

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit listrik dapat didefinisikan sebagai mesin atau rakitan peralatan yang menghasilkan dan mengirimkan aliran energi mekanik maupun elektrik. Peralatan utama untuk pembangkit tenaga listrik adalah generator. Ketika memasangkannya ke dalam siklus penggerak utama generator akan menghasilkan listrik. Tipe dari pembangkit listrik dibagi menjadi dua bagian yaitu pembangkit listrik konvensional yang terdiri dari *Steam Engines Power Plant*, *Steam Turbine Power Plant*, *Diesel Power Plant*, *Gas Turbine Power Plant*, *Hydro-Electric Power Plant*, dan *Nuclear Power Plant*. Tipe yang kedua adalah pembangkit listrik dengan tipe non-konvensional yang terdiri atas *Thermoelectric Generator*, *Therm-Ionic Generator*, *Fuel-Cells Power Plant*, *Photovoltaic Solar Cells Power System*, *MHD Power System*, *Fussion Reactor NPP Power System*, *Biogas*, *Biomass Energy Power System*, *Geothermal Energy*, *Wind Energy Power System*, *Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)*, *Wave and Tidal Wave*, dan *Energy Plantation Scheme* (Raja et al., 2006).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap atau biasa disebut dengan PLTU merupakan sistem pembangkit yang mengkonversikan energi kimia listrik dengan menggunakan fluida kerja berupa air, cara kerjanya memanfaatkan energi kinetik uap untuk menggerakkan poros sudu-sudu turbin yang kemudian selanjutnya poros turbin dikopel dengan poros generator sehingga dapat menggerakkan generator. PLTU memiliki beberapa komponen peralatan mulai dari boiler, generator, turbin, trafo, kompresor, dan masih banyak lagi dengan jenis yang berbeda-beda (Simanjuntak & Amien, 2015).

Pembangkit Listrik Tenaga Uap Muara Jawa adalah salah satu pembangkit swasta (*Independent Power Plant / IPP*) yang dioperasikan oleh PT Indo Ridlatama Power yang berlokasi di daerah Muara Jawa Pesisir, Muara Jawa, Kutai Kartanegara. PLTU Muara Jawa memiliki dua unit pembangkit listrik dengan kapasitas pembangkitan kotor (*Gross Production*) masing-masing sebesar 33000

kW. Listrik dari PLTU Muara Jawa ini digunakan untuk keperluan listrik di kawasan kota Balikpapan, Tenggarong, Samarinda, dan Bontang yang di ekspor melalui jaringan listrik 150 kV Mahakam.



Gambar 2.1 PLTU Muara Jawa (PT Indo Ridlatama Power, 2019)

Saat ini PT Indo Ridlatama Power mengoperasikan PLTU 2x27,5 MW di daerah Muara Jawa yang selanjutnya kapasitas pembangkitan akan dikembangkan menjadi empat unit. Pembangkit ini merupakan pembangkit listrik yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakarnya, dengan konfigurasi dari pembangkitan adalah tiga boiler dan dua turbin dimana satu boiler menjadi cadangan.

Turbin uap pada pembangkit listrik Muara Jawa merupakan buatan *Dongfang Turbine* dengan kode N33-8.83. Turbin ini dikopel dengan generator dengan putaran 3000 rpm dan tegangan keluar sebesar 10,5 kV (PT Indo Ridlatama Power, 2019).

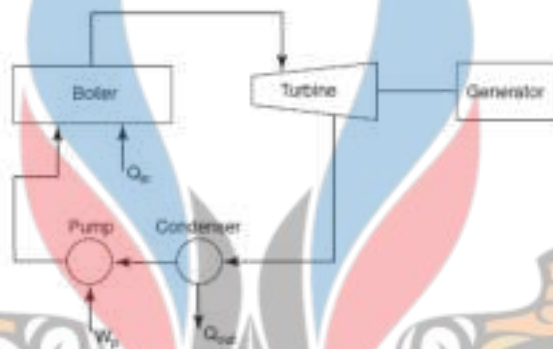
2.2. Siklus Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Secara umum siklus pembangkit listrik dikelompokkan menjadi dua siklus sebagai berikut:

1. Siklus pembangkit uap yang terdiri dari siklus *carnot*, siklus *rankine*, siklus *regeneratif*, siklus *reheat*, dan siklus uap *binary*.

2. Siklus pembangkit gas yang terdiri dari siklus *otto*, siklus *diesel*, siklus *dual combustion*, dan siklus turbin gas (Raja et al., 2006).

Siklus pembangkit uap paling sederhana disebut dengan siklus *Rankine* yang berasal dari kinerja mesin uap. Siklus uap menjadi penting karena menghubungkan proses yang memungkinkan dari panas sehingga dapat dikonversikan kembali secara terus menerus. Siklus sederhana ini didasari pada uap jenuh kering yang dipasok oleh boiler ke daya unit seperti turbin yang menggerakkan generator listrik. Uap dari turbin mengalir ke sebuah kondensor, yang kemudian uap dikondensasi dan di pompa kembali ke dalam boiler yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.

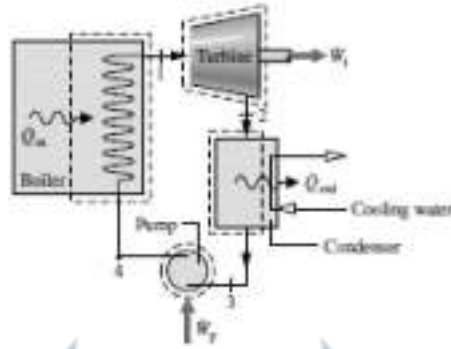


Gambar 2.2 Siklus Sederhana PLTU (Woodruff et al., 2005)

Gambar 2.2 menunjukkan pada (Q_{in}) yang disuplai ke dalam boiler dan generator yang terhubung dengan turbin akan menghasilkan listrik. Panas (Q_{out}) dilepaskan oleh kondensor, dan persediaan energi pompa (W_p) ke air umpan diberikan dalam bentuk peningkatan tekanan pada air sehingga dapat mengalir ke dalam boiler (Woodruff et al., 2005).

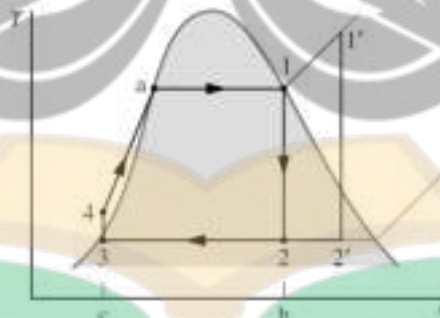
2.2.1. Siklus *Rankine*

Siklus *rankine* merupakan siklus teoritis yang paling sederhana pada siklus ini menggunakan fluida kerja yaitu air dengan prinsip kerja mengubah panas uap menjadi kerja mekanik. Siklus *rankine* merupakan siklus hasil modifikasi dari siklus *carnot* dengan proses pemanasan dan pendinginan pada siklus ini terjadi dengan tekanan yang diasumsikan tetap. Pada siklus *rankine* komponen-komponen utama yang bekerja pada siklus dapat dilihat seperti Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Skema Siklus *Rankine* (M. J. Moran & Shapiro, 2006)

Gambar 2.3 adalah skema dari siklus *rankine* sederhana yang memiliki komponen mesin yang terdiri dari boiler, turbin, kondensor, dan pompa. Siklus *rankine* adalah siklus yang memiliki fluida kerja berupa air. Apabila fluida kerja melewati berbagai komponen tanpa *irreversibilitas*, penurunan tekanan karena adanya gesekan pada pipa boiler dan kondensor diabaikan. Fluida kerja yang mengalir melalui komponen-komponen pada tekanan konstan, juga dengan tidak adanya *irreversibilitas* dan perpindahan panas yang terjadi dengan lingkungan, serta proses yang melalui turbin dan pompa akan menjadi isentropik. Siklus yang sangat ideal ini adalah siklus *rankine* ideal yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Temperatur-Entropi Diagram Dari Siklus *Rankine* Ideal (M. J. Moran & Shapiro, 2006)

Gambar 2.4 diketahui bahwa fluida kerja mengalami serangkaian perubahan internal yang meliputi perubahan tekanan maupun perubahan wujud yaitu :

1. Proses 1-2 ataupun 1'-2 adalah ekspansi reversibel adiabatik yang melalui turbin. Uap keluar dari turbin pada kondisi 2 atau 2' biasanya memiliki dua fase. Proses ini adalah proses ekstraksi turbin menuju kondensor.

2. Proses 2-3 ataupun 2'3 adalah pembuangan panas didalam kondensor pada temperatur dan tekanan yang konstan, selama proses ini fluida kerja dalam keadaan campuran dua fase.
3. Proses 3-4 adalah proses reversibel adiabatik pada pompa. Fluida kerja di pompa dari tekanan kondensat pada kondisi 3 ke cairan sub-dingin pada tekanan pembangkit uap hingga mencapai kondisi 4. Garis 3-4 vertikal dalam diagram T-s dikarenakan fluida secara esensial adalah tidak mampat dan pemompaan dilakukan secara reversibel adiabatik. Proses ini adalah proses pemompaan fluida kondensat menuju boiler untuk kemudian dipanaskan.
4. Proses 4-1 atau 4-1' adalah pemasukan panas pada tekanan yang konstan dalam pembangkit uap, pemasukan panas terjadi sebelum masuk ke dalam boiler. Garis 4-A-1-1' adalah garis tekanan konstan.
5. Proses 4-A menunjukkan perubahan cairan sub-dingin pada kondisi 4 menjadi uap jenuh pada kondisi A. Proses 4-A dalam pembangkit uap disebut dengan ekonomiser.
6. Proses A-1 adalah pemanasan fase cair jenuh ke fase uap jenuh pada tekanan dan temperatur yang konstan dimana pada proses ini fluida kerja masih berada dalam keadaan campuran dua fase, dan proses A-1 dalam pembangkit uap disebut dengan boiler.
7. Proses 1-1' dalam siklus *superheat*, menunjukkan pemanasan uap jenuh pada kondisi 1 ke kondisi 1'. Pada kondisi 1-1' dalam pembangkit uap disebut dengan *superheater* atau pemanas lanjut.

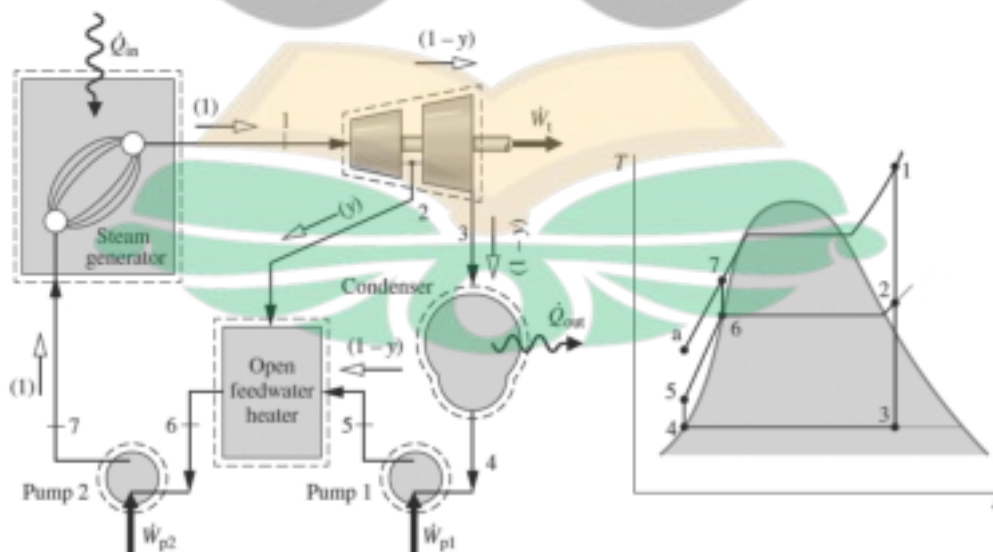
Pada kondisi yang sebenarnya, kompresi yang dilakukan oleh pompa maupun ekspansi yang dilakukan turbin tidak terjadi secara isentropik. Namun demikian, *irreversibilitas* yang menyebabkan entropi meningkat selama proses berlangsung. Hal ini menyebabkan peningkatan pada daya pompa yang dibutuhkan dan mengurangi energi yang dihasilkan oleh ekspansi pada turbin akibat proses kondensasi. Titik-titik air akan merusak turbin sehingga menyebabkan korosi maupun erosi pada sudu turbin dan mengurangi usia turbin serta dapat menurunkan efisiensi kerja dari turbin (M. J. Moran & Shapiro, 2006).

2.2.2. Siklus Rankine Regeneratif

Siklus *rankine regeneratif* merupakan modifikasi dari siklus *rankine* dengan fluida kerja berupa air yang dinaikkan kembali temperaturnya dengan memanfaatkan uap hasil ekstraksi dari turbin sehingga kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida kerja pada boiler dapat dikurangi, sehingga hal ini dapat meningkatkan efisiensi dari siklus.

Regenerasi tidak hanya dapat meningkatkan efisiensi dari siklus tetapi juga merupakan salah satu cara deaerasi. Deaerasi merupakan penghilangan kadar oksigen didalam air yang apabila kadar oksigen tersebut dibiarkan akan menyebabkan korosi pada jalur perpipaan. Proses dari regenerasi umumnya dengan menggunakan alat yang disebut dengan *Feedwater Heater*. Prinsip kerja dari *Feedwater Heater* sama seperti *Heat Exchanger*. *Feedwater Heater* terbagi menjadi dua jenis yaitu tipe *Feedwater Heater* terbuka dan tipe *Feedwater Heater* tertutup. *Open Feedwater Heater* biasa disebut dengan pemanas kontak langsung memiliki prinsip kerja sebagai sebuah ruangan antara uap ekstraksi dengan fluida kerja berupa air. *Close Feedwater Heater* biasa disebut dengan pemanas sistem tertutup memiliki prinsip kerja sebagai alat yang memindahkan panas dari uap hasil ekstraksi ke fluida kerja berupa air tanpa terjadi kontak langsung (Satiti, 2015).

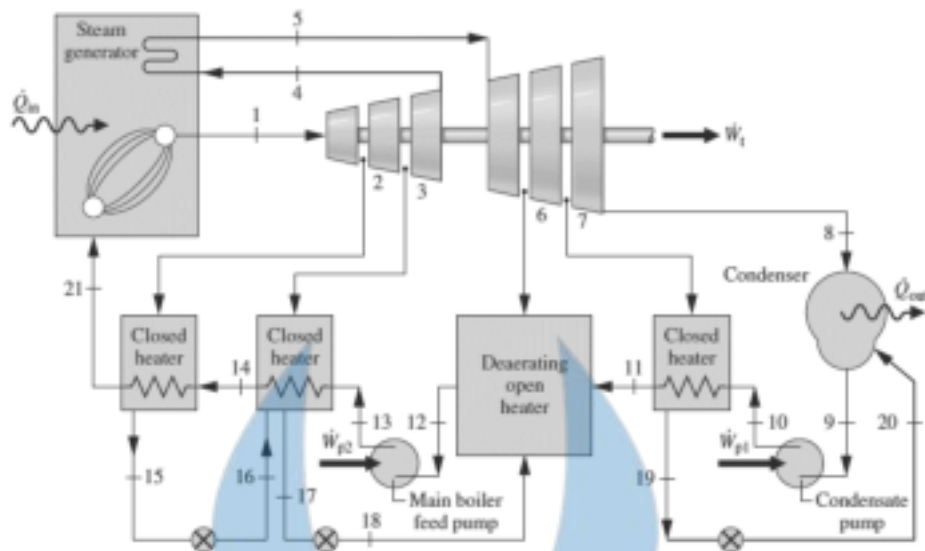
Siklus *rankine regeneratif* dengan *Open Feedwater Heater* secara garis besar dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Siklus dan T-s diagram dari *Rankine Regeneratif* Dengan Satu *Open Feedwater Heater* (Michael J. Moran et al., 2014)

Gambar 2.5 dapat diketahui pada *Open Feedwater Heater* terjadi kontak langsung dimana aliran pada temperatur yang berbeda bercampur untuk membentuk aliran pada temperatur menengah. Siklus ini berlangsung dengan fluida kerja lewat secara isentropis melalui tahap turbin dan pompa, serta aliran melalui generator uap, kondensor, dan pemanas air umpan dengan tanpa adanya *pressure drop* pada setiap komponen. Siklus ini dimulai dengan masuknya uap pada turbin tahap pertama di kondisi 1 kemudian mengalir ke turbin tahap 2, sebagian kecil dari total aliran diekstraksi ke dalam *Open Feedwater Heater* yang beroperasi pada tekanan ekstraksi (p_2). Sisa uap mengalir melalui tahap kedua turbin ke kondisi 3. Bagian ini terdiri dari total aliran yang akan dikondensasi menjadi cairan jenuh pada kondisi 4, kemudian di pompa ke tekanan ekstraksi dan dimasukkan ke dalam *Open Feedwater Heater* pada kondisi 5. Aliran campuran tunggal keluar dari *Open Feedwater Heater* pada kondisi 6 dengan laju aliran massa dari aliran yang memasuki pemanas air umpan terbuka tetap dijaga sehingga memiliki tekanan aliran keluar pemanas air umpan terbuka yang berbentuk cairan jenuh pada tekanan yang sama dengan tekanan ekstraksi. Cairan pada kondisi 6 kemudian di pompa ke tekanan pembuatan uap dan memasuki boiler pada kondisi 7 yang kemudian fluida kerja dipanaskan dari kondisi 7 ke kondisi 1 dalam boiler (M. J. Moran & Shapiro, 2006).

Efisiensi panas dari siklus dapat ditingkatkan dengan menambahkan beberapa *Feedwater Heater* yang digunakan berdasarkan pertimbangan ekonomis. Gambar 2.6 merupakan *Feedwater Heater* bertingkat yang terdiri dari *Close Feedwater Heater* dan *Open Feedwater Heater*.



Gambar 2.6 Skema Siklus *Rankine Regeneratif Multiple Feedwater Heater* (Michael J. Moran et al., 2014)

Penentuan jumlah pemanas yang digunakan, jenis pemanas, dan tekanan saat beroperasi ditentukan dengan menggunakan program komputer dengan mensimulasikan kinerja termodinamika dan ekonomi desain yang berbeda. Gambar 2.6 menunjukkan tata letak pembangkit listrik dengan tiga *Close Feedwater Heater* dan satu *Open Feedwater Heater*. Pembangkit listrik dengan beberapa pemanas air umpan biasanya memiliki setidaknya satu *Open Feedwater Heater* yang beroperasi pada tekanan lebih besar daripada tekanan atmosfer sehingga oksigen dan gas yang terlarut dapat dikeluarkan dari siklus (M. J. Moran & Shapiro, 2006).

2.3. Hukum I Termodinamika

Hukum I termodinamika memperkenalkan konsep energi dalam dan menghasilkan prinsip kekekalan energi (Hetharia & Lewerissa, 2018). Hukum I termodinamika membahas tentang kekekalan energi dimana energi tidak dapat diciptakan maupun dihancurkan (Ismantoro, 2016). Karena energi tidak dapat diciptakan, energi pasti dipasok dari beberapa sumber energi lain. Hukum I termodinamika dapat dinyatakan sebagai suatu sistem yang menggunakan siklus termodinamika maka panas bersih yang disuplai ke sistem dari lingkungan sama dengan kerja bersih yang dilakukan oleh sistem pada lingkungan atau dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\oint dQ = \oint dW \quad (2.1)$$

(Rajput, 2007)

Di mana \oint mewakili jumlah dari siklus. Hukum I termodinamika tidak dapat dibuktikan secara analitis, tetapi bukti eksperimental telah berulang kali mengkonfirmasi validasinya, dan karena tidak ada fenomena yang bertentangan yang terjadi sehingga hukum I termodinamika diterima sebagai hukum alam. Dapat dikatakan bahwa tidak ada batasan yang diberlakukan yang dapat membatasi penerapan hukum I termodinamika ini pada transformasi energi reversibel. Karena itu, hukum I termodinamika ini berlaku untuk transformasi reversibel maupun ireversibel. Hukum I termodinamika juga dapat dinyatakan sebagai panas dan kerja yang saling bertukar namun karena energi tidak dapat diciptakan atau dihancurkan, sehingga energi total yang terkait dengan konversi energi tetap ada dan konstan. Hukum I termodinamika dapat dinyatakan juga dengan tidak ada mesin yang dapat menghasilkan energi tanpa pengeluaran yang sesuai, sehingga tidak mungkin untuk membangun mesin gerak abadi (Rajput, 2007).

Hukum I termodinamika tidak memberikan informasi mengenai arah suatu proses yang sedang berlangsung, yaitu proses berlangsung secara reversibel atau proses berlangsung secara ireversibel. Hukum I termodinamika juga tidak menjelaskan rugi-rugi yang terjadi pada proses konversi energi (Ismantoro, 2016).

Menurut Kyle Kirkland hukum I termodinamika menyatakan bahwa perubahan dalam energi internal suatu objek sama dengan panas yang mengalir masuk ataupun keluar objek, dikurangi dengan kerja objek di sekitar lingkungannya. Sebuah objek kehilangan energi dengan melakukan suatu pekerjaan atau dikarenakan panas mengalir keluar, dan objek mendapatkan energi jika aliran panas ke dalamnya atau pekerjaan dilakukan objek. Semua benda yang bergerak memiliki energi, yang disebut dengan energi kinetik, tetapi energi tersebut tidak dapat dilihat karena atom dan molekul sangat kecil. Namun energi ada, hukum I termodinamika menjelaskan semua energi bertransformasi, yang meliputi gerakan tidak teratur yang dikarenakan adanya gesekan (Kirkland, 2007).

Ketika suatu proses dilakukan oleh suatu sistem, perubahan dalam energi yang tersimpan dalam sistem adalah sama dengan interaksi panas netto dikurangi interaksi kerja netto selama proses berlangsung

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad (2.2)$$

$$\Delta E = Q - W \text{ atau } Q = \Delta E + W \quad (2.3)$$

$$\int_1^2 d(Q - W) = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (2.4)$$

(Rajput, 2007)

Jika energi listrik, magnetik, dan kimia tidak ada dan perubahan potensial dan energi kinetik untuk sistem tertutup diabaikan, persamaan diatas dapat dituliskan sebagai:

$$\int_1^2 d(Q - W) = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (2.5)$$

$$Q - W = \Delta U = U_2 - U_1 \quad (2.6)$$

(Rajput, 2007)

Secara umum, ketika panas ditambahkan ke suatu sistem suhunya naik dan pekerjaan eksternal dilakukan karena peningkatan volume dari sistem. Kenaikan temperatur merupakan indikasi peningkatan energi internal. Panas yang ditambahkan ke dalam sistem akan dianggap sebagai positif dan panas dihilangkan atau ditolak dari sistem dianggap sebagai negatif.

Sistem yang terisolasi adalah sistem dimana tidak ada interaksi sistem ke lingkungan. Sehingga sistem yang terisolasi dapat dinyatakan sebagai

$$dQ = 0 \text{ dan } dW = 0 \quad (2.7)$$

(Rajput, 2007)

Hukum I termodinamika menyebutkan

$$dE = 0 \quad (2.8)$$

$$E = \text{constant} \quad (2.9)$$

(Rajput, 2007)

Energi dari sistem yang terisolasi selalu konstan (Rajput, 2007).

2.4. Hukum II Termodinamika

Diketahui bahwa energi dapat mengalir dari suatu sistem dalam bentuk panas maupun kerja. Hukum I termodinamika tidak membatasi jumlah total dari energi sistem yang dapat terjadi selama dilakukan pekerjaan. Namun, batasan diberlakukan pada hukum II termodinamika yang menyatakan bahwa panas akan

mengalir secara alami dari satu energi ke *reservoir* yang lain pada temperatur yang lebih rendah, tetapi tidak terjadi dalam aliran yang berlawanan. Hukum I termodinamika hanya menetapkan kesetaraan antara kuantitas panas yang digunakan dengan kerja mekanik yang terjadi namun tidak menentukan dimana konversi panas memungkinkan menjadi suatu pekerjaan, ataupun arah perpindahan panas yang dapat terjadi. Hal tersebut dibahas pada hukum II termodinamika (Rajput, 2007).

Di antara banyaknya pernyataan tentang hukum II termodinamika, terdapat dua yang sering digunakan dalam rekayasa termodinamika. Pernyataan hukum termodinamika itu adalah dari pernyataan Clausius dan Kelvin-Planck (M. J. Moran & Shapiro, 2006). Hukum II termodinamika memberikan batasan-batasan terhadap perubahan energi dari hukum kekekalan energi yang disebutkan dalam hukum I termodinamika yang menyatakan bahwa energi dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Akan tetapi, pada hakikatnya tidak semua perubahan energi yang terjadi di alam prosesnya dapat dikembalikan seperti yang disebutkan pada hukum I termodinamika. Hukum II termodinamika memberikan batasan-batasan terhadap perubahan energi yang mungkin terjadi pada beberapa permasalahan. Batasan-batasan tersebut antara lain yang disebutkan oleh Kelvin-Planck yaitu tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam satu siklus, menerima kalor dari sebuah *reservoir* dan mengubah seluruhnya menjadi energi atau usaha, kemudian pernyataan yang diberikan oleh Clausius yaitu tidak mungkin membuat mesin yang bekerja dalam suatu siklus mengambil kalor dari sebuah *reservoir* yang rendah dan memberikan pada *reservoir* yang bertemperatur lebih tinggi tanpa memerlukan usaha dari luar dan Clausius menyatakan pada proses reversibel, total entropi alam semesta tidak berubah dan akan bertambah ketika terjadi proses ireversibel. Hukum II termodinamika menjelaskan tidak adanya *reversibilitas* dan menurut para ilmuwan merumuskan prinsip baru bahwa kalor akan mengalir secara alami dari benda yang bertemperatur tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, kalor tidak akan mengalir secara spontan dari benda bertemperatur rendah ke benda yang memiliki temperatur yang lebih tinggi (College Loan Consolidation, 2014).

2.5. Energi

Energi adalah ukuran dari kesanggupan suatu benda untuk dapat melakukan suatu kerja. Energi berasal dari bahasa Yunani *energia* yang berarti kemampuan untuk mengerjakan kerja. Energi merupakan besaran yang kekal, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dihancurkan, tetapi energi dapat untuk diubah dari suatu bentuk menjadi bentuk yang lain namun tidak merubah jumlah dan besar energi secara keseluruhan (Waluyo, 2013).

Energi memanifestasikan dirinya dalam banyak bentuk, yang bersifat internal atau sementara. Energi dapat dikonversi dari satu bentuk ke bentuk lainnya. Dalam analisis termodinamika, bentuk-bentuk energi dapat diklasifikasikan ke dalam dua kelompok: makroskopis dan mikroskopis. Bentuk energi makroskopis adalah yang dimiliki oleh keseluruhan sistem sehubungan dengan kerangka referensi, misalnya energi kinetik dan potensial. Sebagai contoh, energi makroskopis dari objek yang naik berubah dengan kecepatan dan ketinggian. Energi makroskopis dari suatu sistem terkait dengan gerak dan pengaruh efek eksternal seperti gravitasi, magnetisme, listrik, dan tegangan permukaan.

Energi yang dimiliki suatu sistem sebagai akibat dari gerakannya relatif terhadap beberapa kerangka acuan adalah energi kinetik. Kinetis energi mengacu pada energi sistem karena gerakannya 'keseluruhan', baik translasi atau rotasi.

Bentuk energi mikroskopis adalah yang terkait dengan struktur molekul suatu sistem dan tingkat molekul aktivitas, dan tidak tergantung dari kerangka referensi luar. Jumlah semua bentuk energi mikroskopis dari suatu sistem adalah energi internalnya. Energi internal suatu sistem tergantung pada kualitas yang melekat, atau sifat, dari bahan di sistem, seperti komposisi dan bentuk fisik, serta variabel lingkungan (suhu, tekanan, listrik medan, medan magnet, dan lain-lain). Energi internal dapat memiliki banyak bentuk, termasuk mekanik, kimia, listrik, magnet, permukaan, dan termal.

Konsep termodinamika menyebutkan bahwa perubahan nilai dari jumlah termodinamika, seperti energi internal, antara dua keadaan keseimbangan sistem tidak bergantung pada jalur termodinamika yang diperlukan sistem untuk berpindah dari satu kondisi ke kondisi yang lain. Perubahan ditentukan melalui awal dan akhir dari keadaan keseimbangan pada sistem. Akibatnya, perubahan energi internal

suatu sistem dalam kondisi awal dan akhir ditentukan dari parameter sistem. Parameter sistem meliputi tekanan, temperatur, medan magnet, tegangan permukaan, massa, luas, dan lain-lain (Dincer & Rosen, 2007).

2.6. Eksergi

Hukum II termodinamika dikenal juga sebagai hukum degradasi energi yang dinyatakan bahwa tidak ada proses perubahan energi yang efisien sehingga pasti akan terjadi penurunan kualitas energi didalamnya, kualitas energi ini disebut dengan eksergi. Eksergi dapat ditransfer antar sistem dan dapat dihancurkan oleh *irreversibilitas* didalam sistem (Hetharia & Lewerissa, 2018).

Eksergi merupakan energi yang dapat dimanfaatkan atau ukuran dari ketersediaan energi untuk melakukan pekerjaan. Eksergi dari suatu sumber daya memberikan indikasi bahwa besar kerja yang dapat dilakukan oleh sumber daya tersebut pada suatu lingkungan tertentu. Secara eksplisit konsep dari eksergi memperlihatkan kegunaan atau kualitas dari suatu energi dan zat sebagai tambahan selain digunakan dalam konversi dan perpindahan energi (Pallea et al., 2019).

Eksergi juga dapat didefinisikan sebagai kerja maksimum yang mampu dilakukan oleh sistem terhadap lingkungan sistem. Lingkungan dispesifikasikan menjadi kondisi temperatur, tekanan, dan kondisi kimia. Eksergi dari suatu sistem akan meningkat apabila terjadi kerja pada sistem. Perpindahan eksergi terjadi bersamaan dengan perpindahan panas yang berlangsung tergantung dari temperatur sistem terhadap temperatur lingkungan (Phanama et al., 2019).

Kata eksergi berasal dari bahasa Yunani yaitu *ex* dan *ergon* yang memiliki arti dari (*from*) dan kerja (*work*). Eksergi dapat juga didefinisikan sebagai kerja maksimum yang mampu dilakukan oleh suatu sistem terhadap lingkungan di sekitar sistem. Eksergi dari suatu sistem akan meningkat jika terjadi kerja pada sistem dan akan kekal hanya ketika semua proses dari sistem dan lingkungan dalam keadaan reversibel. Namun, eksergi dapat dihancurkan bila terjadi sebuah proses ireversibel. Eksergi memiliki sifat yang sama dengan energi yang dapat berpindah melewati batas dari sebuah sistem. Perpindahan eksergi berlangsung bersama dengan perpindahan panas yang terjadi tergantung temperatur sistem terhadap temperatur dari lingkungan (Ismantoro, 2016).

Beberapa karakteristik eksergi adalah sebagai berikut:

1. Sebuah sistem dalam keseimbangan dengan lingkungannya tidak memiliki eksergi. Tidak ada perbedaan yang muncul di temperatur, tekanan, konsentrasi, dan lain-lain sehingga tidak ada kekuatan untuk melakukan proses apa pun.
2. Eksergi suatu sistem semakin meningkat dari lingkungan. Misalnya, jumlah tertentu air panas memiliki kandungan eksergi yang lebih tinggi selama musim dingin daripada di hari musim panas. Satu balok es hanya membawa sedikit eksergi di musim dingin sementara itu dapat memiliki eksergi yang signifikan di musim panas.
3. Ketika energi kehilangan kualitasnya, eksergi dihancurkan. Eksergi adalah bagian dari energi yang berguna dan karenanya memiliki nilai ekonomi dan layak dikelola dengan hati-hati.
4. Eksergi menurut definisi tidak hanya bergantung pada kondisi sistem atau aliran, tetapi juga pada kondisi lingkungan.
5. Efisiensi eksergi adalah ukuran pendekatan terhadap idealitas (atau *reversibilitas*).
6. Eksergi umumnya dapat dianggap sebagai sumber daya yang berharga. Ada sumber daya energi dan non-energi dan eksergi diamati sebagai ukuran nilai untuk keduanya.
7. Bentuk energi dengan kandungan eksergi tinggi biasanya lebih dihargai dan bermanfaat daripada bentuk energi dengan eksergi rendah.

Tabel 2.1 Perbandingan Energi dan Eksergi *)

Energi	Eksergi
Bergantung pada hanya sifat aliran materi atau energi, dan tidak tergantung pada sifat lingkungan.	Bergantung pada sifat materi atau aliran energi dan lingkungan.
Memiliki nilai yang berbeda dari nol ketika berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan.	Setara dengan nol ketika dalam keadaan <i>steady state</i> karena berada dalam keseimbangan penuh dengan lingkungan.

Energi	Eksergi
Tidak dapat dihancurkan atau diproduksi.	Tidak dapat dihancurkan atau diproduksi dalam proses yang dapat dibalik, tetapi selalu dihancurkan (dikonsumsi) dalam proses yang tidak dapat dibalikkan.
Muncul dalam banyak bentuk (Energi kinetik, energi potensial, pekerjaan, panas).	Muncul dalam banyak bentuk (Eksergi kinetik, potensi eksergi, kerja, eksergi termal), dan diukur berdasarkan pekerjaan atau kemampuan untuk menghasilkan pekerjaan.
Ukuran kuantitas saja.	Ukuran kuantitas dan kualitas.

*) Dincer & Rosen, 2007

2.7. Analisis Efisiensi Energi, Efisiensi Eksergi dan Laju Kerusakan Eksergi Komponen Mesin PLTU

Energi dan eksergi merupakan suatu yang yang berbeda. Analisis efisiensi dari energi menerapkan konsep hukum I termodinamika yang semua bentuk energi sama nilainya. Analisis eksergi dilakukan lebih dari analisis energi, analisis eksergi menerapkan hukum I termodinamika dan hukum II termodinamika. Kondisi aktual dari sistem, eksergi akan mengalami kerusakan dari sebagian ataupun keseluruhannya karena ada *irreversibilitas* pada sistem. Analisis eksergi dilakukan untuk menunjukkan ketidakidealan dari sebuah proses (*irreversibilitas*), termasuk kehilangan dari massa dan energi. Diketahui bahwa energi tidak dapat dihilangkan dan dimusnahkan yang merupakan pernyataan dari hukum I termodinamika. Energi bersifat kekal dengan ada kemungkinan perpindahan energi ke lingkungan. Namun energi yang berpindah ke lingkungan adalah energi yang sia-sia (Ismantoro, 2016).

Analisis eksergi dapat dilakukan dengan mengevaluasi eksergi dan pertukaran eksergi pada sistem tertutup dan sistem *steady state* terbuka, seperti analisis pada proses perpindahan kalor yang mengevaluasi kesetimbangan eksergi pada setiap kondisi aliran dari fluida. Laju eksergi \dot{E}_x berkaitan dengan laju

perpindahan panas \dot{Q}_i (Phanama et al., 2019) yang dapat dihitung dengan Persamaan

$$\dot{E}_x = \int_A \left(\frac{T - T_0}{T} \right) \cdot \dot{Q}_i dA \quad (2.10)$$

$$\dot{E}_x = \dot{Q}_A \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \quad (2.11)$$

(Phanama et al., 2019)

Total eksergi dari suatu sistem dapat dibagi menjadi empat komponen yaitu

$$E_x = E_x^{PH} + E_x^{KN} + E_x^{PT} + E_x^{CH} \quad (2.12)$$

Untuk sistem yang diam relatif terhadap lingkungan dapat diketahui bahwa

$$E_x^{KN} = E_x^{PT} = 0 \quad (2.13)$$

Dari Persamaan 2.13 diketahui bahwa besaran total yang dapat dihitung pada masing-masing aliran adalah sebagai berikut

$$E_x = E_x^{PH} + E_x^{CH} \quad (2.14)$$

Eksergi fisik pada suatu aliran ditentukan dari nilai temperatur dan tekanannya. Apabila sistem dalam keadaan tertutup persamaan eksergi yang dapat dijelaskan adalah sebagai berikut

$$E_x^{PH} = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(S - S_0)] \quad (2.15)$$

(Phanama et al., 2019)

Eksergi kimiawi merupakan eksergi yang ditentukan dari perubahan senyawa kimia dalam aliran yang dapat dihitung dengan Persamaan

$$E_x^{CH} = \dot{m} \cdot e_x^{CH} \quad (2.16)$$

Berdasarkan spesifikasi lingkungan eksergi kimia dapat juga ditulis sebagai berikut

$$E_x^{CH} = \sum_{i=1}^n x_i E_x^{CH} + \bar{R}T_0 \sum_{i=1}^n x_i \ln x_i \quad (2.17)$$

(Phanama et al., 2019)

Nilai eksergi kimia dari uap E_S^{CH} dan air E_W^{CH} berturut-turut adalah sebesar 526,33 kJ/kg dan 49,12 kJ/kg (Szargut et al., 1988).

$$E_{xFuel}^{CH} = \beta \cdot GCV \quad (2.18)$$

Nilai rasio eksergi dari bahan bakar hidrokarbon β terhadap nilai dari GCV bahan bakar (Kotas, 2013) dapat dihitung dengan Persamaan

$$\beta = 1,0437 + 0,1882 \left(\frac{H}{C}\right) + 0,0610 \left(\frac{O}{C}\right) + 0,0404 \left(\frac{N}{C}\right) \quad (2.19)$$

(Phanama et al., 2019)

Persamaan 2.19 hanya berlaku apabila rasio oksigen terhadap karbon kurang dari 0,667. Eksergi yang hilang dapat dihitung untuk mencari ketidakefisienan dari suatu sistem pembangkit. Nilai eksergi yang hilang pada suatu sistem komponen mesin dapat dicari dengan mencari selisih antara eksergi yang masuk dengan eksergi yang keluar.

$$E_{xD} = E_{xin} - E_{xout} \quad (2.20)$$

(Phanama et al., 2019)

Besar eksergi yang masuk, eksergi yang keluar, dan eksergi yang hilang pada komponen mesin PLTU perlu dilakukan perhitungan terhadap aliran yang masuk dan keluar tiap komponen (Bejan et al., 1995).

Apabila suatu sistem terjadi proses ireversibel maka pada sistem akan terjadi kerusakan eksergi pada komponen. Kerusakan tersebut dapat dihitung dengan menggunakan selisih antara eksergi yang masuk dan eksergi yang keluar dari sistem.

$$y_D = \frac{E_D}{E_{Ftot}} \quad (2.21)$$

(Phanama et al., 2019)

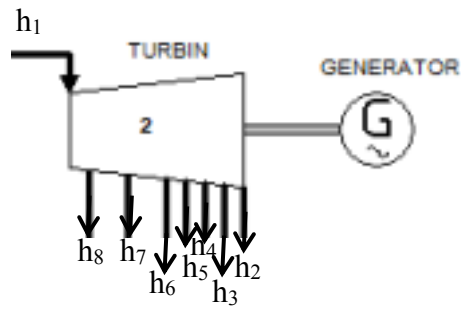
Persamaan 2.21 menunjukkan rasio dari kerusakan eksergi yang merupakan perbandingan antara laju kerusakan eksergi didalam komponen mesin terhadap laju eksergi dari bahan bakar yang digunakan oleh sistem. Efisiensi eksergi merupakan rasio dari hasil kerja terhadap bahan bakar yang digunakan yang dapat dituliskan dengan Persamaan

$$\eta_{ii} = \frac{E_x^{PH}}{E_x^{CH}} = 1 - \frac{E_{xD}}{E_{xFtot}} \quad (2.22)$$

(Phanama et al., 2019)

2.7.1. Analisis Turbin Uap

Turbin adalah mesin yang berputar dengan mengambil energi dari aliran fluida pada turbin memiliki satu bagian yang bergerak dengan fluida yang memutar sudu-sudu dan menghasilkan energi yang menggerakkan rotor (Ansori, 2017).



Gambar 2.9 Kontrol Volume Turbin

Gambar 2.9 Menunjukkan panas yang dilepaskan dari turbin dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$0 = \cancel{Q_{in}} - W_{turbin} + \dot{m}[h_1 - h_2 - h_3 - h_4 - h_5 - h_6 - h_7 - h_8 + \frac{V_1^1 - V_2^2 - V_3^2 - V_4^2 - V_5^2 - V_6^2 - V_7^2 - V_8^2}{2} + g(z_1 - z_2 - z_3 - z_4 - z_5 - z_6 - z_7 - z_8)] \quad (2.23)$$

$$\frac{W_{turbin}}{\dot{m}} = h_1 - h_2 - h_3 - h_4 - h_5 - h_6 - h_7 - h_8 \quad (2.24)$$

(Ansori, 2017)

Tanda (/) berlaku karena pada turbin tidak terjadi penambahan panas namun turbin melakukan kerja, dan tidak terdapat energi kinetik maupun energi potensial pada turbin. Turbin uap bisa dioperasikan dengan menggunakan uap panas lanjut maupun menggunakan uap basah. Untuk dapat menentukan penghematan dari proses tenaga uap, selain ukuran-ukuran utama dari turbin uap seperti diameter roda turbin, jumlah tingkat, panjang sudu, dan penampang bagian-bagian yang menghantarkan uap, maka digunakan diagram perubahan keadaan air dalam T,s dan terutama h,s diagram.

Efisiensi energi dari turbin didapatkan dengan perbandingan antara daya yang dilakukan turbin dengan daya keseluruhan yang dilakukan pada sistem atau dapat ditulis dengan Persamaan

$$\eta_{turbin} = \frac{W_{turbin}}{W_{net}} \quad (2.25)$$

$$W_{net} = W_{turbin} - W_{BFP} - W_{Condensate Pump} \quad (2.26)$$

(Hariyadi & Setiyawan, 2014)

Persamaan 2.25 merupakan Persamaan efisiensi turbin dengan W_{turbin} merupakan daya yang dilakukan turbin dan W_{net} adalah daya yang dilakukan pada seluruh sistem yang merupakan daya turbin yang dikurangi dengan daya pompa. Berdasarkan Gambar 2.9 langkah 1 adalah uap masuk ke dalam turbin, langkah 8 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam HP Heater 1, langkah 7 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam HP Heater 2, langkah 6 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam deaerator, langkah 5 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam LP Heater 4, langkah 4 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam LP Heater 5, langkah 3 adalah uap ekstraksi yang masuk ke dalam LP Heater 6, dan langkah 2 adalah uap sisa keluaran turbin yang masuk ke kondensor. Nilai laju kerusakan eksergi pada turbin dapat dihitung dengan Persamaan

$$\dot{E}_{xSTin} = \dot{E}_{xSTout} + \dot{I}_{ST} + W_{turbin} \quad (2.27)$$

(Ismantoro, 2016)

Dengan \dot{E}_{xSTin} adalah laju eksergi turbin yang masuk ke dalam turbin, W_{turbin} adalah nilai daya yang dihasilkan turbin, dan \dot{I}_{ST} adalah nilai laju kerusakan eksergi turbin. Nilai efisiensi eksergi turbin dapat dihitung dengan Persamaan

$$\eta_{II,ST} = 1 - \left(\frac{\dot{I}_{ST}}{\dot{E}_{xSTin} + \dot{E}_{xSTout}} \right) \quad (2.28)$$

(Ismantoro, 2016)

Turbin uap dibuat dengan memiliki daya yang telah ditentukan. Daya yang dihasilkan turbin diperoleh dari selisih entalpi (panas jatuh) dan kapasitas panas uap (massa aliran uap persatuan waktu) yang masuk ke dalam turbin. Pada saat transformasi energi didalam turbin terjadi kerugian, hingga daya yang dihasilkan oleh turbin dapat dihitung dengan Persamaan

$$P = z \cdot \dot{m}_s \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad (2.29)$$

Efisiensi kopling dari turbin dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\eta_i \cdot \eta_m = \eta_e \quad (2.30)$$

(Ing & Dietzel, 1988)

Bila telah diketahui bahwa turbin harus memberikan daya pada kopling sebesar P, dan dari kondisi uap baru dan uap bekas yang juga telah diketahui, dapat dicari selisih entalpi dan entropi dengan menggunakan diagram h-s. Kemudian

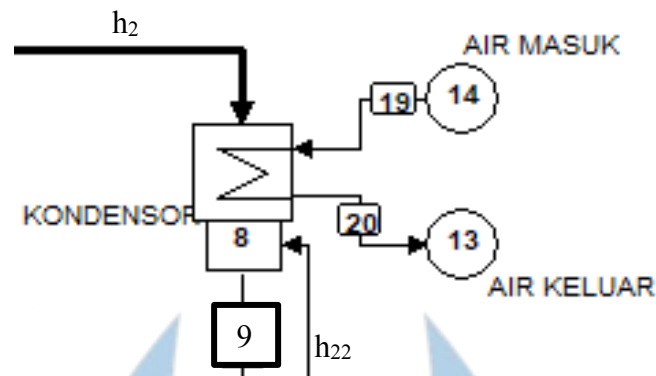
dicari massa uap yang mengalir masuk ke dalam turbin, besarnya massa uap yang mengalir dipengaruhi oleh besarnya efisiensi turbin.

Besarnya efisiensi turbin didasari dengan sistem sudu-sudu turbin. Sudu-sudu yang pendek menghasilkan daya yang kecil, meskipun kondisi dari uap tinggi (temperatur dan tekanan uap dalam keadaan tinggi) tetapi bila ruangan antara rotor dan rumah turbin dibuat besar pengaruhnya terhadap peralihan energi adalah tidak menguntungkan. Ukuran-ukuran utama dari turbin ditentukan berdasarkan kapasitas uapnya, dan untuk mendapatkan penentuan besarnya kapasitas uap ditentukan dengan seteliti mungkin dengan menggunakan diagram efisiensi.

Efisiensi dari turbin uap sangat tergantung dari daya yang dihasilkan turbin. Sudu-sudu turbin adalah suatu tempat dimana energi aliran uap harus diubah menjadi gaya rotasi. Kecepatan uap yang bekerja didalam sudu turbin uap sangat tinggi daripada kecepatan fluida yang bekerja di turbin air tetapi sifat-sifat uap menurut ilmu alam misalnya kerapatan dan kekentalan/viskositas lebih menguntungkan. Bentuk dan ukuran dari sudu pengarah dan sudu jalan sangat lebih penting/memegang peran, dengan pengecualian untuk tingkat terakhir dari turbin dengan kondensasi yang besar kurang begitu menuntut ketelitian (Ing & Dietzel, 1988).

2.7.2. Analisis Kondensor

Kondensor adalah sebuah *heat exchanger* yang berfungsi sebagai penukar panas pada fluida (Ansori, 2017). Pendinginan kondensor dilakukan dengan menggunakan air pendingin yang diperoleh dari lingkungan. Skema perpindahan panas dari kondensor dapat dilihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Kontrol Volume Pada Kondensator

Gambar 2.10 Menunjukkan panas yang dilepaskan dari kondensator dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan

$$\frac{Q_{kondensator}}{\dot{m}} = \frac{h_2 + h_{22}}{2} - h_9 \quad (2.31)$$

(Satiti, 2015)

Efisiensi kondensator didapatkan dengan membandingkan terhadap kalor yang dihasilkan dengan kalor yang masuk atau dapat ditulis dengan Persamaan.

$$\eta_{kondensator} = 1 - \frac{\dot{m}_9 h_9}{\left(\frac{\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{22} h_{22}}{2}\right)} \quad (2.32)$$

$$\eta_{II,kondensator} = 1 - \left(\frac{\dot{E}_{xkondensator out}}{\dot{E}_{xkondensator in}}\right) \quad (2.33)$$

(Ismantoro, 2016)

Kondensator merupakan suatu alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) yang berfungsi untuk mengubah uap keluaran dari turbin menjadi air kembali dengan proses kondensasi. Kondensator merupakan peralatan utama yang penting dalam tiap sistem instalasi daya. Untuk memperoleh vakum setinggi-tingginya tekanan didalam tangki kondensator dibuat rendah. Semakin rendah tekanan vakum pada kondensator maka efisiensi dan performansi dari instalasi daya semakin meningkat. Nilai laju kerusakan eksergi pada kondensator dapat ditentukan dengan Persamaan

$$\dot{E}_{xkondensator In} = \dot{E}_{xkondensator Out} + \dot{I}_{kondensator} \quad (2.34)$$

(Ismantoro, 2016)

Persamaan 2.34 merupakan Persamaan untuk mengetahui nilai laju kerusakan eksergi yang terjadi pada kondensator dengan $\dot{E}_{xkondensator In}$ adalah laju eksergi

kondensor yang masuk, $\dot{E}_{x\text{kondensorOut}}$ adalah laju eksergi kondensor yang keluar, dan $\dot{I}_{\text{kondensor}}$ adalah nilai laju kerusakan eksergi kondensor (Ismantoro, 2016).

Secara umum kondensor yang digunakan dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu:

1. Kondensor kontak langsung (*Direct Contact Condenser/Jet Condenser*) prinsipnya mencampur uap dan air pendinginan yang di *sparry* kan dalam satu tabung sehingga terbentuk air kondensat dan biasanya campuran air yang terbentuk diinjeksikan lagi ke perut bumi untuk menjaga kelestarian alam.
2. Kondensor Permukaan (*Surface Condenser*) yang prinsipnya adalah uap dimasukkan ke dalam *Shell* pada kondensor melalui *Steam Inlet Connection* pada bagian atas kondensor. Uap kemudian bersinggungan dengan pipa-pipa kondensor yang bertemperatur rendah akibat adanya air laut. Dengan demikian temperatur uap akan turun dan terkondensasi. Selanjutnya hasil kondensasi tersebut menghasilkan kondensat yang akan dikumpulkan didalam *Hotwell* (Tangki kondensat). Temperatur rendah pada pipa-pipa kondensor di jaga dengan cara mensirkulasikan air laut sebagai media pendingin yang telah terkondensasi dengan uap. Kondensat yang terkumpul kemudian dipindahkan dari kondensor dengan *Condensate Pump* (Ismantoro, 2016).

2.7.3. Analisis Boiler

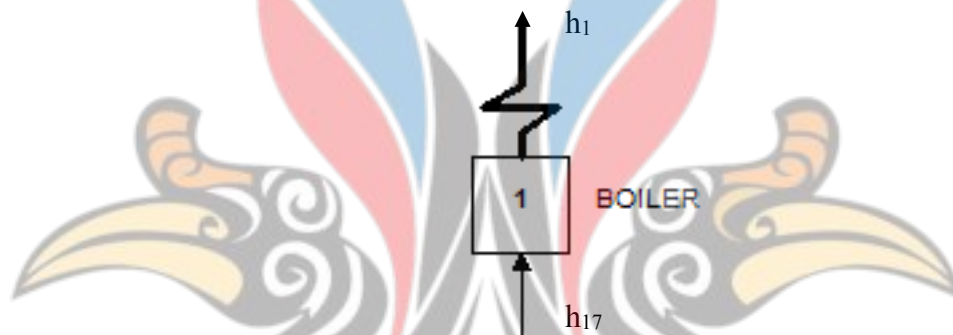
Boiler merupakan suatu peralatan yang memiliki fungsi sebagai pengubah air menjadi uap. Komponen-komponen pada boiler umumnya adalah *furnace*, *steam drum*, *superheated*, *reheated*, *air heater*, dan *economizer*. Boiler memiliki pipa-pipa yang berisi air dan didalam boiler terdapat *furnace* yang menghasilkan panas dari pembakaran bahan bakar. Panas tersebut digunakan untuk menguapkan air yang berada didalam pipa-pipa. Uap yang telah dipanaskan ini yang selanjutnya dialirkan ke turbin untuk menggerakkan sudu-sudu turbin (Ansori, 2017). Persamaan kesetimbangan laju aliran massa dan energi pada boiler adalah sebagai berikut

$$0 = \cancel{Q_{in}} - \cancel{W_{Boiler}} + \dot{m}[h_1 - h_{17} + \frac{V_1^1 - V_{17}^2}{2} + g(z_1 - z_{17})] \quad (2.35)$$

$$\frac{Q_{in}}{\dot{m}_1} = h_1 - h_{17} \quad (2.36)$$

(Ansori, 2017)

Tanda (/) berlaku karena pada boiler tidak terjadi kerja namun boiler melakukan penambahan panas dari pembakaran batu bara pada *furnace*, dan tidak terdapat energi kinetik maupun energi potensial pada boiler. Persamaan 2.35 dan Persamaan 2.36 air didalam boiler telah menyelesaikan siklus cairan dengan meninggalkan pompa pada kondisi empat yang kemudian dipanaskan sampai jenuh dan diuapkan didalam boiler (Ansori, 2017). Q_{in} merupakan penambahan kalor pada boiler, kerja boiler merupakan besar kalor yang masuk ke dalam boiler untuk memanaskan air sehingga menjadi uap kering. Skema dari perpindahan panas didalam boiler dapat dilihat pada Gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Kontrol Volume Boiler

Efisiensi boiler didapatkan dengan membandingkan terhadap kerja yang dihasilkan dengan kerja kalor yang dibutuhkan atau dapat ditulis dengan Persamaan.

$$\eta_{Boiler} = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_{17})}{\dot{m}_{coal} \cdot GCV} \quad (2.37)$$

(Ansori, 2017)

$$\eta_{II,Boiler} = 1 - \left(\frac{\dot{I}_{Boiler}}{\dot{E}_{xBoilerin} + \dot{E}_{xBoilerout}} \right) \quad (2.38)$$

(Ismantoro, 2016)

Persamaan 2.37 merupakan Persamaan untuk analisis efisiensi energi pada boiler dengan \dot{m}_{17} adalah laju aliran masuk boiler dengan besar $\dot{m}_{17} = \dot{m}_1$. h_1 adalah entalpi pada aliran keluar boiler dan h_{17} adalah entalpi pada aliran masuk boiler. Simbol \dot{m}_{coal} adalah laju aliran batu bara masuk ke dalam boiler dengan GCV adalah

Gross Calorific Value dari batu bara atau GCV dapat diartikan sebagai nilai kalori kotor dari nilai kalori hasil pembakaran batu bara dengan seluruh air yang diasumsikan dalam keadaan gas (Adminmsi, 2019).

Nilai laju kerusakan eksergi pada boiler dapat ditentukan dengan Persamaan berikut

$$\dot{E}_{xBoiler In} = \dot{E}_{xBoiler Out} + \dot{I}_{Boiler} \quad (2.39)$$

(Ismantoro, 2016)

Persamaan 2.39 merupakan Persamaan untuk mengetahui nilai laju kerusakan eksergi yang terjadi pada boiler dengan $\dot{E}_{xBoiler In}$ adalah laju eksergi boiler yang masuk, $\dot{E}_{xBoiler Out}$ adalah laju eksergi boiler yang keluar, dan \dot{I}_{Boiler} adalah nilai laju kerusakan eksergi boiler (Ismantoro, 2016).

2.7.4. Analisis Pompa

Tinggi dari kenaikan pompa z memiliki pengaruh terhadap besarnya ukuran dari pompa dan mesin penggeraknya. Daya pemompaan P_v adalah daya dari pompa yang bisa digunakan dan dipindahkan ke fluida memiliki Persamaan sebagai berikut

$$P_v = \rho \cdot g \cdot z \cdot V \quad (2.40)$$

(Ing & Dietzel, 1988)

Skema dari perpindahan panas didalam pompa dapat dilihat pada Gambar 2.12 berikut



Gambar 2.12 Kontrol Volume Pompa

Daya yang dibutuhkan atau daya yang harus disediakan oleh mesin penggerak pompa dirumuskan sebagai berikut

$$P = P_{vd} + P_{vi} + P_m + P_{vs} = \text{Daya yang diperlukan pompa} \quad (2.41)$$

(Ing & Dietzel, 1988)

Air kondensasi kemudian dipompa dari kondensor menuju *Feedwater Heater*. daya pompa dan kontrol volume yang terjadi pada pompa dapat dirumuskan sebagai berikut

$$\frac{W_{pump}}{\dot{m}_{15}} = h_{14} - h_{15} \quad (2.42)$$

$$h_{14} = h_{15} + V(P_{15} - P_{14}) \quad (2.43)$$

(Dietzel & Ing., 1988)

2.8. Penelitian Terdahulu

Dalam membantu penulisan penelitian ini, ada beberapa penelitian terdahulu yang telah diteliti terhadap efisiensi energi, efisiensi eksergi, dan laju kerusakan eksergi dari suatu pembangkit sebagai acuan dan memiliki keterkaitan dengan penelitian yang dilakukan. Berikut adalah penelitian terdahulu yang dapat dilihat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Judul Referensi	Hasil
1.	(Rashad & Maihy, 2009)	<i>Energy and Exergy Analysis of a Steam Power Plant in Egypt</i>	Penelitian analisis energi dan eksergi dilakukan di pembangkit listrik Shobra El-Khima di kairo, Mesir. Hilangnya energi maksimum ditemukan di kondensor di mana 56,4%, 55,2%, dan 54,4% dari energi input hilang ke lingkungan masing-masing pada 50%, 75%, dan beban penuh. Namun, <i>irreversibilitas</i> tidak dapat dihindari karena

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Judul Referensi	Hasil
			keterbatasan fisik, teknologi, dan ekonomi.
2.	(Satrio & Nasruddin, 2015)	Analisa Energi , <i>Exergi</i> dan Optimasi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Super Kritikal 660 MW	Analisa energi dan eksergi untuk melakukan optimasi pada pembangkit listrik tenaga uap <i>supercritical</i> dilakukan dengan mengembangkan model matematika dari pembangkit. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan EES. Hasilnya adalah hancurnya eksergi terbesar terjadi di boiler saat terjadi proses pembakaran. Eksergi yang hancur pada saat proses pembakaran sebesar 1802,80 MW. Efisiensi termal yang didapat sebesar 37,3%.
3.	(Dang et al., 2016)	<i>Energy & Exergy Analysis of Thermal</i>	Analisis kinerja menunjukkan bahwa

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Judul Referensi	Hasil
		<i>Power Plant at Design and Off Design Load</i>	<p>pabrik harus selalu pada beban desain atau beban penuh untuk mendapatkan efisiensi energi yang maksimum dari keseluruhan pabrik. Ketika beban pabrik berkurang, efisiensi juga menurun. Kondensor adalah satu-satunya komponen yang saat penurunan beban, energi, atau efisiensi eksergi meningkat. Sekitar 42% eksergi yang dipasok hilang dalam generator.</p>
4.	(Ramdhan & Rangkuti, 2019)	Analisa Eksergi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap PT X Unit 1 Babelan	<p>Eksergi yang musnah paling tinggi terjadi pada komponen boiler dengan nilai eksergi yang musnah sebesar 245,52 MW atau 86,1% dari total eksergi yang musnah pada keseluruhan sistem PLTU. Diikuti oleh komponen</p>

No.	Nama dan Tahun Publikasi	Judul Referensi	Hasil
			Turbin dengan nilai eksergi yang musnah sebesar 20,14 MW atau 7,1% dari total eksergi yang musnah.

