

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

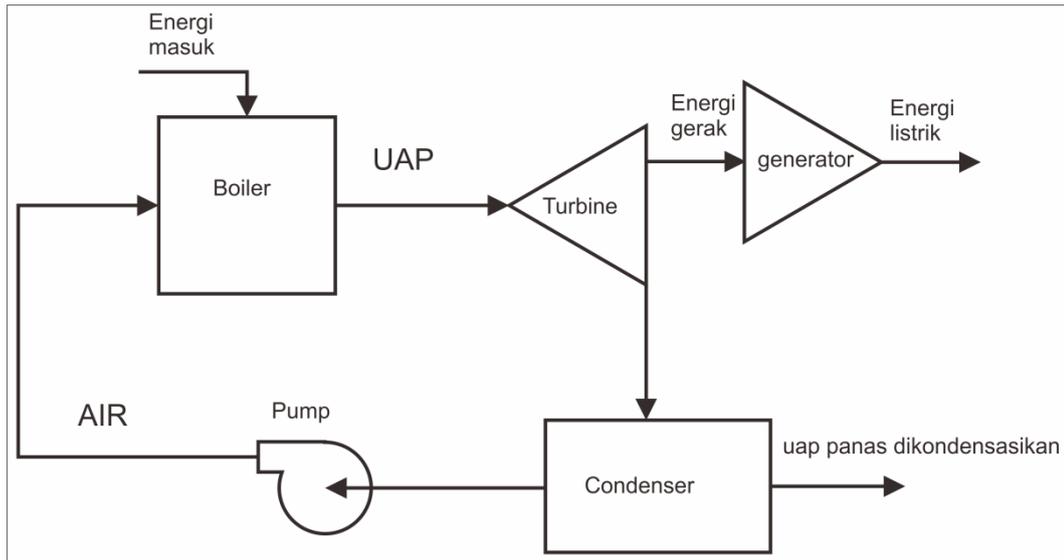
#### **2.1 Siklus PLTU**

Secara umum, pembangkit listrik merupakan proses perubahan bentuk satu energi ke bentuk energi lain dimana sebagai produknya berupa energi listrik. PLTU mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi panas yang ditransfer ke air pengisi sehingga menjadi energi kinetik pada uap yang kemudian uap tersebut digunakan untuk memutar turbin, dari putaran poros turbin menggerakkan generator sehingga menghasilkan energi listrik.

**Energi Kimia → Energi Kalor → Energi Kinetik → Energi Mekanik  
→ Energi Listrik**

Bentuk / wujud energi diatas posisinya / keberadaannya seperti berikut :

- **Energi Kimia**, terdapat dalam bahan bakar.
- **Energi Kalor**, terjadi pada proses reaksi/ pembakaran, panas diteruskan ke dinding pipa ketel , diterima air ketel sebagai energi kalor
- **Energi Kinetik**, energi uap berubah fungsi kecepatan mendorong sudumemutar poros turbin.
- **Energi Mekanik** merupakan pemusatan energi yang terletak disumbu poros turbin.
- **Energi Listrik**, putaran poros turbin diteruskan ke poros generator menghasilkan Listrik



Gambar 2.1 Bagan Siklus PLTU

Seperti diketahui untuk merealisasikan transformasi energi pada berbagai komponen utama PLTU, diperlukan fluida perantara yang disebut fluida kerja. Fluida kerja yang dipakai di PLTU adalah air. Sebagai perantara, fluida kerja akan mengalir melintasi beberapa komponen utama PLTU dalam suatu siklus tertutup, seperti tampak pada gambar 2.1

Selama melewati lintasan tertutup tersebut, fluida kerja mengalami perubahan wujud yaitu dari air menjadi uap untuk kemudian menjadi air kembali. Karena itu siklus fluida kerja dapat dipisahkan menjadi dua sistem, yaitu sistem uap dan sistem air.

### 2.1.1 Sistem Uap

Sistem uap merupakan bagian dari siklus dimana fluida kerja berada dalam wujud uap dan dapat dikelompokkan menjadi sistem uap utama, sistem uap panas ulang, sistem uap ekstraksi dan sistem uap bantu.

- **Sistem Uap Utama** : Merupakan rangkaian pipa saluran untuk mengalirkan uap yang keluar dari ketel ke turbin.

- **Sistem Uap Panas Ulang** : Sistem ini hanya terdapat pada PLTU dengan reheater. Sistem ini merupakan rangkaian pipa saluran uap yang terdiri dari dua segmen yaitu yang menyalurkan uap bekas dari turbin tekanan tinggi kembali ke ketel (*cold reheat*) dan yang menyalurkan uap dari ketel ke turbin tekanan menengah/rendah (*hot reheat*).
- **Sistem Uap Ekstraksi** : Selama melintasi turbin hingga keluar ke kondensor, uap dicerat/diekstrak di beberapa titik dan pada umumnya uap ini dialirkan ke pemanas awal air pengisi (*Feed water Heater*) untuk memanaskan air kondensat / air pengisi. Uap tersebut dinamakan uap ekstraksi.

### 2.1.2 Sistem Air Kondensat

Sistem air kondensat merupakan sumber pasokan utama untuk sistem air pengisi ketel. Mayoritas air kondensat berasal dari proses kondensasi uap bekas didalam kondensor. Rentang sistem air kondensat adalah mulai dari hotwell sampai ke Dearator. Selama berada dalam rentang sistem air kondensat, air mengalami 3 proses utama yaitu mengalami pemanasan, mengalami pemurnian dan mengalami deaerasi.

- **Pemanasan** : air mengalami pemanasan pada berbagai komponen antara lain di *gland steam condensor* dan di beberapa pemanas awal air pengisi tekanan rendah (*Low Pressure Heater*). Pemanasan ini dilakukan untuk meningkatkan efisiensi siklus serta menghemat pemakaian bahan bakar. Bila air kondensat tidak dipanaskan, berarti membutuhkan lebih banyak bahan bakar untuk menaikkan temperatur air di dalam ketel.

- **Pemurnian** : Pemurnian yang dilakukan didalam sistem air kondensat dapat dilakukan dengan cara mengalirkan air kondensat melintasi penukar ion (*Condensate Polishing*) bila ada, maupun secara kimia melalui penginjeksian bahan - bahan kimia. Melalui proses pemurnian internal ini, maka pencemar yang dapat mengakibatkan deposit maupun korosi pada komponen-komponen ketel dapat dihilangkan sehingga kualitas air kondensat menjadi lebih baik.

Terjadinya deposit di ketel yang disebabkan oleh kualitas air yang buruk, dapat mengakibatkan terhambatnya proses perpindahan panas di dalam ketel dan dapat mengakibatkan bocornya pipa-pipa ketel akibat *over heating*.

- **Deaerasi**: Deaerasi adalah proses pembuangan pencemar gas dari dalam air kondensat. Gas-gas pencemar yang ada dalam air kondensat misalnya oksigen (O<sub>2</sub>), carbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan non condensable gas lainnya. Pencemar gas dapat menyebabkan korosi pada saluran dan komponen-komponen yang dilalui air kondensat.

### 2.1.3 Sistem Air Pengisi

Sistem air pengisi merupakan kelanjutan dari sistem air kondensat. Fungsi dari sistem air pengisi hampir sama dengan sistem air kondensat yaitu untuk menaikkan tekanan, menaikkan temperatur serta memurnikan air pengisi. Tekanan air pengisi perlu dinaikkan agar air pengisi dapat mengalir ke dalam ketel. Tugas ini dilaksanakan oleh pompa air pengisi ketel (BFP). Di samping itu, selama melintasi sistem, air pengisi mengalami beberapa tahap pemanasan sehingga mengalami kenaikan temperatur. Pemanasan ini dilakukan untuk dua tujuan.

Pertama, semakin dekat temperatur air pengisi masuk ketel dengan titik didih air pada tekanan ketel, maka semakin sedikit bahan bakar yang diperlukan untuk proses penguapan didalam ketel. Kedua, temperatur air pengisi yang akan masuk ketel sedapat mungkin harus mendekati temperatur metal ketel sebab perbedaaan yang besar antara keduanya dapat menimbulkan kerusakkan komponen ketel akibat *thermal stress*.

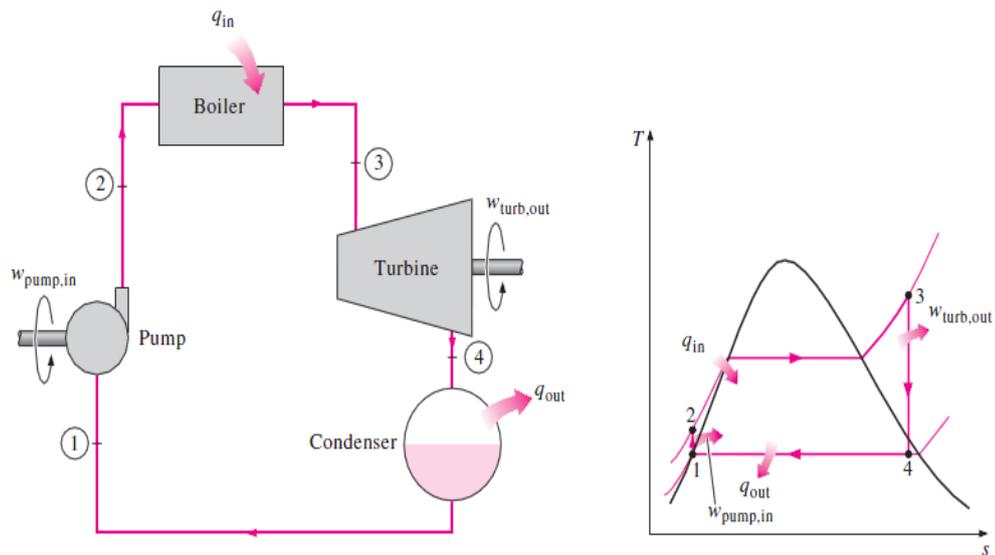
Fungsi pemurnian bertujuan untuk menghilangkan zat-zat pencemar padat dari air pengisi melalui cara kimia yaitu dengan meninjeksikan bahan kimia guna menggumpalkan zat-zat padat yang terlarut dalam air pengisi. Gumpalan zat-zat padat ini kemudian dapat dibuang melalui saluran *blowdown* pada ketel.

## **2.2 Siklus Rankine**

Siklus merupakan rangkaian sebuah proses dimana dimulai dari suatu tingkat kondisi yang akan kembali ke tingkat kondisi semula dan selalu berulang. Pada pembangkit tenaga uap, fluida yang mengalami proses-proses tersebut adalah air. Air berfungsi sebagai fluida kerja. Air dalam siklus kerjanya mengalami proses – proses pemanasan, penguapan, ekspansi, pendinginan, dan kompresi. Siklus standarpembangkit tenaga uap adalah siklus *Rankine*. Siklus *Rankine* sederhana terdiri dari empat komponen utama yaitu pompa, *boiler*, turbin, dan *condenser*.

### **2.3.1 Siklus Rankine *Superheat***

Pada Gambar 2.2 proses 1-2-3-4 merupakan siklus Rankine ideal dengan pemanasan lanjut untuk mendapatkan uap kering.



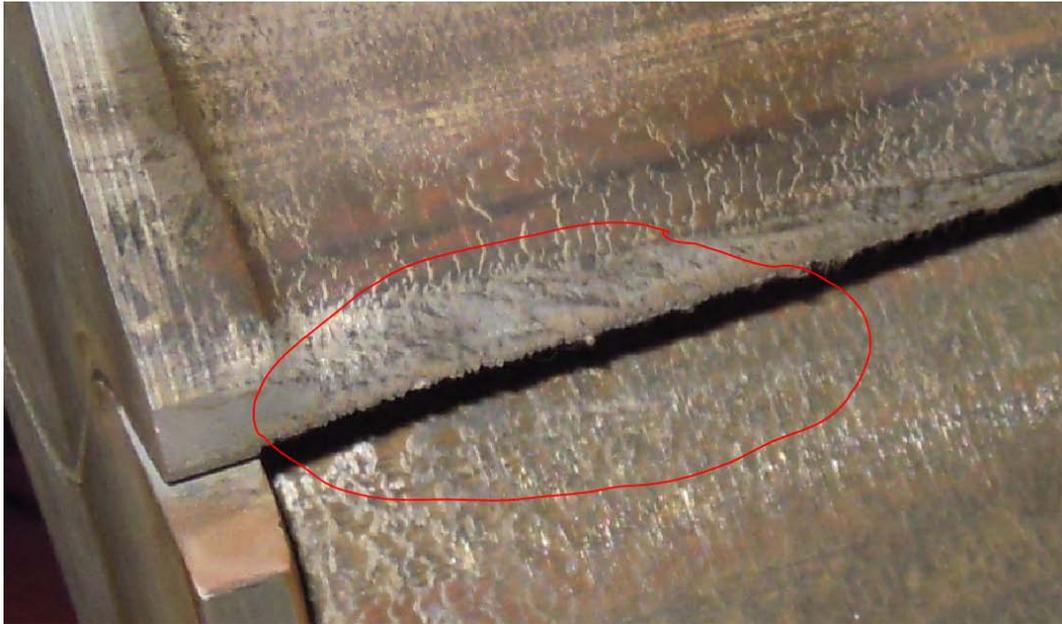
Gambar 2.2 Siklus Rankine Superheat

Adapun penjelasan proses tersebut adalah sebagai berikut :

- 1 – 2 Kompresi isentropis pada pompa
- 2 – 3 Penambahan kalor dengan tekanan konstan di boiler
- 3 – 4 Ekspansi isentropis pada turbin
- 4 – 1 Pelepasan kalor dengan tekanan konstan pada kondensor

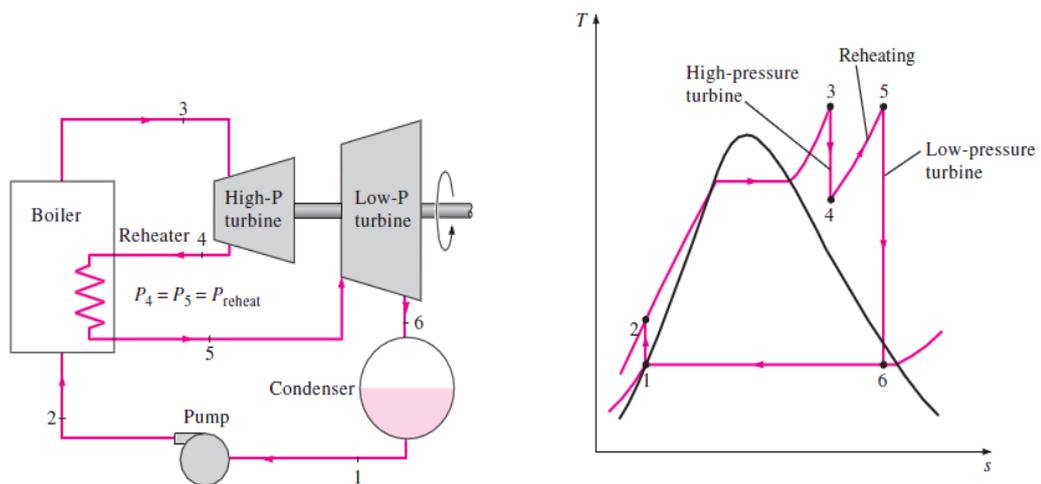
### 2.3.2 Siklus Rankine dengan Pemanasan Ulang

Untuk meningkatkan efisiensi siklus Rankine maka dari siklus Rankine ideal dilakukan perubahan dengan memanaskan ulang uap hasil ekspansi turbin pertama ke *reheater* dengan tujuan menaikkan entalpi uap sehingga energi uap naik, selain itu uap yang akan digunakan untuk ekspansi ke turbin tingkat berikutnya tidak terdapat embun yang menyebabkan kerusakan sudu seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kerusakan sudu akibat uap yang mengembun

Gambar 2.4 merupakan proses siklus Rankine ideal dengan pemanasan ulang.



Gambar 2.4 Siklus Rankine dengan pemanasan ulang

Penjelas dari gambar di atas adalah sebagai berikut :

- 1 – 2 Kompresi isentropis pada pompa
- 2 – 3 Penambahan kalor dengan tekanan konstan di boiler

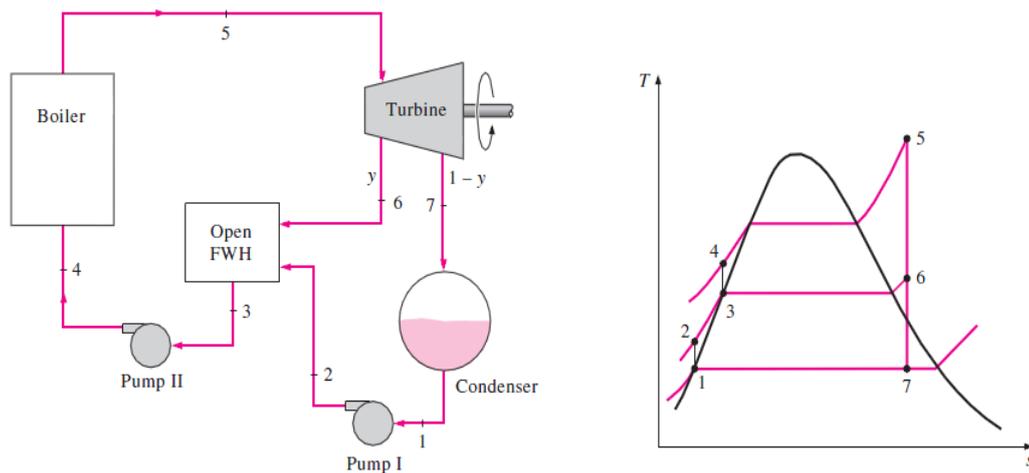
- 3 – 4 Ekspansi isentropis pada turbin tingkat pertama
- 4 – 5 Pemanasan ulang uap dari turbin tingkat pertama dengan tekanan konstan
- 5 – 6 Ekspansi isentropis pada turbin tingkat kedua
- 6 – 1 Pelepasan kalor dengan tekanan konstan pada kondensor

### 2.3.3 Siklus Rankine Regeneratif

Siklus Rankine regeneratif adalah modifikasi siklus Rankine dimana air sebagai fluida kerja dinaikkan temperaturnya dengan memanfaatkan uap ekstraksi dari turbin sehingga kalor yang dibutuhkan untuk memanaskan fluida kerja pada boiler berkurang. Hal ini tentu saja akan menaikkan efisiensi siklus.

Regenerasi tidak hanya meningkatkan efisiensi siklus tetapi juga salah satu cara deareasi. Dearasi yaitu menghilangkan kadar oksigen dalam air yang bisa menyebabkan korosi pada jalur perpipaan. Proses regenerasi umumnya dengan menggunakan alat yang biasanya disebut *feed water heater* dengan prinsip kerja seperti *heat exchanger*.(Boles, Cengel2006)

*Feed water heater* ada 2 jenis yaitu tipe terbuka dan tertutup. Open *feed water heater* atau bisa disebut juga pemanas kontak langsung secara prinsip adalah sebuah ruangan pencampur antara uap ekstraksi dengan fluida kerja (air).

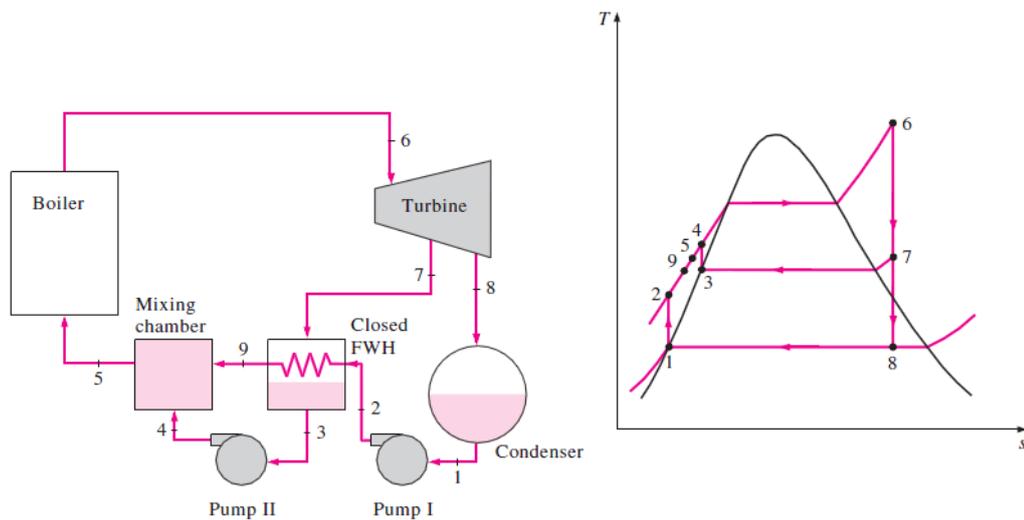


Gambar 2.5 Siklus Rankine Regeneratif dengan *Open Feedwater Heater*

Proses pada siklus Rankine regeneratif dengan *Open Feedwater Heater* :

- 1 – 2 Air pengisi dari *hotwell* dipompa menuju *Open FWH*
- 2 – 3 Air pengisi bercampur dengan uap ekstraksi dari turbin (proses 6 – 3)
- 3 – 4 Air pengisi yang telah dipanaskan dipompa menuju *boiler*
- 4 – 5 Penambahan kalor ke air pengisi di *boiler*
- 5 – 6 Uap masuk turbin sebagian diekstraksi
- 5 – 7 Ekspansi uap di turbin
- 7 – 1 Pelepasan kalor di dalam kondensor

Tipe pemanas awal yang lain adalah *Close Feedwater Heater* atau biasa disebut pemanas sistem tertutup. Prinsip kerjanya adalah panas dari uap ekstraksi dipindahkan ke air pengisi namun tanpa terjadi kontak langsung.



Gambar2.6 Siklus Rankine Regeneratif dengan *Close Feedwater Heater*

Dari diatas dapat dijelaskan prosesnya sebagai berikut :

- 1 – 2 Air dari *hotwell* dipompakan menuju ke *Close FWH*.
- 2 – 9 Air dipanaskan dalam *Close FWH* dengan uap ekstraksi (7-3)
- 3 – 4 Uap ekstraksi yang terkondensasi dipompakan menuju *mixing chamber*. Di dalam *mixing chamber* air kondensasi ini bercampur dengan air pengisi yang telah dipanaskan.
- 5 – 6 Campuran dari *mixing chamber* dipompakan oleh pompa II ke boiler untuk dipanaskan kemudian dialirkan ke turbin untuk diekspansi

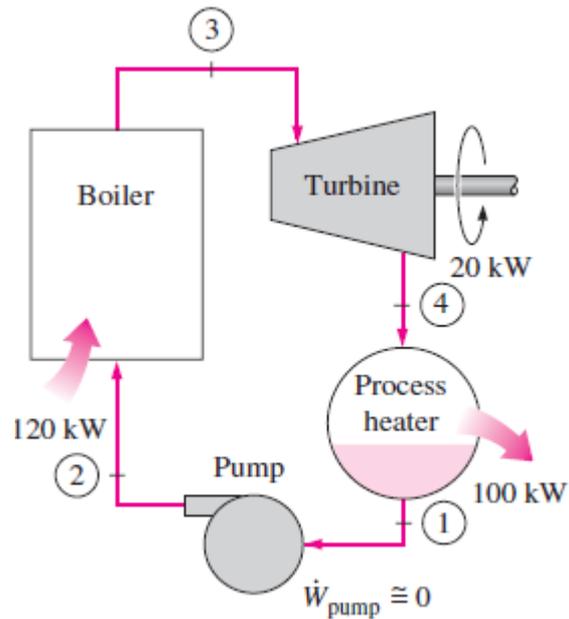
### 2.3.4 Siklus Rankine dengan Kogenerasi

Siklus Rankine dengan kogenerasi adalah siklus Rankine dimana panas sisa dari proses ekspansi pada turbin digunakan untuk proses lainnya misalkan pada pabrik gula, panas tersebut digunakan untuk memasak nira. Adapun penjelasan siklus Rankine Kogenerasi adalah sebagai berikut :

- 1 – 2 Kompresi isentropis pada pompa
- 2 – 3 Penambahan kalor dengan tekanan konstan di boiler

3 – 4 Ekspansi isentropis pada turbin

4 – 1 Pelepasan kalor dengan memanfaatkannya untuk proses lainnya



Gambar 2.7 Siklus Rankine Kogenerasi

### 2.3 Kestimbangan massa dan energi

Selama proses aliran tunak (*steady*), jumlah total massa terkandung dalam kontrol volume tidak berubah dengan waktu, maka jumlah massa yang masuk sama dengan jumlah massa yang keluar.

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

Perubahan yang terjadi (kenaikan atau penurunan) dalam energi total sistem selama proses sama dengan perbedaan antara jumlah energi yang masuk

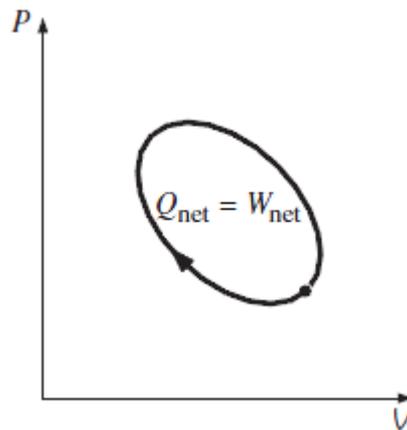
<sup>1</sup>Cengel, Y.A. dan Boles, M.A., Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition.,2006, Hal.230

dan energi total meninggalkan sistem selama proses tersebut.<sup>2</sup> Secara umum persamaan energi pada suatu proses adalah

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E \dots (2.2)^3$$

Untuk sistem tertutup seperti sebuah siklus dimana kondisi awal identik dengan kondisi akhir maka  $E_{in} = E_{out}$ . Dalam suatu sistem tertutup tidak terdapat aliran massa yang melewati batas sistemnya maka kesetimbangan energi dalam suatu siklus dapat dinyatakan energi panas sebanding kerja yang terjadi

$$W_{net,out} = Q_{net,in} \dots (2.3)^4$$



Gambar 2.8 Kesetimbangan energi pada siklus

## 2.4 Definisi Turbin Uap

Turbin uap merupakan suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang akan digerakkan. (Wikipedia, 2013)

<sup>2</sup>Cengel, Y.A. dan Boles, M.A., *Thermodynamics An Engineering Approach 5th edition.*, 2006, Hal.74

<sup>3</sup> Cengel, Y.A. dan Boles, M.A., *ibid* hal 231

<sup>4</sup>Cengel, Y.A. dan Boles, M.A., *ibid* hal 74

Pengertian energi potensial uap adalah direpresentasikan dalam *property* (sifat) uap yang menggerakkan turbin, dalam hal ini sifat uap adalah : tekanan, temperatur, *enthalpy*. Sedangkan energi gerak putar poros adalah besaran momen putar yang ditimbulkan oleh gaya dorong uap pada sudu gerak turbin. Transformasi energi pada sudu gerak turbin adalah perubahan energi kinetik (kecepatan) uap yang masuk dan keluar sudu.

## 2.5 Klasifikasi Turbin Uap

Turbin uap ada bermacam-macam jenis sesuai dengan kegunaannya, apabila digunakan untuk penggerak daya kecil maka lebih dipilih tingkat tunggal sampai tiga tingkat. Akan tetapi bila untuk menggerakkan daya yang besar lebih dipilih turbin multi stage sampai *Tandem Compound*.

Jenis-jenis Turbin Uap dapat digolongkan atas dasar sebagai berikut :

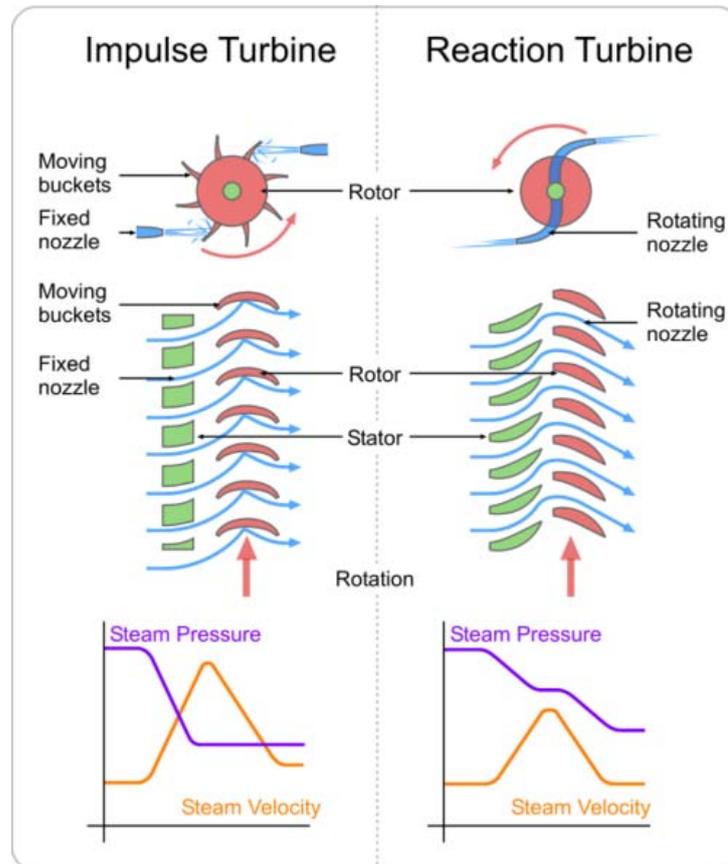
### 2.5.1 Berdasarkan proses transformasi energi uap :

- a. Turbin Impuls, yaitu turbin yang ekspansi uap terjadi pada sudu tetapnya. Turbin impulse pertama kali dibuat oleh Branca pada tahun 1629.

Turbin Impuls juga ada beberapa macam diantaranya:

- Turbin Impuls bertingkat kecepatan. Turbin kecepatan bertingkat (curtis) adalah jenis turbin yang mana kecepatan aliran uap yang mengalir di dalamnya bertingkat sedangkan tekanannya tetap.
- Turbin Impuls bertingkat tekanan. Turbin tekanan bertingkat (rateau) adalah jenis turbin yang mana kondisi tekanan uap yang mengalir di dalamnya bertingkat sedangkan kecepatannya tetap.

- b. Turbin Reaksi, yaitu turbin yang ekspansi uap terjadi pada sudu tetap dan sudu jalan. Turbin ini dirancang pertama oleh Hero, 120 tahun sebelum Masehi



Gambar 2.9 Perbedaan turbin uap tipe impuls dan reaksi

### 2.5.2 Berdasarkan tekanan uap keluar turbin :

- a. Turbin *Back Pressure* adalah turbin yang tekanan akhirnya diatas tekanan atmosfer karena uap keluaran akhir dari turbin tersebut tidak dikondensasikan.
- a. Turbin *Condensing* adalah turbin yang mana uap keluaran sudu terakhirnya dikondensasikan, tekanan akhir dari turbin kondensasi ini dibuat vaccum, sehingga temperature kondensasinya sedikit diatas temperatur air pendingin yang tersedia.

### 2.5.3 Berdasarkan tekanan uap masuk turbin :

- a. Turbin Tekanan Super Kritis (*Super Critical Pressure Turbines*) tekanan uap diatas 22,5 MPa
- b. Turbin Tekanan Tinggi (*High Pressure Turbines*) tekanan uap antara 8,8 – 22,5MPa
- c. Turbin Tekanan Menengah (*Intermediate Pressure Turbines*) tekanan uap antara 1 – 8,8 MPa
- d. Turbin Tekanan Rendah (*Low Pressure Turbines*) tekanan dibawah 1 Mpa.

### 2.5.4 Berdasarkan pengaturan uap masuk turbin :

- a. Turbin pemasukan penuh (*Full Admission Turbines*) : Uap yang masuk turbin melalui katup masuk pada posisi buka penuh (*full Open*)/posisi pembukaannya tetap sedangkan pengaturan daya turbin dengan cara menaikkan tekanan uap utama yang menyebabkan kenaikan masa alir uap yang masuk ke turbin. Hal ini menyebabkan kenaikan/penurunan daya turbin fungsi dari tekanan uap masuk. Turbin semacam ini juga dikenal dengan sebutan *Sliding Pressure Turbines*.
- b. Turbin pemasukan parsial (*Partial Admission Turbines*) : Uap yang masuk turbin melalui katup masuk tidak pada posisi membuka penuh untuk menaikkan/menurunkan daya turbin dengan cara mengatur laju alir uap ke turbin penuh. Pengaturan laju alir uap ke turbin dilakukan dengan dua cara yaitu dengan pengendalian *Throtling Valve* dan dengan pengendalian Nozles.

### 2.5.5 Berdasarkan dari segi aliran uap :

- a. **Turbin *Reheat* dan *Non-Reheat*.** Turbin *reheat* terdiri lebih dari satu silinder dan uap mengalami proses pemanasan ulang di *reheater boiler*. Pada turbin *reheat*, uap yang keluar dari turbin tekanan tinggi (HP) dialirkan kembali ke dalam ketel. Di dalam ketel, uap ini dipanaskan kembali pada elemen pemanas ulang (*reheater*) untuk selanjutnya dialirkan kembali melalui saluran *reheat* ke turbin tekanan menengah dan turbin tekanan rendah.
  
- b. **Turbin Ekstraksi dan Non-Ekstraksi.** Turbin ekstraksi (*extraction turbine*) adalah turbin yang mengekstrak sebagian uap yang mengalir dalam turbin. Pengekstraksian uap ini dapat dilakukan di beberapa tempat sepanjang casing turbin. Uap yang diekstrak kemudian dialirkan ke pemanas awal air pengisi untuk memanaskan air pengisi. Tekanan dan aliran uap ekstraksi sangat tergantung pada beban. Pada turbin-turbin ekstraksi yang relatif kecil, variasi tekanan dan aliran uap ekstraksi tidak terlalu signifikan sehingga tidak diperlukan katup pengatur pada saluran uap ekstraksinya. Turbin ekstraksi seperti ini disebut turbin ekstraksi otomatis (*Automatic Extraction Turbine*). Tetapi pada turbin ekstraksi yang besar, variasi ini cukup besar sehingga diperlukan katup pengatur pada saluran ekstraksi guna mengontrol tekanan/aliran uap ekstraksi.  
  
Sedangkan pada turbin non ekstraksi, tidak dilakukan ekstraksi uap sama sekali. Jadi seluruh uap yang mengalir masuk turbin non ekstraksi akan keluar meninggalkan turbin melalui exhaust.

### 2.5.6 Berdasarkan dari segi *Exhaust Flow* :

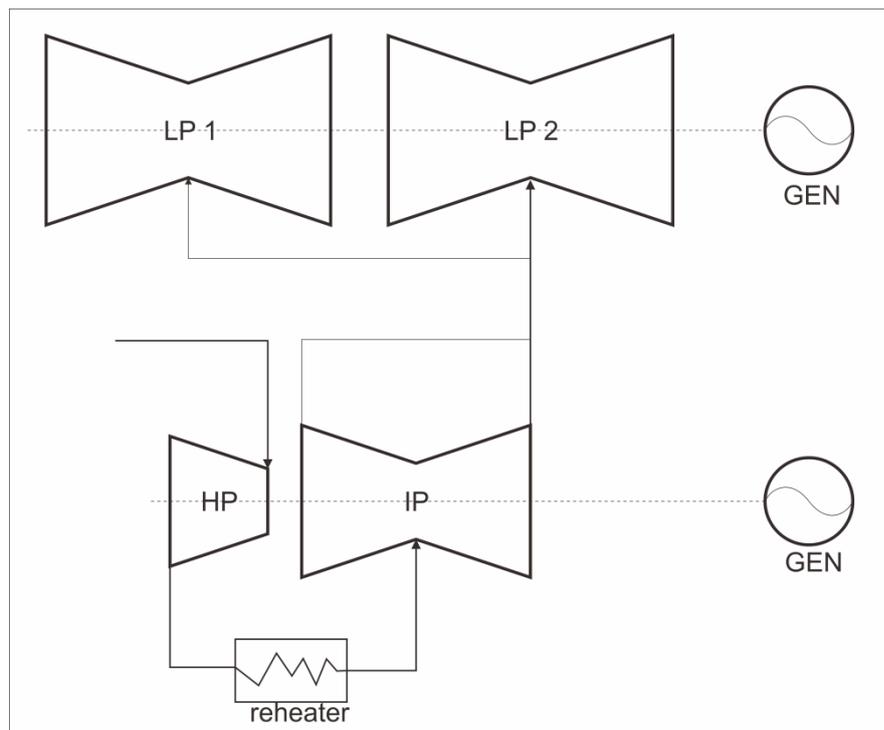
a. **Single Flow.** Turbin-turbin kecil biasanya hanya memiliki 1 saluran *exhaust*. Turbin semacam ini biasanya disebut Turbin *Single Flow*. Tetapi untuk turbin-turbin besar, bila menerapkan rancangan seperti ini, maka dibutuhkan *exhaust* yang sangat luas. Sebagaimana diketahui kondisi uap pada *exhaust* turbin sudah dibawah jenuh atau uap basah, dan tekanannya dibawah tekanan atmosfer. Perubahan tekanan dari beberapa puluh bar menjadi tekanan minus mengakibatkan perubahan volume yang sangat besar sehingga dibutuhkan laluan yang luas agar uap dapat melintas tanpa hambatan yang berarti. Karena keterbatasan kemampuan material, luas laluan *exhaust* juga menjadi sangat terbatas, sehingga kemampuan turbin dengan *exhaust* tunggal juga terbatas.

b. **Multi Flow.** Umumnya dipakai pada turbin kapasitas besar, *exhaust* dipecah menjadi dua atau lebih. Bila ternyata dibutuhkan 2 *exhaust*, berarti keduanya berada dalam satu poros dengan aliran uap yang berlawanan. Rancangan turbin seperti ini disebut turbin *multi flow* (aliran banyak). Dengan cara seperti ini masalah keterbatasan luas laluan *exhaust* dapat diatasi sekaligus memberi perimbangan terhadap gaya aksial pada poros.

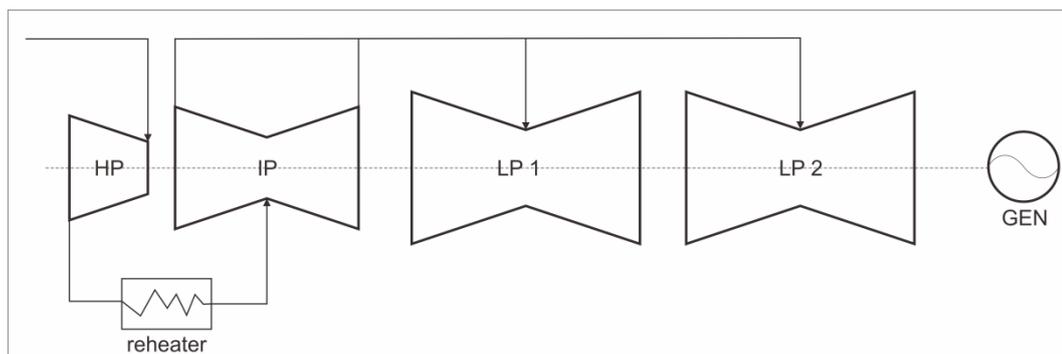
### 2.5.7 Berdasarkan Casing :

a. **Turbin Single Casing.** Turbin single casing adalah turbin dimana seluruh tingkat sudu-sudunya terletak didalam satu casing saja. Ini merupakan konstruksi turbin yang paling sederhana yang hanya dapat diterapkan pada turbin-turbin kapasitas kecil.

- b. **Multi Casing.** Untuk turbin-turbin kapasitas yang lebih besar, konstruksi single casing menjadi kurang cocok, maka dibuatlah turbin-turbin dengan 2 casing atau lebih (multy casing). Komposisi dari turbin multy casing ada 2 macam yaitu : *Tandem Compound* dan *Cross Compound*. Pada turbin tandem compound, casing-casing dipasang secara seri antara satu dengan lain sehingga sumbu aksial casing berada dalam 1 garis.



Gambar 2.10 Turbin susunan *Cross Compound*



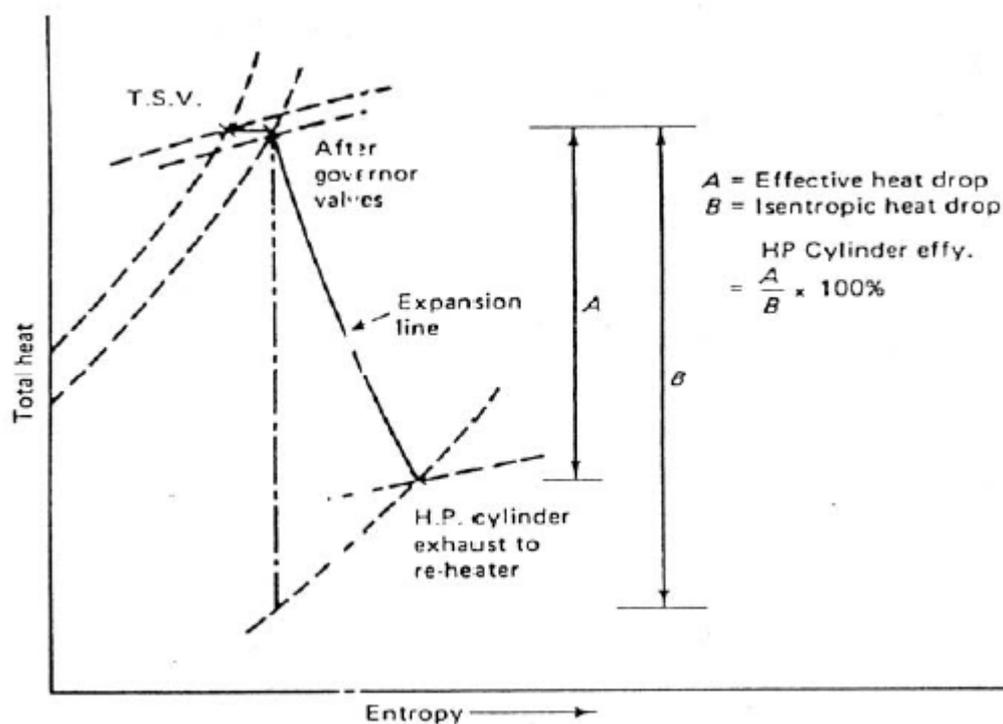
Gambar 2.11 Turbin susunan *Tandem Compound*

## 2.6 Efisiensi

Secara umum, efisiensi didefinisikan sebagai perbandingan antara output terhadap input dalam suatu proses. Efisiensi merupakan salah satu persamaan yang penting dalam termodinamika untuk mengetahui seberapa baik konversi energi atau proses transfer terjadi. (Boles, Cengel, 2006)

PLTU dirancang untuk menghasilkan output berupa energi listrik dalam besaran tertentu untuk sejumlah input berupa bahan bakar dalam jumlah tertentu pula. Bila seluruh komponen PLTU memiliki efisiensi yang tinggi, maka unjuk kerja (performance) PLTU tersebut dikatakan tinggi sehingga biaya operasi PLTU juga menjadi rendah. Seandainya karena suatu sebab unjuk kerja PLTU turun, berarti PLTU memerlukan lebih banyak bahan bakar untuk menghasilkan output energi listrik sesuai desain. Akibatnya biaya operasi menjadi semakin tinggi.

Idealnya, kita menghendaki agar energi kimia (input) dapat diubah seluruhnya menjadi energi listrik (output). Pada kenyataannya, hal ini tidak mungkin dapat dilaksanakan karena adanya berbagai kerugian (*losses*) yang terjadi hampir disetiap komponen PLTU. Akibat kerugian-kerugian tersebut, maka energi listrik yang dihasilkan PLTU selalu lebih kecil dari energi kimia yang masuk ke sistem PLTU. Umumnya pada PLTU dihitung efisiensi termal, dalam konteks efisiensi termal maka output maupun input harus dinyatakan dalam besaran yang sama yaitu besaran panas



Gambar 2.12 Perbandingan Ekspansi Isentropis dan aktual

Dari gambar 2.12 terlihat bahwa secara ideal panas yang masuk sebesar B tetapi terjadi ekspansi secara aktual sebesar A. Jadi bisa dikatakan efisiensi turbin secara umum adalah

$$\eta_T = \frac{A}{B} \times 100\% \dots (2.4)$$

## 2.7 Heat Rate

*Heat rate* didefinisikan sebagai banyaknya panas yang diperlukan untuk membangkitkan satu kwh listrik. *Heat rate* diperoleh dengan cara membagi konsumsi panas per jam dengan output energi listrik dalam satu jam. Karena itu *heat rate* dinyatakan dalam satuan KJ/Kwh, BTU/Kwh atau Kcal/Kwh.<sup>5</sup>

<sup>5</sup>Pusdiklat PLN Suralaya, Optimasi & Efisiensi, 2011, hal.22

Secara umum dikenal dua macam *heat rate* yaitu *Heat Rate Bruto (Gross)* dan *Heat Rate Netto*. Pada *heat rate bruto*, maka output energi listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan oleh generator. Sedangkan untuk *heat rate netto*, energi listrik yang diukur adalah energi listrik yang dihasilkan generator dikurangi energi listrik yang dipakai untuk menggerakkan alat-alat bantu PLTU (energi listrik yang membangkitkan generator - pemakaian sendiri).

Secara garis besar, terdapat korelasi antara *heat rate* dengan efisiensi termal dari suatu unit pembangkit. Semakin rendah *heat rate* maka efisiensi semakin baik, dengan kalimat lain dapat dinyatakan bahwa efisiensi termal berbanding terbalik terhadap *heat rate*. Persamaan umum *heat rate* adalah :

$$\text{Heat Rate} = \frac{\text{Panas masuk dari boiler } \left(\frac{\text{kJ}}{\text{h}}\right)}{\text{Listrik keluar dari generator (kW)}} \dots (2.5)^6$$

Hubungan dengan efisiensi termal

$$\eta_{\text{th}} = \frac{3600}{\text{Heat Rate}} \times 100\% \dots (2.6)^7$$

Heat Rate turbin akan naik jika dipengaruhi kerugian (*losses*) pada turbin.

Kerugian tersebut seperti :

- **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.

<sup>6</sup> British Electricity International London, *Modern Power Station Practice 3rd ed.*, 1991 Hal 23

<sup>7</sup> British Electricity International London, *ibid*. Hal 23

- **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.

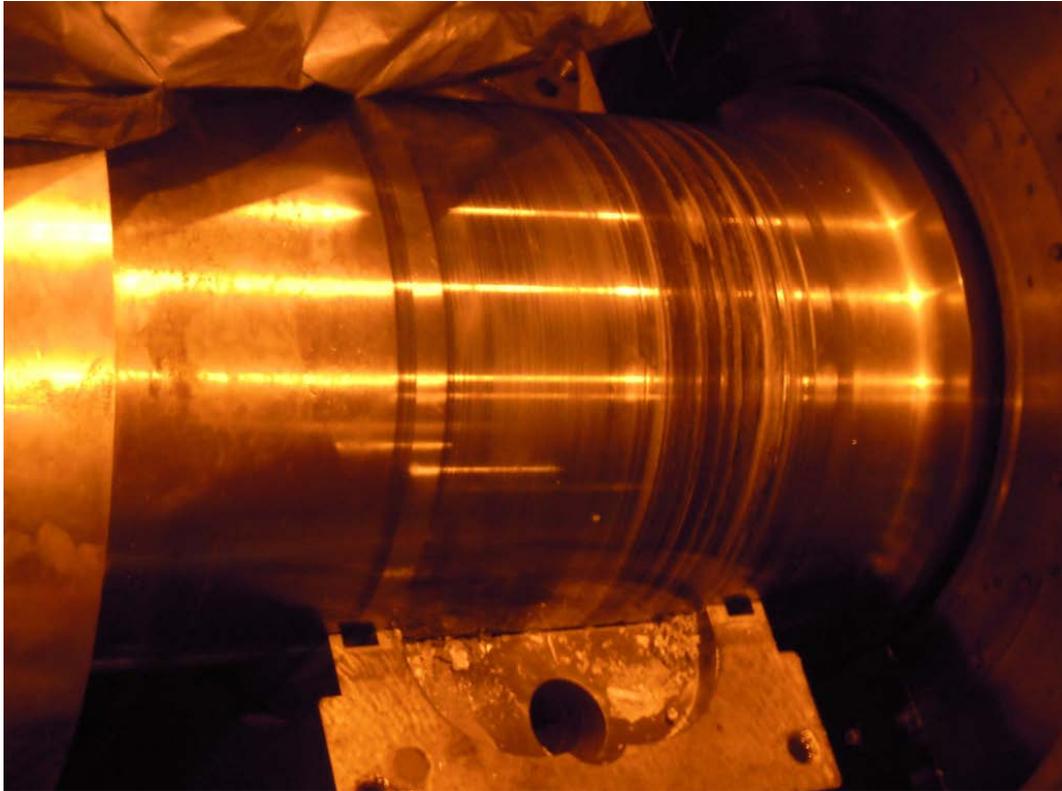
- **Kerugian *Throttling* pada beban partial.**

Pada saat beban *partial* atau mode *sequence* tidak semua katup governor membuka secara keseluruhan, ada yang membuka sebagian ada yang menutup (*throttling*). Hal ini merupakan kerugian karena pada proses *throttling* terjadi proses penurunan temperatur dan tekanan, akibatnya ekspansi pada turbin akan berkurang.

- **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.<sup>8</sup>  
Kerusakan poros akibat sistem pelumasan yang gagal ditunjukkan pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Kerusakan pada poros turbin akibat pelumasan yang gagal

- **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.

---

<sup>8</sup> PT. PLN (Persero) PUSDIKLAT Suralaya, 2008, Efisiensi ,hal 20