{fw} \times (h_{\text{feedwater out}} - h_{\text{feedwater in}}) \quad (2.12)$$

Keterangan:

$\dot{m}_s$	: aliran massa <i>steam</i> (kg/s)
h_{steam}	: entalpi <i>steam</i> (kJ/kg)
$h_{\text{condensate}}$	: entalpi kondensat (kJ/kg)
$\dot{m}_{fw}$	: aliran massa <i>feedwater</i> (kg/s)
$h_{\text{feeder out}}$	: entalpi <i>feedwater</i> setelah dipanaskan (kJ/kg)
$h_{\text{feeder in}}$	: entalpi <i>feedwater</i> sebelum dipanaskan (kJ/kg)

Memahami energi *losses* sangat penting untuk merancang sistem pembangkit yang lebih efisien. Dengan mengidentifikasi dan mengurangi sumber-sumber energi *losses* ini, efisiensi operasional

sistem pembangkit dapat ditingkatkan, yang pada akhirnya akan menghasilkan penghematan energi dan biaya yang lebih baik.

2.7.4 Energi Losses pada Kondensor

Kondensor adalah komponen yang berfungsi untuk mengubah uap yang dihasilkan di boiler kembali menjadi air. Proses ini penting untuk mempertahankan siklus air-uap dalam sistem pembangkit listrik. Namun, selama proses kondensasi, juga terjadi energi losses. Energi losses pada kondensor adalah energi yang hilang selama proses kondensasi uap menjadi air. Kehilangan ini dapat terjadi karena beberapa faktor, termasuk efisiensi transfer panas yang rendah dan kehilangan panas ke lingkungan. Energi losses ini dapat berkontribusi pada penurunan efisiensi keseluruhan sistem pembangkit listrik.

Menganalisis energi losses pada kondensor sangat penting untuk meningkatkan efisiensi sistem pembangkit. Dengan mengidentifikasi dan mengurangi sumber-sumber energi losses ini, kita dapat meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya energi. Pemahaman yang lebih baik tentang mekanisme energi losses ini dapat membantu dalam merancang kondensor yang lebih efisien dan sistem pembangkit yang lebih berkelanjutan.

Untuk menghitung energi yang hilang di kondensor, dapat menggunakan pendekatan perbedaan antara panas yang dilepaskan oleh uap dan panas yang diserap oleh air pendingin

Panas yang dilepaskan oleh Uap (Q_{uap})

- Energi yang dilepaskan oleh uap saat berubah fase menjadi cair dapat dihitung dengan:

$$Q_{uap} = m_{uap} \times h_{fg} \quad (2.13)$$

Dengan

m_{uap} : laju aliran massa uap yang masuk ke kondensor (kg/s)

h_{fg} : entalpi perubahan fase dari uap ke cair pada tekanan kondensor (J/kg)

Panas yang diserap oleh air pendingin ($Q_{cooling\ water}$)

- Panas yang diserap oleh air pendingin dihitung dengan:

$$Q_{cooling\ water} = m_{cw} \times C_{cw} \times (T_{out, cw} - T_{in\ cw}) \quad (2.14)$$

Dengan

m_{cw} : laju aliran massa air pendingin (kg/s)

C_{cw} : kapasitas panas spesifik air (J/kg°C)
 $T_{out,cw}$ dan $T_{in,cw}$: suhu keluar dan masuk air pendingin (°C)

Menghitung Energi Losses pada Kondensor:

- Energi losses di kondensor (Q_{losses}) dihitung sebagai selisih antara Q_{uap} dan $Q_{cooling\ water}$.

$$Q_{losses} = Q_{uap} - Q_{cooling\ water} \quad (2.15)$$
- Jika Q_{losses} positif, ini menunjukkan tidak semua energi uap berhasil diserap oleh air pendingin, mengindikasikan adanya losses dalam system.

2.8 Analisa Efisiensi Boiler

2.8.1 Efisiensi Boiler Metode Langsung

Metode langsung merupakan cara paling sederhana dan cepat dalam menghitung efisiensi sebuah boiler. Dalam pendekatan ini, efisiensi ditentukan dengan membandingkan total energi panas yang dihasilkan dengan total energi panas yang disuplai. Energi yang diperoleh oleh fluida kerja, yaitu air dan uap, dikalkulasikan terhadap energi yang terkandung dalam bahan bakar. Karena hanya memerlukan data keluaran berupa energi uap dan masukan berupa energi bahan bakar, metode ini sering disebut juga sebagai metode *input-output*. Untuk mengetahui jumlah panas yang masuk, diperlukan informasi mengenai nilai kalor bahan bakar serta laju alirannya, baik dalam satuan massa maupun volume, tergantung pada jenis bahan bakarnya. Efisiensi boiler dengan metode ini dihitung menggunakan Persamaan 2.16.

$$\eta(\%) = \frac{(m_{ms} \times h_{ms}) + (m_{mw} \times h_{mw}) - (m_{fw} \times h_{fw})}{m_{fuel} \times HHV} \quad (2.16)$$

Dengan

m_{ms} : laju aliran massa *main steam* (t/h)

h_{ms} : nilai entalpi *main steam* (kCal/kg)

m_{mw} : laju aliran massa *make-up water* (t/h)

h_{mw} : nilai entalpi *make-up water* (kCal/kg)

m_{fw} : laju aliran massa *feedwater* (t/h)

h_{fw} : nilai entalpi *feedwater* (kCal/kg)

m_{fuel} : laju aliran massa bahan bakar (t/h)

HHV : *High Heating Value* bahan bakar (kCal/kg)

2.8.2 Efisiensi Boiler Metode Kerugian Panas (Tidak Langsung)

Metode perhitungan kehilangan panas, yang sering disebut sebagai pendekatan tidak langsung, merupakan salah satu cara untuk mengevaluasi efisiensi boiler. Standar terkait metode ini telah ditetapkan oleh ASME melalui PTC-4, dengan pembaruan terbaru dilakukan pada tahun 2013. Kesenjangan energi pada boiler seperti terlihat pada gambar 2.2



Gambar 2.2 Kesenjangan energi pada boiler (ASME PTC 4, 2013)

Dalam penelitian ini hanya menganalisis 10 jenis kerugian yang ada pada boiler. Perhitungan boiler efisiensi dengan kerugian panas menggunakan Persamaan 2.17.

$$\eta(\%) = (100\% - L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8 + L9 + L10) \quad (2.17)$$

Dengan

L1: Kehilangan energi akibat kandungan gas kering dalam sistem (%)

L2: Kehilangan energi yang disebabkan oleh kadar kelembapan dalam batubara (%)

L3: Energi yang hilang akibat adanya unsur hidrogen dalam batubara (%)

L4: Kehilangan panas karena kandungan uap air dalam udara pembakaran (%)

L5: Energi terbuang akibat karbon yang tidak mengalami pembakaran sempurna (%)

L6: Kehilangan panas melalui dinding boiler akibat radiasi dan konveksi, berdasarkan nilai tetap dari produsen (%)

L7: Energi yang hilang namun tidak dapat diukur secara langsung, menggunakan nilai standar dari pabrikan (%)

L8: Kehilangan panas karena energi termal yang terbawa oleh *bottom ash* (%)

L9: Kehilangan panas karena panas sensibel yang dibawa oleh *fly ash* (%)

L10: Energi terbuang karena pembentukan gas karbon monoksida akibat pembakaran yang tidak sempurna (%)

Perhitungan kerugian karena gas kering menggunakan Persamaan 2.18.

$$L1(\%) = \frac{m_f \times C_p \times (T_f - T_a)}{HHV} \times 100 \quad (2.18)$$

Dengan

m_f : Massa gas buang kering per kg bahan bakar (kg/kg bahan bakar)

C_p : *Specific heat of flue gas* (kCal/kg °C)

T_f : Temperatur *flue gas* (°C)

T_a : Temperatur ambient (°C)

HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena kadar hidrogen pada batubara menggunakan Persamaan 2.19.

$$L2(\%) = \frac{9 \times H_2 \times (584 + C_p(T_f - T_a))}{HHV} \times 100 \quad (2.19)$$

Dengan

H_2 : kadar hidrogen dalam batubara (kg/kg bahan bakar)

C_p : *Specific heat of flue gas* (kCal/kg °C)

T_f : Temperatur *flue gas* (°C)
 T_a : Temperatur ambient (°C)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena kadar air dalam batubara menggunakan Persamaan 2.20.

$$L3(\%) = \frac{M \times (584 + C_p(T_f - T_a))}{HHV} \times 100 \quad (2.20)$$

Dengan

M : kandungan air pada batubara (kg/kg bahan bakar)
 C_p : *Specific heat of flue gas* (kCal/kg °C)
 T_f : Temperatur *flue gas* (°C)
 T_a : Temperatur ambient (°C)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian kadar air dalam udara pembakaran menggunakan Persamaan 2.21.

$$L4(\%) = \frac{AAS \times h_f \times C_p(T_f - T_a)}{HHV} \times 100 \quad (2.21)$$

Dengan

AAS : Aktual udara pembakaran (kg/kg bahan bakar)
 h_f : jumlah air pada udara (kg air/kg udara)
 C_p : *Specific heat of flue gas* (kCal/kg °C)
 T_f : Temperatur *flue gas* (°C)
 T_a : Temperatur ambient (°C)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena karbon yang tidak terbakar dalam batubara menggunakan Persamaan 2.22.

$$L5(\%) = \frac{\%CO \times C}{\%CO + \%CO_2} \times \frac{5744}{HHV} \times 100 \quad (2.22)$$

Dengan

%CO : Volume gas CO pada *flue gas*

%CO₂ : Volume gas CO₂ pada flue gas
 C : Kandungan karbon pada batubara
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena karbon yang tidak terbakar dalam batubara menggunakan Persamaan 2.23.

$$L6(\%) = \frac{\text{Total Radiation}}{HHV \times m_{\text{fuel}}} \times 100 \quad (2.23)$$

Dengan

m_{fuel} : laju aliran massa bahan bakar (t/h)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena panas sensibel pada *bottom ash* menggunakan Persamaan 2.24.

$$L7(\%) = \frac{xUcb \cdot MFrR + Hcba}{HHV} \times 100 \quad (2.24)$$

Dengan

$xUcb$: Perbandingan jumlah *bottom ash* terhadap keseluruhan abu yang dihasilkan
 MFrR : bobot residu abu yang tersisa dari proses pembakaran (kg/ kg bahan bakar)
 Hcba : nilai entalpi dari *bottom ash* (kJ/kg)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena panas sensibel pada *fly ash* menggunakan Persamaan 2.25.

$$L8(\%) = \frac{xUcf \cdot MFrR + Hcfa}{HHV} \times 100 \quad (2.25)$$

Dengan

$xUcf$: Perbandingan jumlah *fly ash* terhadap keseluruhan abu yang dihasilkan
 MFrR : bobot residu abu yang tersisa dari proses pembakaran (kg/kg bahan bakar)
 Hcfa : nilai entalpi dari *fly ash* (kJ/kg)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

Perhitungan kerugian karena terbentuknya karbon monoksida akibat pembakaran tidak sempurna menggunakan Persamaan 2.26.

$$L_{10} (\%) = \frac{23630 \text{ kJ} * DVpCO * MpCb / (DVpCO + DVpCO_2)}{HHV} \times 100 \quad (2.26)$$

Dengan

- MpCb : Persentase karbon yang terbakar per kg bahan bakar (%/kg bahan bakar)
 DVpCO : Konsentrasi gas CO pada keluaran *flue gas* setelah *air preheater* (%)
 DVpCO₂ : Konsentrasi gas CO₂ pada keluaran *flue gas* setelah *air preheater* (%)
 HHV : Nilai kalor tinggi batubara (kJ/kg bahan bakar)

2.9 Analisis Turbine heat rate

Turbine heat rate dapat dihitung berdasarkan dua pendekatan, yakni berdasarkan daya bruto (gross) dan daya bersih (net). *Gross Turbine heat rate* (GTHR) menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan oleh turbin dan generator untuk menghasilkan satu kWh listrik bruto. Sebagian dari energi listrik yang dihasilkan oleh generator akan digunakan untuk mengoperasikan peralatan internal pembangkit, seperti motor-motor. Kebutuhan energi ini dikenal sebagai konsumsi internal. Daya bersih (neto) suatu pembangkit diperoleh dari hasil pengurangan antara total daya keluaran generator dan konsumsi internal tersebut. Sementara itu, *Net Turbine heat rate* (NTHR) menunjukkan energi yang diperlukan untuk memproduksi satu kWh listrik bersih. Kedua parameter ini, baik GTHR maupun NTHR, menjadi ukuran penting dalam menilai efisiensi proses konversi energi dalam siklus uap dan air pada pembangkit listrik. Perhitungan GTHR menggunakan Persamaan 2.27, sedangkan perhitungan NTHR menggunakan Persamaan 2.28.

$$GTHR = \frac{(m_{ms} * h_{ms}) + (m_{mu} * h_{mu}) - (m_{fw} * h_{fw})}{Pg} \quad (2.27)$$

$$NTHR = \frac{(m_{ms} * h_{ms}) + (m_{mu} * h_{mu}) - (m_{fw} * h_{fw})}{Pg - Paux} \quad (2.28)$$

Dengan

- m_{ms} : laju aliran massa *main steam* (t/h)
 h_{ms} : entalpi *main steam* (kCal/kg)
 m_{mu} : laju aliran massa *make-up water* (t/h)
 h_{mu} : entalpi *make-upwater* (kCal/kg)
 m_{fw} : laju aliran massa *feedwater* (t/h)

h_{fw} : entalpi *feedwater* (kCal/kg)
 P_g : daya generator (kW)
 P_{aux} : daya pemakaian sendiri (kW)

2.10 Analisis *Plant heat rate*

Untuk mengukur efisiensi energi keseluruhan pada pembangkit, digunakan ukuran yang disebut *Plant heat rate*. Perhitungan dari *Plant heat rate* dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu berdasarkan daya bruto (gross) dan daya bersih (net). *Gross Plant heat rate* (GPHR) mengukur jumlah energi yang dibutuhkan oleh pembangkit listrik untuk memproduksi energi listrik dengan satuan kwh secara bruto, sedangkan NPHR menunjukkan jumlah energi yang dibutuhkan oleh pembangkit listrik untuk memproduksi energi listrik dengan satuan kwh secara net. Nilai dari *Plant heat rate* dipengaruhi oleh nilai *Turbine heat rate* dan efisiensi boiler yang digunakan. Semakin rendah nilai GPHR atau NPHR, semakin efektif pembangkit tersebut dalam menghasilkan tenaga listrik. Ada dua cara yang digunakan dalam menghitung *Plant heat rate*, yaitu dengan terlebih dahulu menghitung boiler efisiensi dengan metode *input-output* langsung dan metode berdasarkan kesetimbangan energi (Komarudin et al., 2020).

Perhitungan GPHR dengan metode langsung dapat dilakukan dengan merujuk pada Persamaan 2.29, sedangkan perhitungan NPHR dengan metode langsung menggunakan Persamaan 2.30.

$$\text{GPHR (kCal/kWh)} = \frac{m_{fuel} \cdot HHV}{P_g} \quad (2.29)$$

$$\text{NPHR (kCal/kWh)} = \frac{m_{fuel} \cdot HHV}{P_g - P_{aux}} \quad (2.30)$$

Dengan

m_{fuel} : laju aliran massa bahan bakar (t/h)

HHV : *High Heating Value* bahan bakar (kCal/kg)

P_g : daya generator (kW)

P_{aux} : daya pemakaian sendiri (kW)

Perhitungan *plant heat rate* dengan metode kesetimbangan energi diperoleh dari *turbine heat rate* dibagi boiler efisiensi dengan metode kerugian panas. Perhitungan GPHR dengan metode

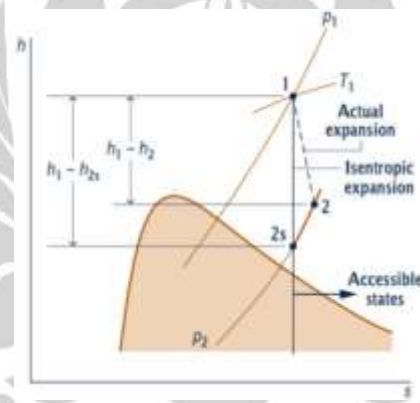
kesetimbangan energi menggunakan Persamaan 2.31, sedangkan perhitungan NPHR dengan metode kesetimbangan energi menggunakan Persamaan 2.32.

$$GPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{GTHR}{\text{Efisiensi Boiler dengan metode kerugian panas}} \quad (2.31)$$

$$NPHR \text{ (kCal/kWh)} = \frac{NTHR}{\text{Efisiensi Boiler dengan metode kerugian panas}} \quad (2.32)$$

2.11 Analisis Efisiensi Turbine Isentropik

Turbin uap digunakan untuk mengonversi energi panas dari uap hasil keluaran boiler menjadi energi gerak. Efisiensi isentropik pada turbin dinyatakan sebagai rasio antara *output* kerja nyata terhadap kerja teoritis. Ilustrasi perbandingan antara proses nyata dan proses ideal pada turbin uap ditampilkan dalam diagram h-s pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Proses ekspansi turbin uap pada diagram h-s
(Danial, 2019)

Posisi 2s pada Gambar 2.3 menunjukkan kondisi yang hanya tercapai jika tidak terdapat ketidakterbalikan di dalam sistem, dan kondisi ini dikenal sebagai proses ekspansi isentropik pada turbin. Dalam kenyataannya, selama ekspansi nyata di dalam turbin, nilai entalpi h_2 lebih besar daripada h_{2s} , yang menyebabkan kerja yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan dengan kondisi ideal. Selisih antara keduanya dapat dihitung menggunakan efisiensi isentropik turbin, sebagaimana dinyatakan dalam Persamaan 2.33.

$$\eta_T (\%) = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2s}) \cdot 100 \quad (2.33)$$

Dengan

- h1 : entalpi uap dari Boiler yang masuk turbin (kJ/kg)
h2 : entalpi uap keluar aktual turbin (kJ/kg)
h2s : entalpi uap keluar isentropik turbin (kJ/kg)

Metode interpolasi linier dimanfaatkan untuk menentukan nilai entropi pada kondisi keluaran turbin nyata yang berada dalam fase uap basah. Prosedur ini melibatkan pendekatan garis lurus antara dua titik referensi, yaitu (x_0, y_0) dan (x_1, y_1) .

2.12 Analisis Kinerja Air Preheater

Air Preheater (APH) sangat penting pada boiler sebagai alat penukar kalor karena energi panas dari hasil gas buang pembakaran boiler digunakan sebagai alat penukar kalor untuk menaikkan temperatur suhu udara yang akan masuk ke boiler sebagai pengaturan pembakaran (Chantasiriwan, 2022). Adapun tujuan digunakannya APH ini, yakni untuk memanfaatkan sumbu daya di boiler sehingga boiler semakin efisien. Nilai *Air Heater Leakage* (AHL) merepresentasikan persentase aliran gas yang masuk ke dalam APH. Perhitungan AHL dilakukan dengan menggunakan rumus yang tercantum dalam Persamaan 2.34.

$$AHL (\%) = \frac{O2_{out} - O2_{in}}{(20,9 - O2_{out})} \cdot 90 \quad (2.34)$$

Dengan

O2 out : konsentrasi oksigen yang terdapat dalam gas buang setelah melewati APH (%)

O2 in : kandungan oksigen dalam gas buang sebelum masuk ke APH (%)

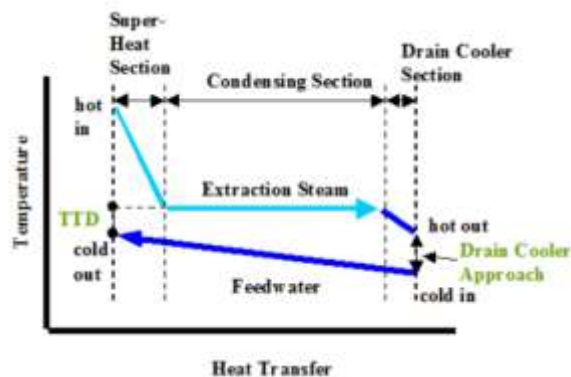
2.13 Analisis Kinerja feedwater Heater

Feedwater Heater (FWH) adalah item pada PLTU sebagai penukar kalor untuk meningkatkan suhu air yang akan dialirkan ke dalam boiler. Media pemanas menggunakan uap ekstraksi yang berasal dari turbin uap. Secara umum, area kerja pada FWH dibagi menjadi tiga zona termal utama yang memiliki fungsi berbeda:

- a. *Zona superheat/desuperheating*, Zona ini uap yang diambil dari turbin merupakan kondisi uap yang kering
- b. *Zona condensing*, Uap yang telah melewati tahap proses penurunan suhu uap kering hingga mencapai suhu jenuh ketika melewati tahap ini

- c. Zona *drain cooler/sub cooling*, tahap ini berfungsi untuk mengoptimalkan *heat transfer* yang telah mengalami proses penurunan suhu cairan hingga berada pada temperatur jenuh sebelum masuk ke boiler.

Proses perpindahan panas pada FWH terlihat pada gambar 2.4



Gambar 2.4 Grafik perpindahan panas pada *feedwater heater* (*Procedures for Routine Performance tests of Steam Turbines*, 1998)

Kinerja dari FWH biasanya dievaluasi menggunakan dua parameter utama, yaitu Terminal *Temperature Difference* (TTD) dan *Drain Cooler Approach* (DCA). Nilai TTD menggambarkan selisih antara temperatur jenuh dari uap ekstraksi dan temperatur air umpan yang keluar dari sisi *outlet* FWH. Nilai TTD yang lebih tinggi menandakan penurunan kinerja dari FWH. Sementara itu, DCA mengukur selisih antara suhu *drain* dengan suhu air pengumpan yang masuk ke FWH. Peningkatan nilai DCA juga menunjukkan adanya penurunan performa pada FWH (Madron & Rconciliation, 2015). Perhitungan TTD menggunakan Persamaan 2.35, sedangkan perhitungan DCA menggunakan Persamaan 2.36.

$$TTD = T_{sat} - T_{fwo} \quad (2.35)$$

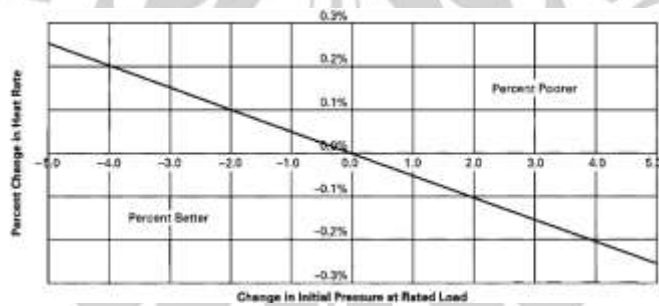
$$DCA = T_d - T_{fwi} \quad (2.36)$$

Dengan

Tsat : suhu jenuh dari uap hasil ekstraksi yang masuk FWH ($^{\circ}\text{C}$)
 Tfw_o : temperatur air umpan pada sisi *outlet* FWH($^{\circ}\text{C}$)
 Td : temperatur kondensat hasil pembuangan yang meninggalkan FWH($^{\circ}\text{C}$)
 Tfw_i : temperatur air umpan sisi *inlet* FWH ($^{\circ}\text{C}$)

2.14 Faktor Koreksi Perubahan Parameter Operasi Terhadap NPHR

Kurva koreksi NPHR adalah grafik yang disediakan oleh produsen pembangkit untuk melakukan penyesuaian terhadap nilai NPHR yang tercatat, akibat perubahan kondisi operasional yang terjadi dibandingkan dengan kondisi desain referensi. Pabrik pembangkit umumnya menyediakan kurva tersebut untuk berbagai parameter yang mempengaruhi kinerja pembangkit dalam operasionalnya. Contoh faktor koreksi NPHR akibat perubahan tekanan uap masuk turbin terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.5 Kurva koreksi perubahan persentase NPHR akibat perubahan nilai tekanan uap masuk turbin (*Procedures for Routine Performance Tests of Steam Turbines*, 1998)

2.15 Perubahan Biaya Bahan Bakar Akibat Perubahan *Heat Rate*

Biaya bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan listrik bersih yang sama akan terpengaruh langsung oleh fluktuasi pada parameter NPHR pembangkit. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya biaya bahan bakar antara lain meliputi NPHR, harga batubara, nilai kalori batubara, kapasitas daya bersih pembangkit (DMN), dan proyeksi *Capacity Factor* (CF). Dengan menggunakan rumus yang tercantum dalam Persamaan 2.37, perhitungan biaya bahan bakar untuk periode tahunan dapat dilakukan. Perubahan biaya bahan bakar yang disebabkan oleh fluktuasi dalam nilai *heat rate* selama periode yang sama dapat dihitung dengan menerapkan Persamaan 2.38

$$\text{Biaya BB} = \text{NPHR} \times \frac{\text{Harga BB}}{\text{HHV}} \times \text{DMN} \times \text{CF} \times 8760 \quad (2.37)$$

$$\Delta \text{ Biaya BB} = \Delta \text{ NPHR} \times \frac{\text{Harga BB}}{\text{HHV}} \times \text{DMN} \times \text{CF} \times 8760 \quad (2.38)$$

Dengan

Biaya BB : Total pengeluaran bahan bakar (Rp/tahun)

Δ Biaya BB : Selisih biaya bahan bakar (Rp/tahun)

NPHR : *Net Plant heat rate* (kcal/kwh)

Δ NPHR : Deviasi *Net Plant heat rate* (kcal/kwh)

Harga BB : Harga batubara (Rp/kg)

HHV : *High Heating Value* batubara (kcal/kg)

DMN : Daya Mampu Neto (MW)

CF : *Capacity Factor* (%)

2.16 *Payback Period*

Payback period (periode pengembalian modal) adalah metode yang digunakan untuk menghitung waktu yang diperlukan untuk mendapatkan kembali investasi awal dalam suatu proyek atau usaha, berdasarkan aliran kas masuk yang dihasilkan dari proyek tersebut. Tujuan dari metode ini adalah untuk mengukur tingkat risiko dan likuiditas dari suatu investasi.

Rumus dari *Payback Period* adalah sebagai berikut:

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Investasi Awal}}{\text{Aliran Kas per Periode}} \quad (2.40)$$

