

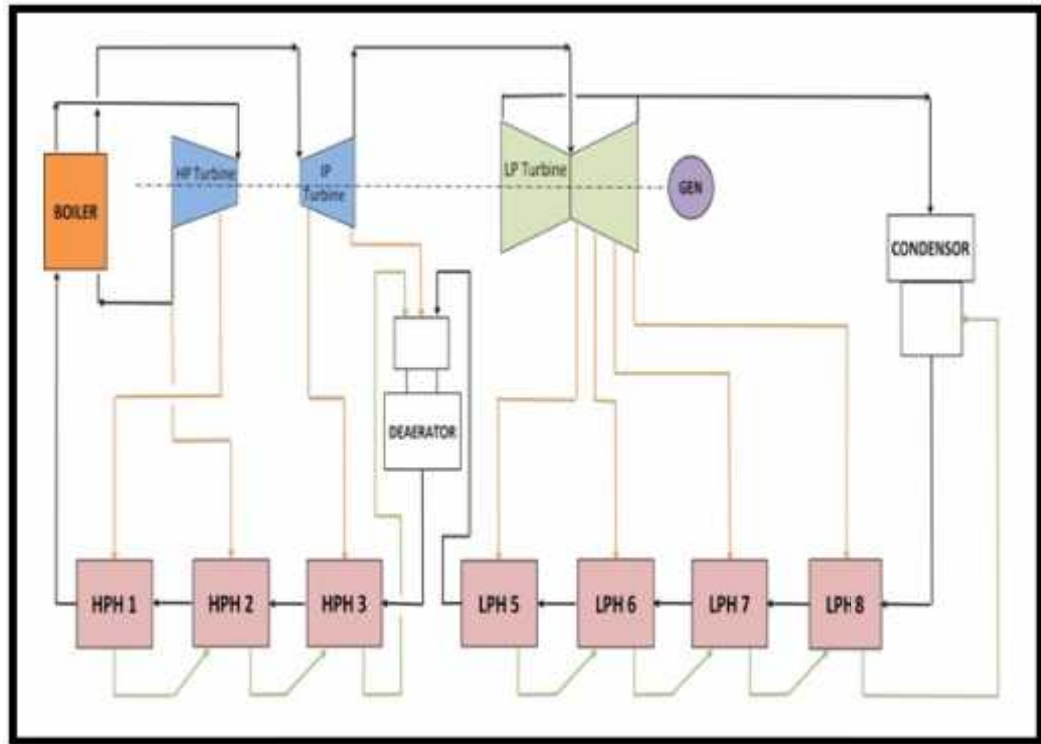
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

PLTU merupakan sistem pembangkit tenaga listrik dengan memanfaatkan energi panas bahan bakar untuk diubah menjadi energi listrik dengan menggunakan uap sebagai fluida kerjanya. Pada prinsipnya, energi panas batu bara sebagai bahan bakar yang terbakar di *boiler* digunakan untuk memanaskan air menjadi uap panas lanjut. Kemudian oleh turbin, energi panas uap diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran turbin. Karena turbin dan generator di kopel, maka generator ikut berputar sehingga generator dapat menghasilkan listrik.

PLTU Tanjung Awar-Awar menggunakan sistem *reheat* dan *ekstraksi*. Sistem *reheat* merupakan sistem dimana aliran uap yang telah berekspansi di HP turbine kemudian dipanaskan kembali di *boiler* untuk menaikkan *enthalpy* dari uap sehingga energinya juga ikut naik. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi siklus. Sedangkan ekstraksi merupakan sistem dimana dialirkannya uap yang berekspansi pada turbin untuk dialirkan menuju ke peralatan penukar panas untuk memanaskan air pengumpan (*feed water*).



Gambar 2.1 Sistem PLTU Tanjung Awar-Awar

Pada PLTU Tanjung Awar-Awar terdapat 4 buah LP heater, yaitu LP heater 5, 6, 7, 8. Air pengumpan pada awalnya masuk melalui LP heater dengan urutan melewati LP heater 8, 7, 6, 5. Prinsip kerjanya adalah air pengisi dialirkan di dalam pipa, dan uap panas mengalir di luar pipa. Setelah dipanasi di *LP heater* air pengisi kemudian dialirkan menuju *deaerator* untuk proses penghilangan unsur oksigen yang masih terkandung dalam air pengisi. Di dalam *deaerator* terjadi kontak langsung antara air pengisi dan uap oleh karena itu disebut *open feed water (direct contact)*. Uap akan memisahkan gas dari air pengisi untuk kemudian gas-gas tersebut bergerak dengan cepat ke bagian atas *deaerator* dan selanjutnya dibuang ke atmosfer. Uap yang digunakan berasal dari ekstraksi uap *IP turbine*. Setelah dari *deaerator* air langsung dipompakan oleh *boiler feed pump* menuju *HP heater* untuk memanaskan air pengisi. Prinsip kerja dari *HP heater* sama dengan *LP heater*, bedanya hanya pada uap ekstraksi yang digunakan dimana HP

heater menggunakan uap ekstraksi dari HP dan IP turbin. Pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar terdapat 3 HP *heater*, yaitu HP *heater* 1,2,3.

Setelah melewati HP *heater*, air masuk ke dalam boiler untuk pemanasan sehingga menghasilkan uap kering untuk memutar sudu HP turbin. Setelah digunakan di *HP turbine*, uap akan mengalami ekspansi (tekanan dan temperatur uap turun). Uap dari *HP turbine* akan kembali dipanaskan di boiler melalui *reheater*. Di dalam *reheater*, uap akan dipanaskan lagi pada tekanan konstan lalu dialirkan ke *IP turbine* untuk memutar sudu–sudu *IP turbine*. Setelah digunakan di *IP turbin*, uap tidak dipanaskan lagi, tapi langsung dialirkan ke *LP turbine* untuk memutar sudu–sudu *LP turbine*. Terakhir, uap yang keluar dari *LP turbine* kemudian dialirkan ke *condensor* untuk dikondensasikan menjadi air pengisi.

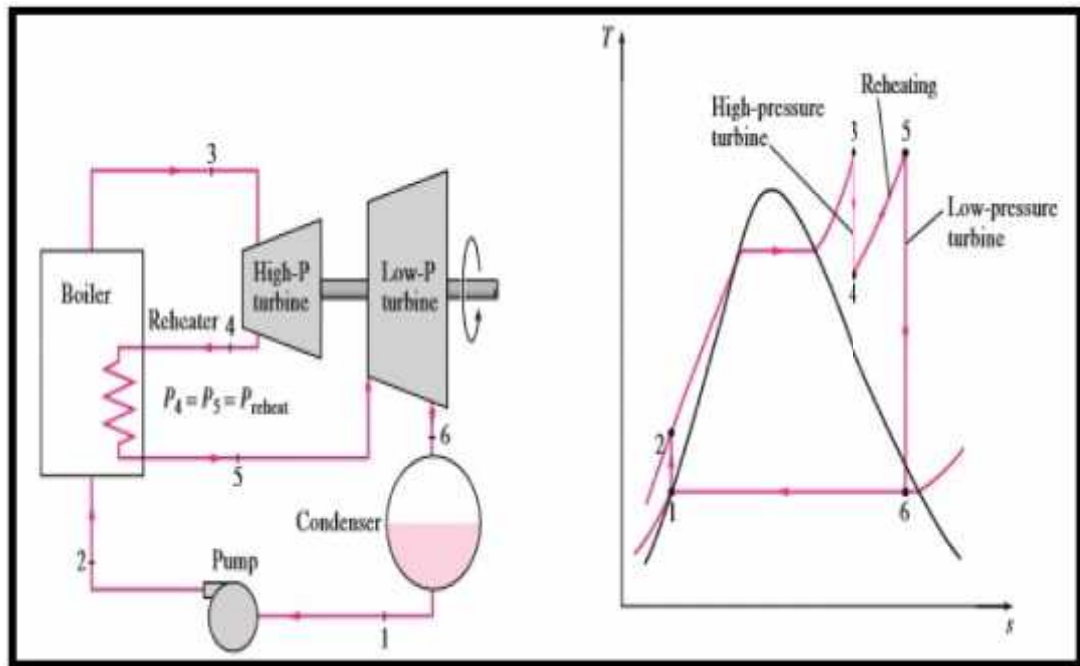
2.2 Siklus Rankine

Siklus standar untuk pembangkit tenaga uap adalah siklus Rankine, dimana terdiri atas empat komponen utama, yaitu pompa, *boiler*, turbin, dan *condenser*. Dalam siklus rankine, air sebagai fluida kerja akan mengalami perubahan wujud menjadi uap dan kembali menjadi air lagi. Selama dalam siklus kerjanya, air akan mengalami proses kompresi, pemanasan, penguapan, ekspansi, dan pendinginan.

2.2.1 Siklus Rankine dengan Pemanasan Ulang

Pada PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar menggunakan sistem *reheat* (pemanasan ulang), oleh karena itu prinsip kerjanya berdasarkan siklus rankine dengan pemanasan ulang seperti pada gambar 2.2. Siklus rankine dengan pemanasan ulang merupakan proses memanaskan kembali uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi (*High Pressure Turbine*) di *boiler* melalui saluran *reheat*.

Dengan pemanasan ulang ini, maka suhu uap akan naik sehingga entalpinya juga naik.



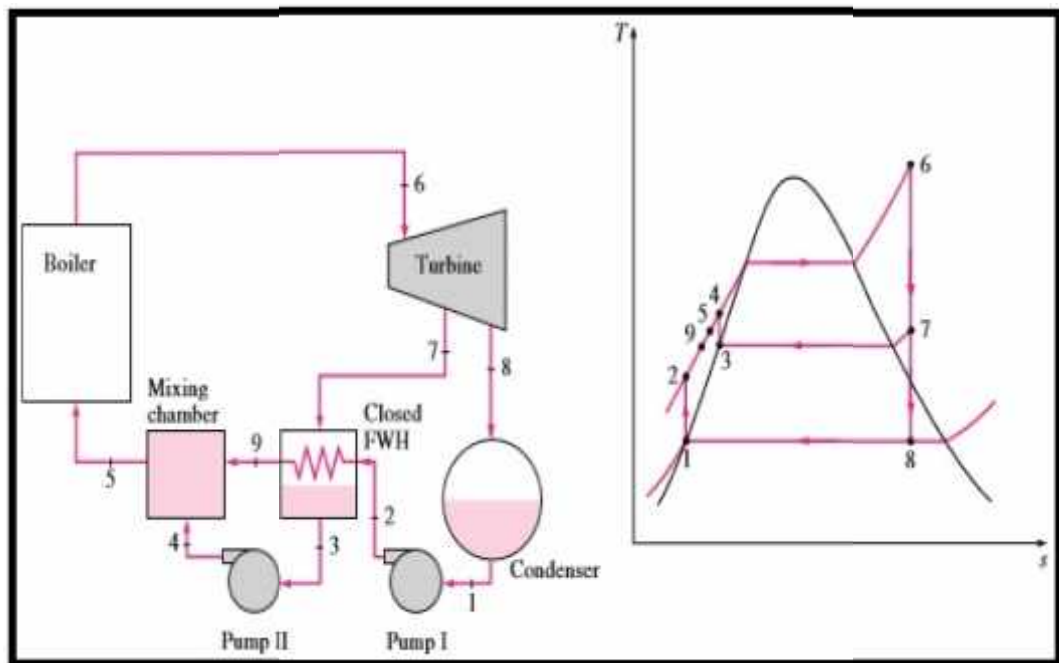
Gambar 2.2 Siklus Rankine dengan pemanasan ulang

- 1 – 2 Proses kompresi isentropis pada pompa
- 2 – 3 Proses penambahan kalor di *boiler* pada tekanan konstan
- 3 – 4 Proses ekspansi isentropis pada turbin tekanan tinggi
- 4 – 5 Proses pemanasan ulang dengan tekanan konstan
- 5 – 6 Proses ekspansi isentropis pada turbin tekanan rendah
- 6 – 1 Proses pelepasan kalor di *condenser* pada tekanan konstan

2.2.2 Siklus Rankine Ideal Regeneratif dengan *Closed Feedwater Heater*

Selain menggunakan proses *reheat*, PLTU Tanjung Awar-Awar juga menggunakan proses regeneratif. Proses regenerasi yaitu menaikkan suhu air pengumpan (*feedwater*) yang akan masuk ke *boiler* dengan cara memberikan kalor dari uap yang di ekstraksi dari turbin. Peralatan yang digunakan untuk memanaskan air pengumpan adalah *feedwater heater*. Dengan dilakukannya

proses regenerasi ini, maka efisiensi termal siklus Rankine akan meningkat karena kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan air di boiler menjadi lebih sedikit akibat suhu air pengumpan yang sudah dipanaskan terlebih dahulu. Pada LP dan HP *heater* prinsip kerjanya berdasarkan siklus Rankine ideal regeneratif dengan *closed feedwater heater* seperti pada gambar 2.3, hanya saja pada PLTU Tanjung Awar-Awar tidak terdapat *mixing chamber*.



Gambar 2.3 Siklus Rankine ideal regeneratif dengan *closed feedwater heater*

- 1 – 2 Air pengumpan dipompakan menuju *closed feedwater heater*
- 2 – 9 Air pengumpan dipanaskan di *closed feedwater heater*
- 3 – 4 Uap yang terkondensasi dipompakan menuju *mixing chamber* untuk bercampur dengan air pengumpan
- 5 – 6 Campuran dari *mixing chamber* dipanaskan di *boiler*
- 6 – 7 Sebagian uap yang berekspansi pada turbin diekstraksi
- 6 – 8 Proses ekspansi pada turbin
- 8 – 1 Proses kondensasi pada *condenser*

2.3 Keseimbangan massa dan energi

Selama proses dalam kondisi aliran *steady*, jumlah total massa yang terkandung dalam suatu volume terkontrol tidak berubah seiring perubahan waktu. Oleh karena itu jumlah massa yang masuk sama dengan jumlah massa yang keluar, seperti pada persamaan berikut.

$$\sum_{in} \dot{m} = \sum_{out} \dot{m} \dots (2.1)^1$$

Perubahan energi yang terjadi selama proses sama dengan perbedaan antara jumlah energi yang masuk dengan energi yang keluar. Secara umum, persamaan energi pada suatu proses adalah :

$$E = E_{in} - E_{out} \dots (2.2)^2$$

Selama proses dalam aliran *steady*, jumlah energi dari sebuah volume terkontrol adalah konstan. Oleh karena itu, jumlah energi yang masuk ke dalam suatu volume terkontrol sama dengan jumlah energi yang keluar, dan dapat dituliskan sebagai persamaan berikut :

$$E_{in} = E_{out} \dots (2.3)^3$$

2.4 Turbin Uap

Turbin uap adalah mesin tenaga yang berfungsi untuk mengubah energi *thermal* (energi panas yang terkandung dalam uap) menjadi energi poros (putaran). Sebelum energi *thermal* (enthalpi) diubah menjadi energi poros, energi tersebut diubah dulu menjadi energi kinetik. Alat untuk mengubah menjadi energi kinetik tersebut adalah *nozzle*. Uap dengan tekanan dan temperatur tinggi diarahkan menggunakan *nozzle* untuk mendorong sudu-sudu turbin yang dipasang

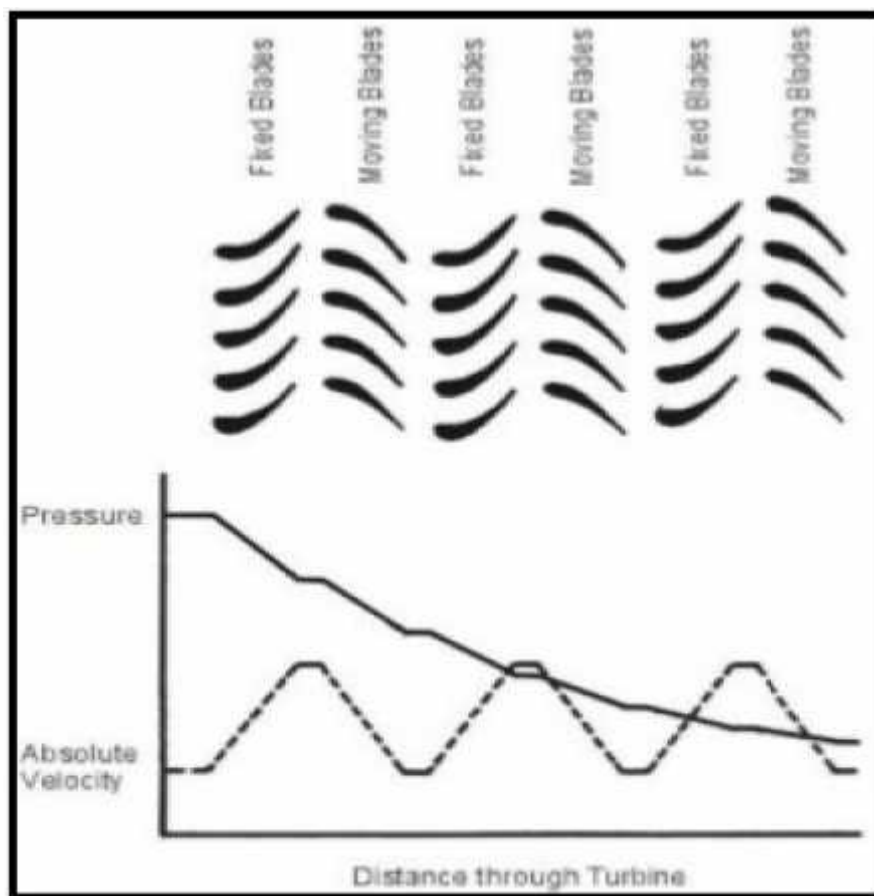
¹ Cengel, Y.A dan Boles, M.A, *Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition*, Hal. 230

² Cengel, Y.A dan Boles, M.A, *Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition*, Hal. 74

³ Cengel, Y.A dan Boles, M.A, *Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition*, Hal. 231

pada poros sehingga poros turbin berputar. (PT. PLN Pusat Pendidikan dan Pelatihan)

Pada PLTU Tanjung Awar-Awar jenis turbin uap yang digunakan adalah turbin reaksi. Pada turbin reaksi, uap akan menumbuk sudu gerak turbin dan memberikan sebagian energinya. Ketika uap keluar dari sudu gerak turbin maka akan menghasilkan gaya reaksi yang akan memberi energi tambahan pada sudu gerak.



Gambar 2.4 Sudu pada turbin reaksi



Gambar 2.5 LP turbin pada PLTU Tanjung Awar-Awar

2.5 Heat Rate

Heat rate dinyatakan dalam satuan BTU/kWh atau KJ/kWh dimana merupakan hasil pembagian antara jumlah kalor yang masuk sistem dengan tenaga yang dihasilkan oleh sistem. Dengan kata lain *heat rate* merupakan kalor yang dibutuhkan untuk membangkitkan listrik sebesar 1 kWh.

Pada sebuah PLTU terdapat hubungan antara *heat rate* dan efisiensi termal, dimana semakin tinggi *heat rate*, maka efisiensi termal semakin rendah. Karena semakin tinggi *heat rate* dapat dikatakan semakin besar pula kalor yang dibutuhkan untuk membangkitkan 1 kWh listrik.

Persamaan *heat rate* secara mendasar adalah sebaga berikut :

$$\text{Heat rate} = \frac{\text{Panas masuk dari boiler}}{\text{Listrik keluar dari generator}} \dots (2.4)^4$$

Berdasarkan *turbine performance test procedure* yang digunakan untuk mengkalkulasi performa turbin, maka didapat rumus :

⁴ *British Electricity International, Modern Power Station Practice, Third Edition, London, hal. 23*

$$\text{THR} = \frac{G_{ms} \cdot H_{ms} - G_{fw} \cdot H_{fw} + G_{hrsh} \cdot H_{hrsh} - G_{crsc} \cdot H_{crsc} - G_{shs} \cdot H_{shs} - G_{rshs} \cdot H_{rshs}}{P_{gro} - P_{ex}} \dots (2.5)^5$$

Hubungan heat rate dengan efisiensi termal :

$$\eta_{th} = \frac{3412}{\text{heat rate}} (\text{BTU/kWh}) \times 100\% \dots (2.6)^6$$

Besarnya kerugian pada turbin akan mempengaruhi besarnya *heat rate*, kerugian-kerugian yang ada pada turbin antara lain :

A. Kerugian pada perapat (*labyrinth*).

Pada turbin tekanan tinggi, jika sistem perapat (*gland seal*) tidak baik maka uap akan melewati celah antara sudu tetap dan poros sehingga energi dari uap tidak semuanya diberikan pada turbin untuk melakukan kerja.

B. Kerugian pada jalur perpipaan

Jalur pipa uap selalu diisolasi selain sebagai pengaman bagi operator juga untuk mencegah panas berpindah pada udara sekitar. Jika jalur ini bocor atau tidak terisolasi dengan baik maka akan terjadi kerugian panas karena panas uap berpindah ke lingkungan.

C. Kerugian karena derajat kebasahan uap

Pada turbin tekanan rendah temperatur uap mulai menurun, akibatnya uap pada daerah ini menjadi uap basah. Pada tingkat kebasahan tertentu kecepatan fraksi air akan lebih rendah dari sudu maka bukan air yang memutar sudu tetapi sebaliknya. Karena hal tersebut maka akan terjadi erosi pada sudu selain itu juga terjadi kerugian mekanik karena fraksi uap menghambat kerja sudu turbin.

⁵ *Performance Test Report for Unit No.1*, 2008, Hal. 30

⁶ Cengel, Y.A dan Boles, M.A, *Thermodynamics An Engineering Approach 5th Edition*, Hal. 555

D. Kerugian akibat *Throttling*

Throttling merupakan pengaturan pada katup governor untuk mengendalikan jumlah aliran uap yang masuk ke turbin. Pada kondisi ini, katup akan membuka secukupnya (tidak membuka penuh) untuk mengendalikan jumlah uap, sehingga uap akan menumbuk sebagian permukaan katup. Hal ini merupakan kerugian karena pada proses *throttling* terjadi proses penurunan temperatur dan tekanan, akibatnya ekspansi pada turbin akan berkurang.

E. Kerugian mekanik

Besarnya kerugian gesekan yang terjadi pada bantalan tergantung pada kondisi sistem pelumasan. Faktor yang dominan dari sistem pelumasan baik dalam pembentuk lapisan pelumas (lapisan flim) maupun terhadap koefisien gesek adalah kekentalan (*viscosity*) minyak pelumas. Sedangkan kekentalan minyak pelumas merupakan fungsi dari temperatur. Bila kekentalan terlalu rendah maka pelumas film akan rusak yang pada akhirnya meningkatkan gesekan antara poros dengan bantalan. Bila kekentalan minyak pelumas terlalu tinggi maka koefisien gesek minyak pelumas akan bertambah besar sehingga pada akhirnya juga meningkatkan gesekan. Karena itu temperatur minyak pelumas merupakan parameter penting yang harus selalu diperhatikan secara seksama oleh para operator.

F. Kerugian akibat kebocoran uap melalui celah sudu gerak dan *casing*

Agar turbin bisa menghasilkan gaya putar pada poros, maka uap harus menumbuk sudu gerak turbin. Namun, celah antara sudu dan *casing* turbin menyebabkan sebagian uap mengalir melewatinya sehingga sebagian uap yang melewati celah tersebut tidak memberikan energinya pada sudu turbin.

Bertambahnya *clearance* antara sudu dan *casing* tersebut bisa menjadi salah satu penyebab menurunnya performa turbin uap. Pertambahan *clearance* ini bisa disebabkan oleh adanya erosi pada permukaan sudu maupun *casing* akibat gesekan dengan benda asing.

G. Kerugian akibat kekasaran nosel dan sudu

Terbentuknya permukaan kasar pada nosel maupun sudu gerak bisa diakibatkan oleh deposit / tempelan benda asing pada permukaan, selain itu juga akibat tumbukan benda asing yang menyebabkan goresan pada permukaan. Kekasaran ini akan menyebabkan terbentuknya aliran turbulen yang menjadi kerugian.