

Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kerja Turbin Dan Produksi Listrik PLTU Unit 1 Sebalang Menggunakan Simulasi Cycle Tempo

Sudirmanto¹; Alvian Reza Effendi²

¹ pakde.sudirmanto@gmail.com

² alvianeffendi@yahoo.com

ABSTRACT

PT. PLN (Persero) Sebalang Generation Sector has 2 units of Steam Power Plants with a capacity of 100 MW each. Based on the design, the unit 1 of the Sebalang power plant has a vacuum pressure of 690 mmHg or -92 kPa. The condenser vacuum pressure of unit 1 Sebalang PLTU experienced a vacuum pressure decrease of 7 kPa on the operating date 16 November 2016. No analysis of the vacuum effect of the condenser on the turbine work and the total electricity production at Sebalang PLTU unit 1. The study aimed to analyze the effect of vacuum pressure reduction condenser for turbine work and cycle efficiency and total electricity production at PT. PLN (Persero) Sebalang Generation Sector especially in unit 1 uses the Tempo Cycle application. The results obtained Each average condenser vacuum pressure decrease of 1 kPa resulted in a decrease in turbine work by 2,315 kW, cycle thermal efficiency decreased by 1.27% and total electricity production decreased by 77,783,324.93 kWh.

Keywords: Vacuum pressure, condenser, turbine work, thermal cycle efficiency, cycle tempo

ABSTRAK

PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkit Sebalang memiliki 2 unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap dengan kapasitas masing-masing 100 MW. Berdasarkan desain pembangkit listrik Sebalang unit 1 memiliki tekanan vakum 690 mmHg atau -92 kPa. Pada tanggal 16 November 2016 tekanan vakum kondensor unit 1 PLTU Sebalang mengalami penurunan tekanan sebesar 7 kPa. Belum ada analisa efek vakum dari kondensor pada unjuk kerja turbin dan total produksi listrik di PLTU Sebalang unit 1. Penelitian bertujuan untuk menganalisis pengaruh penurunan tekanan kondensor terhadap unjuk kerja turbin dan efisiensi siklus serta total produksi listrik di PT. PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Sebalang khususnya di unit 1 dengan menggunakan aplikasi Siklus Tempo. Hasil yang diperoleh bahwa setiap tekanan vakum kondensor turun sebesar 1 kPa mengakibatkan penurunan unjuk kerja turbin sebesar 2.315 kW, efisiensi siklus termal menurun sebesar 1,27% dan total produksi listrik menurun sebesar 77.783.324,93 kWh.

Kata kunci: Tekanan/vakum, kondensor, kerja turbin, efisiensi siklus termal, siklus tempo

1. PENDAHULUAN

PT. PLN (Persero) Pembangunan Sumatera Bagian Selatan Sektor Pembangkitan Sebalang memasok listrik 2 x 100 MW yang dihasilkan dari dua unit Pembangkit Listrik Tenaga Uapnya yaitu unit 1 dan unit 2. Total 200 MW listrik tersebut dipasok untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Provinsi Lampung. Sehingga PLTU unit 1 dan 2 dituntut untuk beroperasi dengan andal dan efisien.

Prinsip kerja dari PLTU yaitu menggunakan siklus air-uap-air yang merupakan suatu sistem tertutup. Air dipanaskan didalam boiler hingga berubah menjadi uap. Selanjutnya uap akan memutar turbin yang seporos dengan generator, sehingga generator akan ikut berputar dan menghasilkan listrik. Uap sisa memutar turbin akan dikondensasikan menjadi air kembali didalam kondensor. Didalam kondensor terdapat tekanan vakum yang berfungsi untuk membuat tekanan pada kondensor rendah, dengan tekanan yang rendah maka uap akan bisa bergerak menuju kondensor dan terkondensasi dengan mudah.

Pada unit 1 PLTU Sebalang tekanan vakum kondensornya mengalami penurunan sekitar 0,07 bar abs atau 53 mmHg dari tekanan vakum desain sebesar 690 mmHg tanggal pengoperasian 16 November 2016 pada beban 100 MW. Di PLTU Sebalang, belum ada kajian mengenai pengaruh penurunan tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin dan Efisiensi siklusnya yang nantinya akan berpengaruh terhadap total produksi listrik PLTU Sebalang. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh penurunan tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin dan total produksi listriknya. Pada pembahasan terkait dengan Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kinerja siklus PLTU yang pernah dilakukan oleh Slamet Hariyadi dan Atok Setiyawan^[1]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa semakin turun tekanan vakum kondensor menyebabkan hilangnya daya yang mampu dibangkitkan oleh turbin uap serta turunnya efisiensi termal dari siklus PLTU. Efisiensi yang semakin turun akan menyebabkan berkurangnya total produksi listrik yang dihasilkan sehingga penjualan listrik juga berkurang akibat penurunan tekanan vakum.

Pada penelitian untuk menganalisa pengaruh turunnya tekanan vakum kondensor digunakan aplikasi *cycle tempo release 5.0* yang nantinya akan digunakan untuk merancang heat balance dari siklus PLTU Sebalang unit 1. Nantinya akan disimulasikan dengan variasi penurunan vakum kondensor antara 0,15 - 0,08 bar abs. Selain itu, ada beberapa parameter yang dibuat konstan sesuai dengan data operasional saat terjadinya penurunan tekanan vakum pada kondensor unit 1. Dengan harapan dapat diketahui pengaruh penurunan tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin dan perubahan total produksi listrik di PLTU Sebalang.

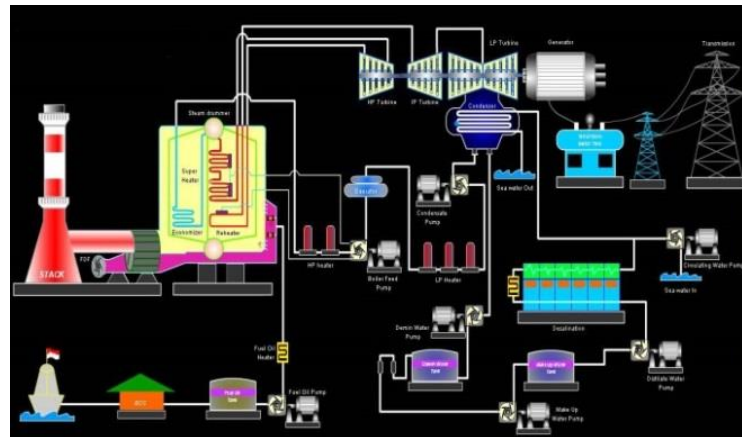
Mengingat ada banyak penyebab turunnya tekanan vakum kondensor, penelitian ini hanya berfokus pada analisa pengaruh perubahan tekanan vakum kondensor. Tekanan vakum kondensor sangat penting karena akan berpengaruh terhadap kerja turbin dan energi listrik yang dihasilkan. Dari latar belakang tersebut penulis mengambil judul penelitian **“Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kerja Turbin dan Produksi Listrik PLTU Unit 1 Sebalang Menggunakan Simulasi Cycle Tempo’**.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap adalah pembangkit yang mengandalkan energi kinetik dari uap untuk menghasilkan energi listrik. Bentuk utama pembangkit listrik jenis ini adalah generator yang di hubungkan ke turbin dimana untuk memutar turbin diperlukan energi kinetik dari uap panas atau kering. Pembangkit listrik tenaga uap menggunakan berbagai macam bahan bakar

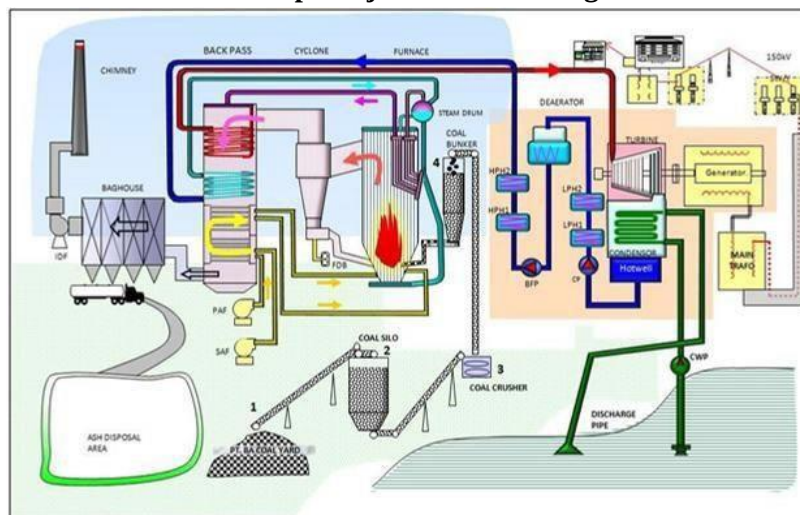
terutama batu-bara dan minyak bakar serta MFO untuk start awal. Komponen- komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 1. Komponen Utama Pembangkit Listrik Tenaga Uap

(Sumber : <http://p3mb4ngk1t.blogspot.com/2013/09/pltu-steam-power-plant-listrik-tenaga.html>)

Prinsip Kerja PLTU Sebalang



Gambar 2. Prinsip kerja PLTU Sebalang.

(Sumber: Muhammad Ridho: 2017)

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

Sistem Bahan Bakar

Alur batubara dimulai dari batubara yang dibongkar dari kapal di *coal jetty* kemudian dikeruk dengan menggunakan *unloader crane*. Dan selanjutnya diangkut dengan *conveyor threstle* 1 menuju penyimpanan sementara (*coal stockyard*). Dari stockyard batu bara diangkut menuju *dry coal shed* menggunakan crane secara manual. Di *dry coal shed* inilah terdapat over head crane untuk memasukkan batu bara ke dalam *coal bunker*. Di dalam *coal bunker* inilah batu bara diangkut menuju coal crusher house untuk dihaluskan melalui *conveyor threstle* 2. Selanjutnya batu

bara tersebut ditransfer melalui *conveyor threstle* 3 menuju *main powerhouse*. Di *mainpower house* terdapat *conveyor threstle* 4 yang melanjutkan transfer batubara menuju *coal bunker*, diteruskan ke *coal feeder* yang berfungsi mengatur jumlah aliran ke *furnace* (ruang bakar) *boiler*.

Di *furnace* batubara ini dicampur dengan *material bed* (partikel kecil berupa pasir kuarsa, *bottom ash*), hsd, dan udara sehingga terbakar mengubah air yang ada di *waterwall* menjadi uap. Bed dibakar pada bagian '*bed of hot material*' yang mengambang karena sirkulasi udara dalam *furnace* (udara kecepatan tinggi). Material yang terbakar, semakin lama semakin naik ke bagian atas *furnace* karena massanya berkurang dan masuk *cyclone* separator melalui *transition piece* sehingga *flue gas* dan *fly ash* terpisah dari material. *Material solid* yang belum terbakar masuk kembali ke dalam *cyclone outlet cone* dengan bantuan udara dari *fluidizing air blower* menuju *seal pot* dan diinjeksikan kembali ke melalui *seal pot return duct furnace*, hal tersebut terjadi secara berulang.

Flue gas dan *fly ash* hasil pembakaran dihisap keluar dari boiler oleh *ID fan* dan dilewatkan melalui *electric precipitator* (ESP) yang menyerap 99.5 % dari abu terbang dan debu dengan sistem elektrode yang dihembuskan ke stack / cerobong asap. Sementara *bottom ash* dikumpulkan melalui *ash silo* dan dibawa menggunakan truk ke *ash yard*.

Sistem Air Pengisi

Sedangkan untuk alur air/uap dimulai dari air diambil dari laut melalui *water intake*. Di dalam *water intake*, air dilewatkan *steel gate* (normaly open) kemudian *bar screen / trash machine* dan terakhir *travelling screen* sebagai filter terhadap ikan maupun sampah dengan diameter tertentu. Kemudian dipompakan ke (*cooling water*) CW Pipe melalui *circulating water pump*. Dari CW Pipe, air laut yang mengalir terbagi menjadi dua, sebagai supply air di *demineralized water* dan kondenser. Dari *demineralized water* air masuk ke boiler (*economizer*) melalui BFP (*Boiler Feed Pump*) dan langsung dialirkan ke *steam drum* turun melalui *downcomer* dan masuk ke *waterwall*, panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar diserap oleh pipa-pipa penguap/*waterwall* menjadi uap jenuh/, kemudian masuk ke *steam drum*, di dalam *steam drum* air dan uap dipisahkan. Air kembali masuk ke *downcomer* sementara uap langsung dialirkan ke panel *superheater* (platen) kemudian ke low temperatur *superheater* kemudian ke *high temperature superheater*. Kemudian keluaran dari *superheater* ini akan langsung masuk ke *turbine*.

Sementara itu, uap bekas dikembalikan menjadi air di kondensor. Di dalam kondensor, uap mengalami pertukaran panas dengan air laut yang dipasok oleh CWP (*Circulating Water Pump*). Inilah yang membuat uap menjadi air dan kenaikan temperatur air laut keluaran *discharge canal*. Air kondensasi akan digunakan kembali di boiler. Air dipompakan dari *condensor* dengan menggunakan *condensate pump*, dipanaskan lagi oleh LP (*Low Pressure*) heater, dinaikkan ke *deaerator*. Di dalam daerator tank, gelembung-gelembung oksigen yang membahayakan pipa-pipa boiler diserap. Keluar dari *deaerator*, air kemudian dipompa oleh *boiler feed pump* melalui HP (*High Pressure*) Heater. Dari sinilah air yang sudah dinaikkan tekanannya masuk ke *economizer* untuk diberi pemanasan awal.

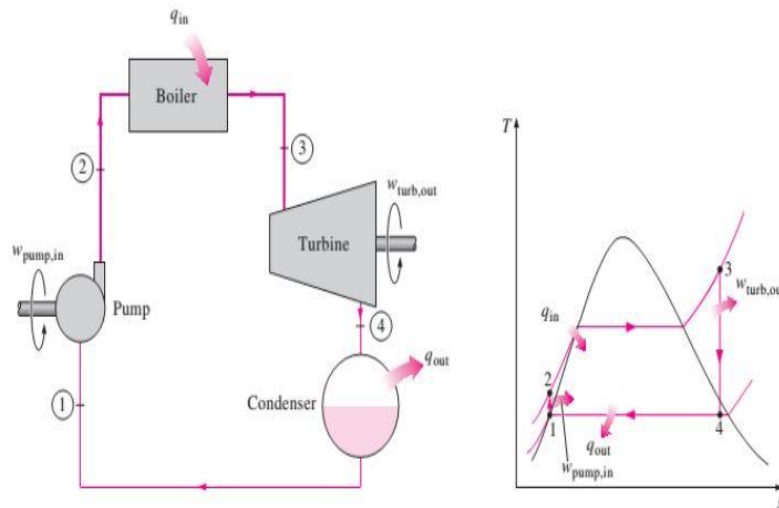
Poros turbin dikopel dengan *rotor generator*. Rotor dalam *elektromagnit* berbentuk silinder ukuran ikut berputar apabila turbin berputar. Generator dibungkus dalam *stator generator*. Stator ini digulung dengan menggunakan batang tembaga. Listrik dihasilkan dalam batangan tembaga pada *stator* oleh *elektromagnit rotor* melalui perputaran dari medan magnit. Tegangan listrik kemudian dinaikkan dengan *generator transformer*.

Siklus Rankine

Siklus ideal yang mendasari siklus kerja dari suatu pembangkit daya uap adalah siklus Rankine. Siklus Rankine berbeda dengan siklus – siklus udara ditinjau dari fluida kerjanya yang mengalami perubahan fase selama siklus pada saat evaporasi dan kondensasi. Perbedaan lainnya secara termodinamika siklus uap dibandingkan dengan siklus gas adalah bahwa perpindahan kalor pada siklus uap dapat terjadi secara *isothermal*.

Proses perpindahan kalor yang sama dengan proses perpindahan kalor pada siklus Carnot dapat dicapai pada daerah uap basah, perubahan *entalpi fluida* kerja akan menghasilkan penguapan atau kondensasi, tetapi tidak pada perubahan temperature. Temperature hanya diatur oleh tekanan uap *fluida*.

Kerja pompa pada siklus *Rankine* untuk menaikkan tekanan fluida kerja dalam fase cair akan jauh lebih kecil dibandingkan dengan pemampatan untuk campuran uap dalam tekanan yang sama pada siklus *Carnot*. Siklus *Rankine* ideal dapat digambarkan dalam diagram T-S seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 3. Siklus Rankine sederhana
(<http://sim-energi.blogspot.co.id>)

Siklus Rankine ideal terdiri dari 4 tahapan proses:

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

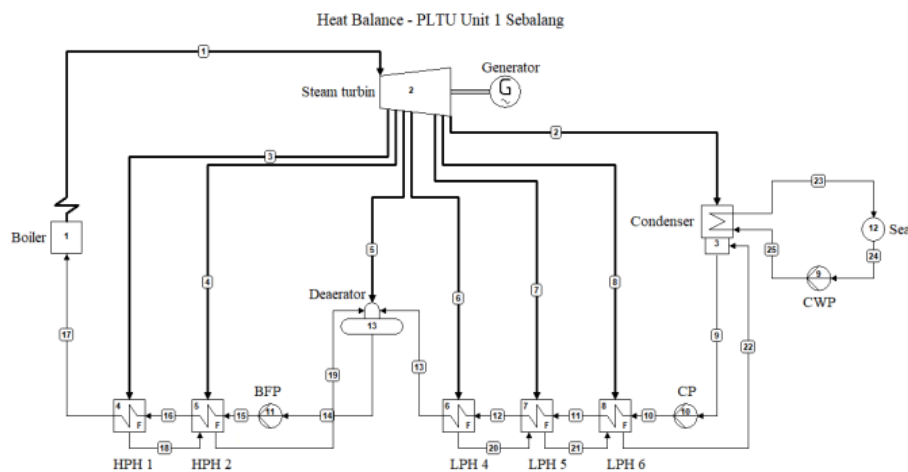
Air masuk pompa pada kondisi 1 sebagai cairan jenuh (*saturated liquid*) dan dikompresi sampai tekanan operasi boiler. Temperature air akan meningkat selama kompresi *isentropic* karena menurunnya volume spesifik air. Air memasuki boiler sebagai cairan terkompresi (*compressed liquid*) pada kondisi 2 dan akan menjadi uap *superheated* pada kondisi 3. Dimana panas diberikan oleh boiler ke air pada tekanan yang tetap. Boiler dan seluruh bagian yang dihasilkan steam ini disebut sebagai steam generator. Uap *superheated* pada kondisi 3 kemudian akan memasuki turbin untuk diekspansi secara *isentropic* dan akan menghasilkan kerja untuk memutar *shaft* yang terhubung dengan generator listrik sehingga dapat dihasilkan listrik. Tekanan dan temperature dari steam akan turun selama proses ini menuju keadan 4 steam akan masuk kondensor dan biasanya

sudah berupa uap jenuh. *Steam* ini akan dicairkan pada tekanan konstan didalam kondensor dan akan meninggalkan kondensor sebagai cair jenuh yang akan masuk pompa untuk melengkapi siklus ini.

Siklus Regenerative

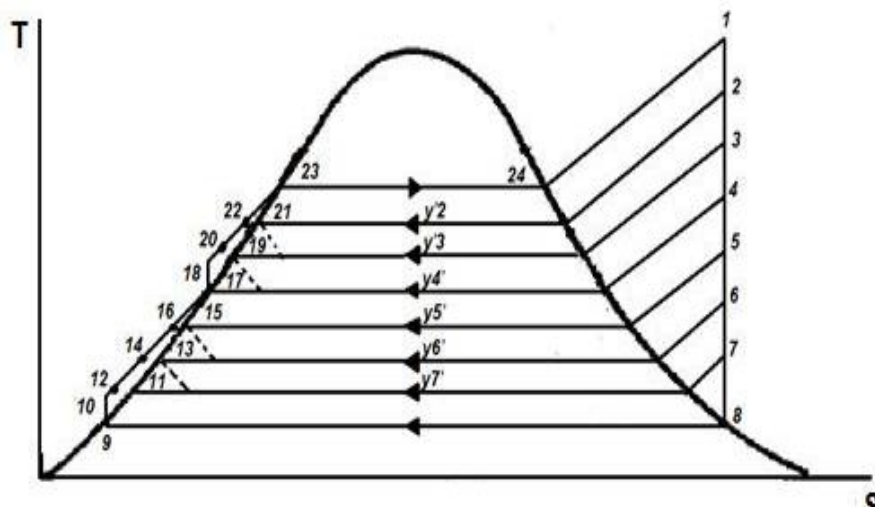
Ada beberapa cara untuk meningkatkan efisiensi termal siklus rankine dengan memodifikasi siklusnya. Salah satu cara meningkatkan efisiensi siklus rankine adalah dengan menggunakan preheater atau pemanasan awal dari fluida kerja sebelum masuk ke boiler. Cara ini disebut dengan *Regenerative Rankine Cycle*.

Sumber panas yang digunakan untuk preheater berasal dari uap yang diambil dari turbine uap pada stage tertentu (*Extraction Steam*). Uap panas ini dialirkan melewati pipa menuju ke heat exchanger dan bertemu dengan air kondensat atau feed water. Air kondensat yang keluar dari kondensor dipompa oleh pompa ekstraksi kondensat menuju *heat exchanger* tersebut.



Gambar 4. Siklus PLTU Unit 1 Sebalang
(Sumber: Simulasi *Cycle Tempo Release 5.0*)

Dalam siklus PLTU Sebalang diatas dapat digambarkan dalam diagaram T – S sebagai berikut :



Gambar 5. Diagram T – S dengan penambahan Feed water heater

(Sumber: Muhammad Ridho: 2017)

Proses:

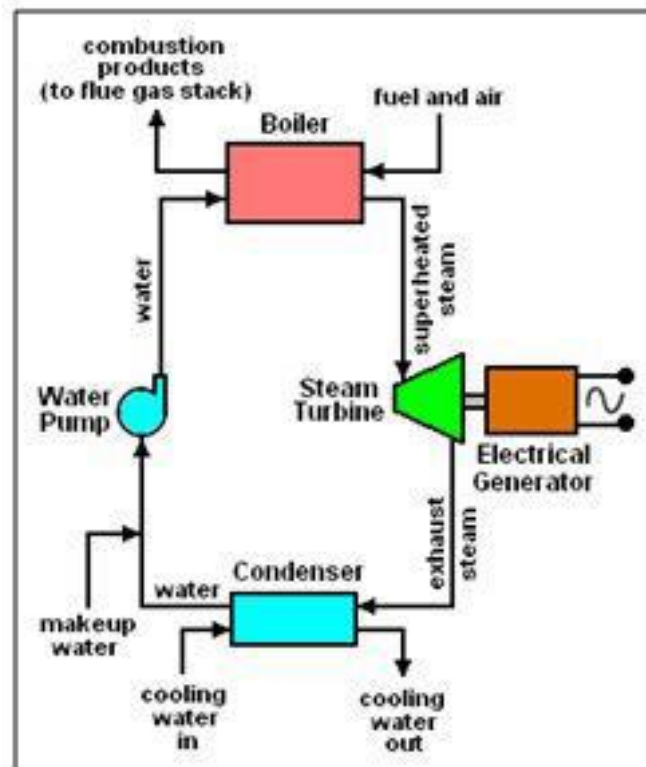
- 1 – 8 : Proses Ekspansi Isentropik di dalam turbin.
- 2 – 21 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke HPH 1.
- 3 – 19 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke HPH 2.
- 4 – 17 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke *Deaerator*.
- 5 – 15 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke LPH 4.
- 6 – 13 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke LPH 5.
- 7 – 11 : Proses ekstraksi uap dari turbin ke LPH 6.
- 8 – 9 : Merupakan proses pelepasan kalor ke lingkungan pada tekanan konstan terjadi di Kondensor.
- 9 – 10 : Proses Penaikan tekanan di Condensate Pump.
- 10 – 17 : Penambahan panas oleh Low Pressure Heater.
- 17 – 18 : Proses penaikan tekanan air oleh Boiler Feed Pump.
- 18 – 23 : Pemanasan air pada *high pressure heater* dan pada *economizer*.
- 23 – 24 : Perubahan fasa dari air menjadi uap terjadi di evaporator.
- 24 – 1 : Pemanasan uap air menjadi uap panas lanjut (*superheated steam*) pada superheater.

Siklus Uap dan Air PLTU

Prinsip kerja dari PLTU adalah dengan menggunakan siklus air-uap-air yang merupakan suatu sistem tertutup air dari kondensat atau air dari hasil proses pengkondensasian di kondensor dan *make up water* (air yang dimurnikan) dipompa oleh *condensat pump* ke pemanas tekanan rendah. Disini air dipanasi kemudian dimasukkan oleh *daerator* untuk menghilangkan oksigen, kemudian air ini dipompa oleh *boiler feed water pump* masuk ke *economizer*. Dari *economizer* yang selanjutnya dialirkan ke pipa untuk dipanaskan pada *tube boiler*.

Pada *tube*, air dipanasi berbentuk uap air. Uap air ini dikumpulkan kembali pada steam drum, kemudian dipanaskan lebih lanjut pada superheater sudah berubah menjadi uap kering yang

mempunyai tekanan dan temperatur tinggi, dan selanjutnya uap ini digunakan untuk menggerakkan sudu turbin tekanan tinggi, untuk sudu turbin menggerakkan poros turbin. Hasil dari putaran poros turbin kemudian memutar poros generator yang dihubungkan dengan *coupling*, dari putaran ini dihasilkan energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari generator disalurkan dan di distribusikan lebih lanjut ke pelanggan. Uap bebas dari turbin selanjutnya di kondensasikan dari kondensor dan bersama air dari *make up water pump* dipompa lagi oleh pompa kondensat masuk ke pemanas tekanan rendah, *daerator*, *boiler feed water pump*, pemanas tekanan tinggi, *economizer*, dan akhirnya menuju *boiler* untuk dipanaskan menjadi uap lagi. Proses ini akan terjadi berulang-ulang.



Gambar 1. Siklus fluida kerja sederhana PLTU
(Sumber: Manual Book PLTU Sebalang)

2.2. 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. Tergantung pada jenis mekanisme yang digunakan, turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang seperti pada bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik dan untuk transportasi. Pada proses perubahan energi potensial menjadi energi mekanisnya yaitu dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara.

Pada dasarnya turbin uap terdiri dari dua bagian utama, yaitu stator dan rotor yang merupakan komponen utama pada turbin kemudian di tambah komponen lainnya yang meliputi pendukungnya seperti bantalan, kopling dan sistem bantu lainnya agar kerja turbin dapat lebih baik. Sebuah turbin uap memanfaatkan energi kinetik dari fluida kerjanya yang bertambah akibat penambahan energi termal.

Turbin uap adalah suatu penggerak mula yang mengubah energi potensial menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanik dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin langsung atau dengan bantuan elemen lain, dihubungkan dengan mekanisme yang digerakkan. Tergantung dari jenis mekanisme yang digerakkan turbin uap dapat digunakan pada berbagai bidang industri, seperti untuk pembangkit listrik.

Turbin uap digunakan sebagai penggerak mula PLTU, seperti untuk menggerakkan pompa, compressor dan lain-lain. Jika di bandingkan dengan penggerak generator listrik yang lain, turbin uap mempunyai kelebihan lain antara lain:

- Penggunaan panas yang lebih baik.
- Pengontrolan putaran yang lebih mudah
- Tidak menghasilkan loncatan bunga api listrik
- Uap bekasnya dapat digunakan kembali untuk proses.

Siklus yang terjadi pada turbin uap adalah siklus Rankine, yaitu berupa siklus tertutup, dimana uap bekas dari turbin di manfaatkan lagi dengan cara mendinginkannya kembali di kondensor, kemudian dialirkan lagi di pompa dan seterusnya sehingga merupakan siklus tertutup.



Gambar 7. Turbin uap
(Sumber: Dokumentasi Penulis)

Prinsip Kerja Turbin Uap

Turbin uap merupakan satu penggerak mula yang mengubah energi potensial uap menjadi energi kinetik dan energi kinetik ini selanjutnya diubah menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros turbin. Poros turbin, langsung atau dengan bantuan roda gigi reduksi, dihubungkan dengan mekanisme yang di gerakkan. Tergantung kepada mekanisme yang digerakkan, turbin uap di pakai dalam beberapa bidang industri, untuk pembangkit tenaga listrik, dan untuk transportasi. Dalam perancangan ini, turbin uap digunakan untuk menggerakkan generator tenaga listrik pada PLTU.

Turbin uap terdiri dari sebuah cakram yang dikelilingi oleh daun-daun cakram yang disebut sudu-sudu. Sudu-sudu ini berputar karena tiupan dari uap bertekanan yang berasal dari ketel uap, yang telah dipanasi terdahulu dengan menggunakan bahan bakar padat, cair dan gas.

Uap tersebut kemudian dibagi dengan menggunakan control valve yang akan dipakai untuk memutar turbin yang dikopelkan langsung dengan pompa dan juga sama halnya dikopel dengan sebuah generator sinkron untuk menghasilkan energi listrik.

Setelah melewati turbin uap, uap yang bertekanan dan bertemperatur tinggi tadi muncul menjadi uap bertekanan rendah. Panas yang sudah diserap oleh kondensor menyebabkan uap

berubah menjadi air yang kemudian dipompakan kembali menuju boiler. Sisa panas dibuang oleh kondensor mencapai setengah jumlah panas semula yang masuk. Hal ini mengakibatkan efisiensi termodinamika suatu turbin uap bernilai lebih kecil dari 50%. Turbin uap yang modern mempunyai temperatur boiler sekitar 5000 °C sampai 6000 °C dan temperatur kondensor 200 °C sampai 300 °C.

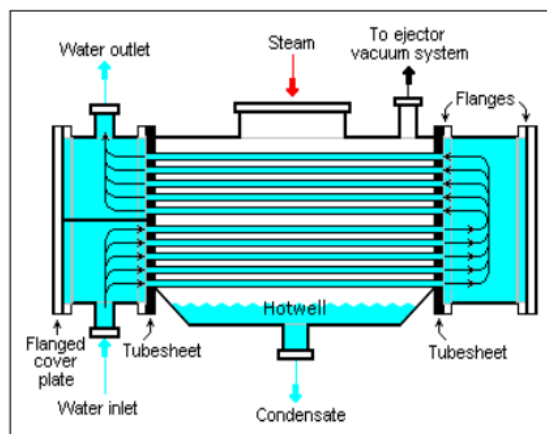
Untuk mengubah energi potensial uap menjadi energi mekanis dalam bentuk putaran poros dilakukan dengan berbagai cara, sehingga secara umum turbin uap dibagi menjadi tiga jenis utama, yaitu: turbin uap impuls, reaksi dan gabungan (impuls-reaksi). Selama proses ekspansi uap di dalam turbin juga terjadi beberapa kerugian utama yang dikelompokkan menjadi dua jenis kerugian utama, yaitu kerugian dalam dan kerugian luar. Hal ini mengakibatkan terjadinya kehilangan energi, penurunan kecepatan dan penurunan tekanan dari uap tersebut yang pada akhirnya akan mengurangi efisiensi siklus dan penurunan daya generator yang akan dihasilkan oleh generator listrik.

2.3. Kondensor

Pengertian Kondensor

Kondensor yang digunakan pada PLTU Sebalang unit 1 merupakan alat penukar kalor (*heat exchanger*) yang berfungsi mengkondensasikan uap yang keluar dari *LP (low pressure) Turbine* menjadi air dengan pendinginan menggunakan air laut atau mengubah fase *exhaust steam* (uap *mixture*) yang berasal dari *LP Turbine* menjadi fase cair. Agar proses PLTU lebih efisien, maka tekanan di kondenser harus rendah (*vacuum*). Kevakuman pada kondenser didapatkan dengan cara menghisap ruang kondenser dengan *Vacuum Pump*, kemudian membuang gas - gas yang tidak dapat terkondensasi sehingga kevakuman kondensor dapat terjaga. Air hasil kondensasi disebut air kondensat (*condensate water*). Selanjutnya air tersebut disirkulasikan kembali ke boiler untuk diproses kembali menjadi uap.

Uap mengalir di luar pipa - pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai air pendingin mengalir di dalam pipa - pipa (*tube side*). Air pendingin diambil dari sumber yang cukup besar persediannya, yaitu dari laut.



Gambar 8. Kondensor
(Sumber : Manual Book PLN)

Berikut merupakan spesifikasi kondensor PLTU Sebalang unit 1:

1. Type : N-7600-1
2. Manufacture : CCJEC Wuhan
3. Performance data:
 - Design heat duty : 6.52657×10^8 kJ/H

- Design abs pressure	: 60 mmHg.abs
- Heat transfer coef.	: Later
- CW inlet temp.	: 30 °C
- CW outlet temp.	: 38.238 °C
- Cleanliness factor	: 0.9 %
- Oxygent content	: 40 cc/l
4. Water velocity in tube	: 2.3 m/sec
5. Friction loss through tube	: 0.55 kg/cm ²
6. Total effective tube surface	: 7600 m ²
7. Tube:	
- Effective tube length	: 9515 mm
- Overall tube lengthm	: Later
- Size and thickness	: D25 x 0.5 mm
- Number of tube	: 10172
- Material	: TA2
8. Tube sheet:	
- Material	: 16MnR+TA2
- Thickness	: Later
- Hotwell capacity	: 17.4 m ³
9. Design Pressure:	
- Water box and tube	: 350 kpa
- Shell	: 100 kpa

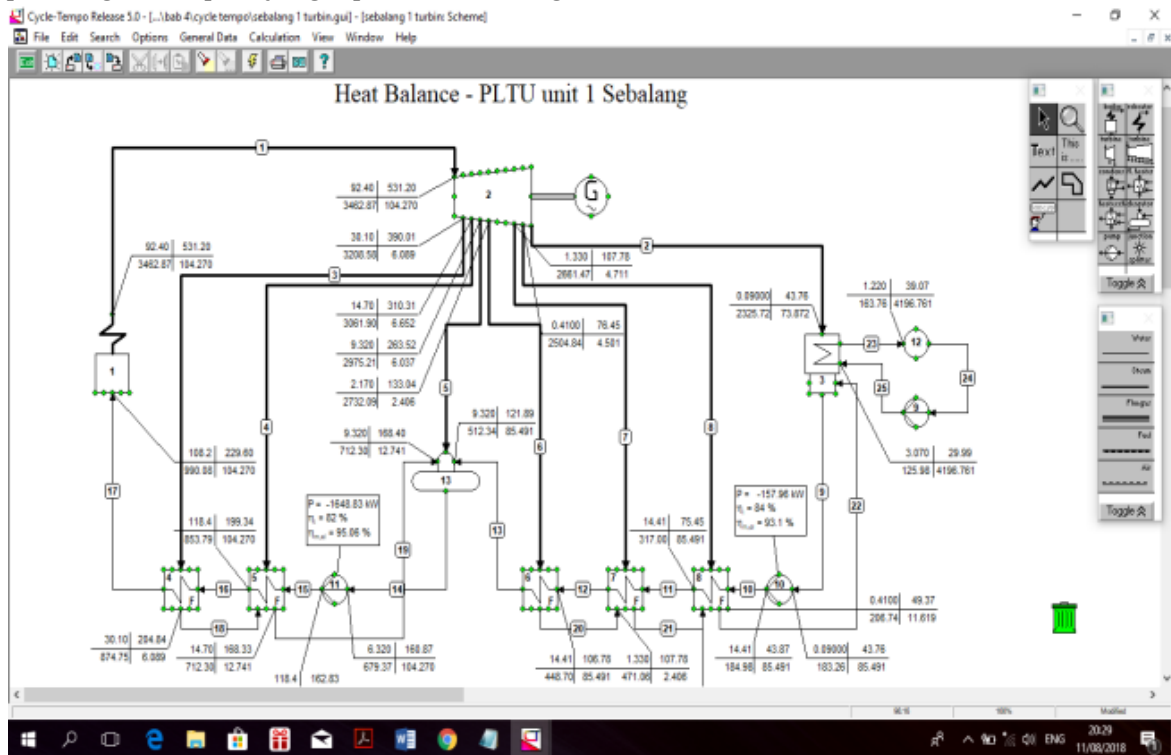
Prinsip Kerja Kondensor

Kondensor adalah peralatan yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi air. Proses perubahannya dilakukan dengan cara mengalirkan uap ke dalam suatu ruangan yang berisi pipa-pipa (tubes). Uap mengalir di luar pipa-pipa (*shell side*) sedangkan air sebagai pendingin mengalir di dalam pipa-pipa (*tube side*). Kondensor seperti ini disebut kondensor tipe surface (permukaan). Kebutuhan air untuk pendingin di kondensor sangat besar sehingga dalam perencanaan biasanya sudah diperhitungkan. Air pendingin diambil dari sumber yang cukup persediannya, yaitu dari danau, sungai atau laut. Posisi kondensor umumnya terletak dibawah turbin sehingga memudahkan aliran uap keluar turbin untuk masuk kondensor karena gravitasi.

Laju perpindahan panas tergantung pada aliran air pendingin, kebersihan pipa-pipa dan perbedaan temperatur antara uap dan air pendingin. Proses perubahan uap menjadi air terjadi pada tekanan dan temperatur jenuh, dalam hal ini kondensor berada pada kondisi vakum. Karena temperatur air pendingin sama dengan temperatur udara luar, maka temperatur air kondensatnya maksimum mendekati temperatur udara luar. Apabila laju perpindahan panas terganggu, maka akan berpengaruh terhadap tekanan dan temperatur.

2.4. Cycle Tempo

Cycle tempo merupakan *software* atau aplikasi yang digunakan untuk merancang, menganalisa, mengoptimalkan dan memonitor termodinamika dari sistem energi ataupun siklus pembangkitan seperti yang diperlihatkan oleh gambar 9.



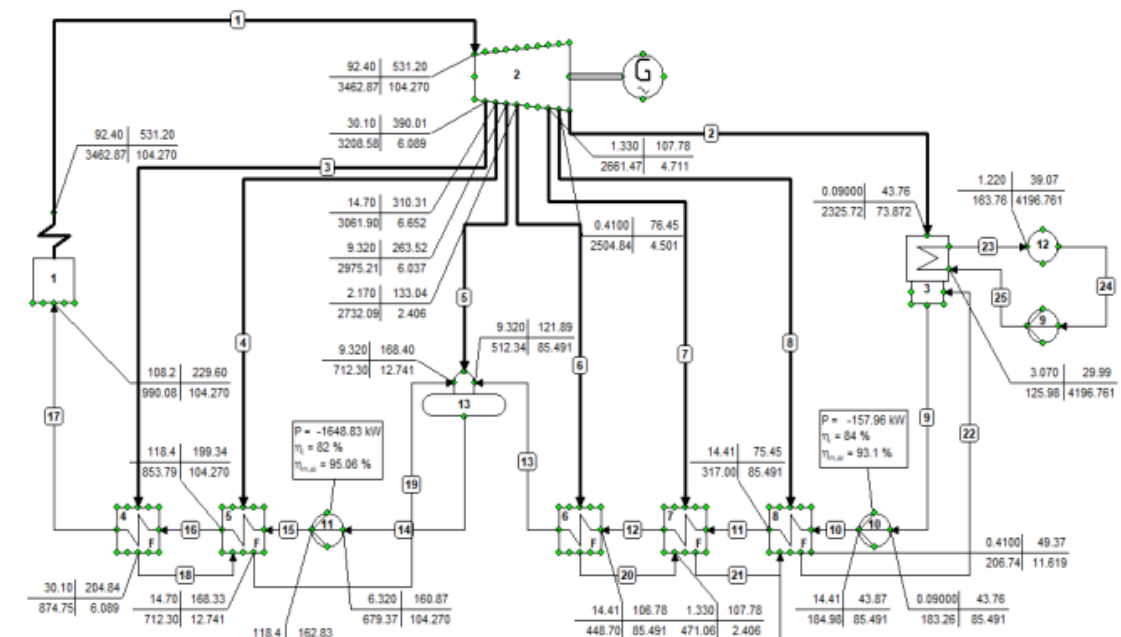
Gambar 9. Display aplikasi cycle tempo release 5.0

2.5. Heat Balance

Perbandingan panas yang diterima dan dikeluarkan (baik berguna dikeluarkan dan kehilangan) dalam berbagai proses termal. Saldo panas yang digunakan dalam rekayasa untuk analisis proses termal yang terjadi, misalnya, ketel uap, tungku, dan mesin panas. Keseimbangan panas dapat dinyatakan dalam satuan energi, seperti *joule* atau kalori, atau dalam persen dari jumlah total panas per unit *output*, per jam operasi, per periode waktu (siklus), atau per kilogram bahan yang digunakan. Dalam penelitian ilmiah, saldo panas yang digunakan untuk memecahkan banyak masalah, misalnya, astrofisika, geofisika, kimia, dan biologi.

Sebuah keseimbangan panas dihitung atas dasar entalpi zat mengambil bagian dalam proses dan memanaskan reaksi kimia yang sesuai. Untuk proses yang kompleks, terutama di bidang-bidang seperti metalurgi dan teknik kimia, perhitungan keseimbangan panas mendahului perhitungan keseimbangan material, yaitu, perbandingan massa *input* dan *output* zat dalam proses. Keseimbangan panas fasilitas sering diperoleh sebagai jumlah dari saldo panas dari potongan-potongan peralatan yang membentuk fasilitas. Sebuah perbedaan dibuat antara dinilai saldo panas dan saldo panas eksperimental yang diperoleh dari data pengujian termal.

Heat Balance - PLTU unit 1 Sebalang



Gambar 10. Simulasi heat balance PLTU Unit 1 Sebalang dgn cycle tempo release 5.0

2.6. Tekanan Vakum

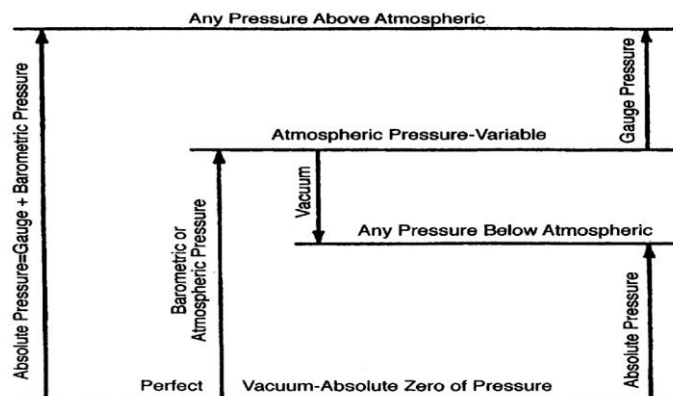
Tekanan gas dibawah tekanan atmosfer disebut tekanan vakum, rumusnya sebagai berikut:

$$P_{abs} = P_{atm} - P_{vakum}$$

P.abs: tekanan *absolute* kondensor
(bar).

P.atm: tekanan atmosfer (1bar).

P.vak: tekanan vakum kondensor (bar).



Gambar 11. Hubungan antara absolut, gauge, dan tekanan vakum

(Sumber: <http://refiners-notes.blogspot.co.id>)

2.7. Efisiensi Isentropik steam turbin

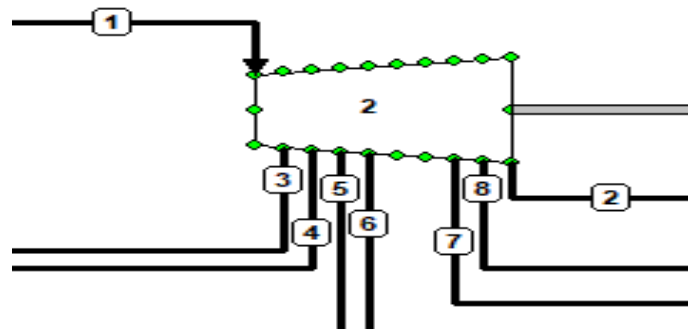
Untuk mencari efisiensi isentropik dari *steam* turbin dapat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \dots \dots \dots (2.1)^{[2]}$$

Keterangan:

- h_1 : entalpi uap aktual masuk *steam* turbin (kj/kg)
 h_2 : entalpi uap aktual keluar *steam* turbin (kj/kg)
 h_{2s} : entalpi uap ideal keluar *steam* turbin (kj/kg)

2.8. Kerja Turbin



Gambar 12. Kesenjangan kalor di Steam turbin

Kerja dari steam turbin dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

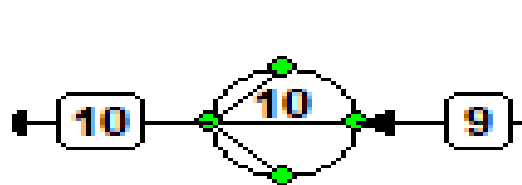
$$W_{\text{Turbin}} = (m_1 \times h_1) - (m_2 \times h_2) - (m_3 \times h_3) - (m_4 \times h_4) - (m_5 \times h_5) - (m_6 \times h_6) - (m_7 \times h_7) - (m_8 \times h_8) \dots \dots \dots 2.2)^{[1]}$$

Keterangan:

- W_{Turbin} : Kerja High Pressure turbin (kW)
 m_1 : Laju aliran massa uap masuk steam turbin (kg/s)
 h_1 : Entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)
 m_2 : Laju aliran massa uap keluar steam turbin (kg/s)
 h_2 : Entalpi uap keluar steam turbin (kJ/kg)
 m_3 : Laju aliran massa uap masuk HPH 1 (kg/s)
 h_3 : Entalpi uap masuk HPH 1 (kJ/kg)
 m_4 : Laju aliran massa uap masuk HPH 2 (kg/s)
 h_4 : Entalpi uap masuk HPH 2 (kJ/kg)
 m_5 : Laju aliran massa uap masuk deaerator (kg/s)
 h_5 : entalpi uap masuk deaerator (kJ/kg)
 m_6 : Laju aliran massa uap masuk LPH 4 (kg/s)
 h_6 : entalpi uap masuk LPH 4 (kJ/kg)
 m_7 : Laju aliran massa uap masuk LPH 5 (kg/s)

h_7 : entalpi uap masuk LPH 5 (kJ/kg)
 m_8 : Laju aliran massa uap masuk LPH 6 (kg/s)
 h_8 : Entalpi uap masuk LHP 6 (kJ/kg)

2.9. Kerja Pompa



Gambar 13. Kestimbangan kalor di condensate pump



Gambar 14. Kestimbangan kalor di Boiler Feed Pump

Kerja total pompa dapat dihitung dengan menjumlahkan kerja dari *condensate pump* dan *boiler feed pump*. Masing – masing kerja pompa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$W_{CP} = (m_9 \times h_9) - (m_{10} \times h_{10}) \dots\dots(2.3)^{[1]}$$

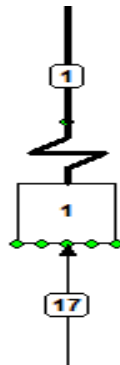
$$W_{BFP} = (m_{14} \times h_{14}) - (m_{15} \times h_{15}) \dots\dots(2.4)^{[1]}$$

$$W_{Total} = W_{CP} + W_{BFP} \dots\dots(2.5)^{[1]}$$

Keterangan:

W_{CP} : kerja *condensate pump* (kW)
 W_{BFP} : kerja *boiler feed pump* (kW)
 W_{Total} : kerja total pompa (kW)
 m_9 : massa *inlet condensate pump* (kg/s)
 h_9 : entalpi *inlet condensate pump* (kJ /kg)
 m_{10} : massa *outlet condensate pump* (kg/s)
 h_{10} : entalpi *outlet condensate pump* (kJ/kg)
 m_{14} : massa *inlet boiler feed pump* (kg/s)
 h_{14} : entalpi *inlet boiler feed pump* (kJ/kg)
 m_{15} : massa *outlet boiler feed pump* (kg/s)
 h_{15} : entalpi *oulet boiler feed pump* (kJ/kg)

2.10. Panas Boiler



Gambar 15. Kestimbangan kalor pada boiler

Panas pada boiler dapat dihitung dgn menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Q_{\text{boiler}} = (m_1 \times h_1) - (m_{17} \times h_{17}) \dots (2.6)^{[1]}$$

Keterangan:

- m_1 = Laju aliran massa uap keluar boiler (kg/s)
- h_1 = entalpi uap keluar boiler (kJ/kg)
- m_{17} = Laju aliran massa air masuk boiler (kg/s)
- h_{17} = entalpi air masuk boiler (kJ/kg)

2.11. Efisiensi Termal Siklus PLTU

Efisiensi termal sebuah mesin kalor adalah perbandingan antara usaha yang dilakukan dan kalor yang diserap.

$$\eta = \frac{W_{\text{total}}}{Q_{\text{total}}} = \frac{W_{\text{turbin}} - W_{\text{pompa}}}{Q_{\text{boiler}}}$$

.....(2.7)^[1]

Keterangan:

- W_{total} : kerja total (kW)
- Q_{total} : panas total yang diserap (kW)
- W_{turbin} : kerja *steam* turbin (kW)
- W_{pompa} : kerja total pompa (kW)
- Q_{boiler} : panas yang diterima boiler (kW)

2.12. Biaya Pokok Produksi dan Penjualan Listrik

Total Produksi listrik dihasilkan selama satu tahun yang nantinya akan digunakan untuk menghitung berapa besar penjualan listrik :

$$\text{Total Prod Lis} = P \times \eta \times 24 \text{ jam} \times 365 \text{ hari}$$

Keterangan:

- Total produksi listrik (kWh)
- P = Daya (kW)
- η = Efisiensi termal Siklus PLTU
- Untuk menghitung besar penjualan listrik pertahun digunakan rumus :

Penjualan listrik pertahun =
Total produksi listrik x biaya pokok produksi

Keterangan:

Penjualan listrik pertahun (Rp)
Total produksi listrik (kWh)
Biaya pokok produksi (Rp/kWh)

3. METODE PENELITIAN

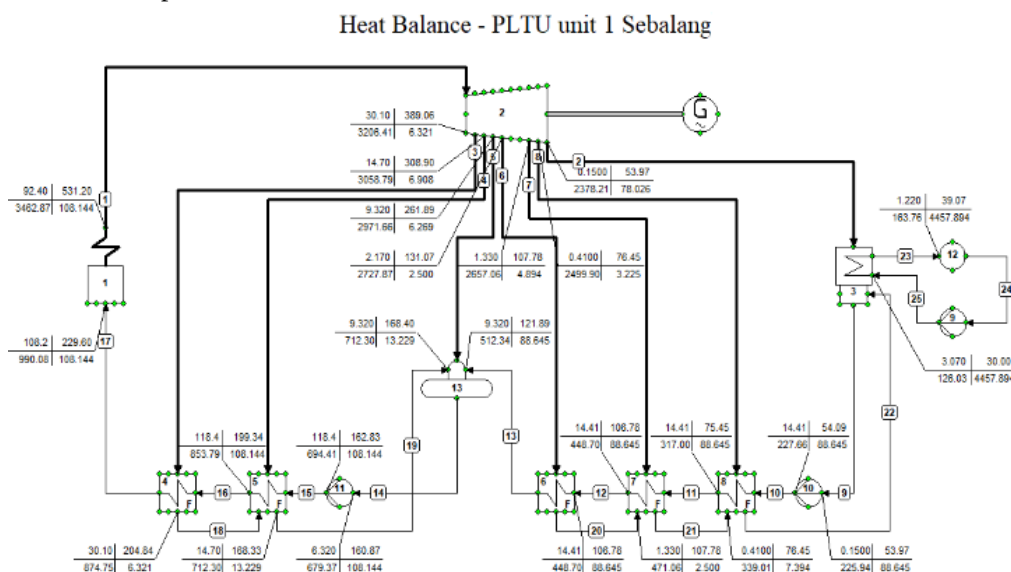
Metode penelitian ini sangat membantu penulis dalam melakukan penyusunan skripsi. Karena penulis dapat melakukan penelitian dengan benar karena terdapat rincian langkah – langkah yang akan digunakan dalam melaksanakan penelitian. Dalam penelitian ini penulis menggunakan metode simulasi dimana metode ini biasa digunakan dalam penulisan skripsi fakultas teknik. Metode simulasi yang digunakan penulis memiliki tujuan untuk merancang *heat balance* dari PLTU unit 1 Sebalang dan melakukan pengecekan serta analisa terhadap pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin, total produksi dan penjualan listrik pada PLTU Sebalang unit 1, karena dalam skripsi ini penulis mengangkat judul Analisis Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Kerja Turbin dan Produksi Listrik PLTU Unit 1 Sebalang Menggunakan Simulasi *Cycle Tempo*.

Dalam metode penelitian ini penulis merancang *heat balance* dari PLTU unit 1 Sebalang dengan berbagai variasi tekanan vakum kondensor. Dimana rancangan tersebut merupakan hasil simulasi dari data – data yang diperoleh penulis dalam melakukan penelitian di PT. PLN (persero) Sektor Pembangkitan Sebalang menggunakan aplikasi *cycle tempo release 5.0*.

4. HASIL DAN ANALISA

4.1. Hasil Pengolahan Data Sekunder

Data perhitungan ini adalah data *Performance test* PLTU Unit 1 Sebalang pada tanggal 16 November 2016 yang digunakan sebagai data konstan untuk simulasi menggunakan aplikasi *Cycle Tempo Release 5.0*. Kemudian tekanan vakum kondensornya akan divariasi antara 0,08 – 0,15 bar abs pada beban tetap 100 MW.



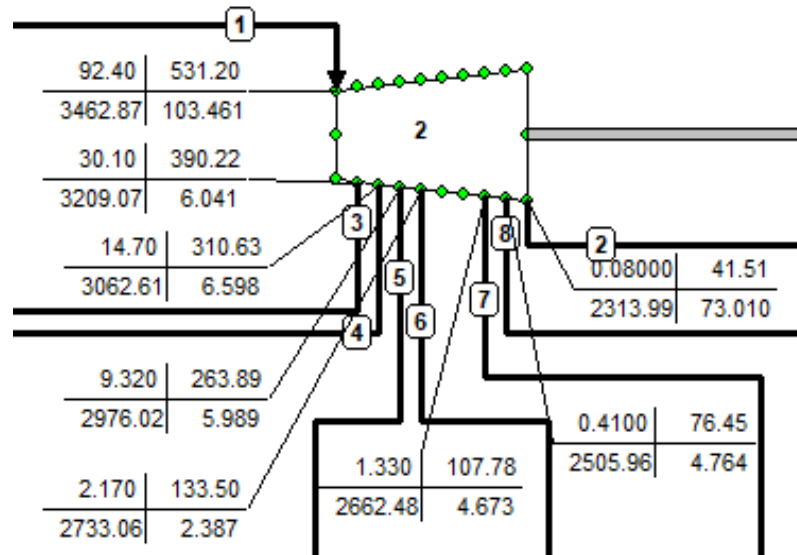
Gambar 16. Hasil simulasi Cycle tempo release 5.0

Hasil Pengolahan Data Primer

Berdasarkan *heat balance* hasil simulasi menggunakan *Cycle Tempo Release 5.0* akan digunakan untuk menghitung kerja turbin, kerja pompa, Q boiler dan efisiensi siklus dari PLTU unit 1 Sebalang.

Perhitungan kondisi tekanan vakum kondensor 0,08 bar abs.

Menghitung kerja *steam* turbin



Gambar 17. Kesetimbangan kalor pada steam turbin

$$W_{\text{Turbine}} = (m_1 \times h_1) - (m_2 \times h_2) - (m_3 \times h_3) - (m_4 \times h_4) - (m_5 \times h_5) - (m_6 \times h_6) - (m_7 \times h_7) - (m_8 \times h_8)$$

$$= 117.243,13 \text{ kW}$$

Menghitung Efisiensi isentropik *steam* turbin

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

$$= 0,8457 \times 100 \%$$

$$= 84,57 \%$$

Menghitung kerja pompa

a. Kerja *condensate pump*

$$W_{\text{CP}} = (m_{10} \times h_{10}) - (m_9 \times h_9)$$

$$= 145,06 \text{ kW}$$

b. Kerja *boiler feed pump*

$$W_{\text{BFP}} = (m_{15} \times h_{15}) - (m_{14} \times h_{14})$$

$$= 1.556,04 \text{ kW.}$$

c. Kerja total pompa

Untuk mencari kerja total pompa dapat dihitung dengan menjumlahkan kerja *condensate pump* dan *boiler feed pump*.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{CP}} + W_{\text{BFP}}$$

$$= 145,06 \text{ kW} + 1.556,04 \text{ kW}$$

$$= 1.701,1 \text{ kW}$$

Menghitung Q boiler

$$Q_{\text{boiler}} = (m_1 \times h_1) - (m_{17} \times h_{17})$$

$$= 251.194,04 \text{ kW.}$$

Menghitung efisiensi termal siklus PLTU

$$\eta = \frac{W_{\text{turbine}} - W_{\text{pompa}}}{Q_{\text{boiler}}} \times 100 \%$$

$$= 0,4599 \times 100 \%$$

$$= 45,99 \%$$

Biaya Pokok Produksi dan Penjualan Listrik

Dengan melihat adanya perubahan efisiensi siklus PLTU dikarenakan tekanan vakum kondensor maka selanjutnya dapat dihitung kerugian biaya dalam satu tahun akibat naiknya tekanan vakum kondensor dengan asumsi beban tetap 100 MW, konsumsi bahan bakar juga tetap dan biaya pokok produksi / kWh (area Lampung) sebesar Rp 936 /kWh.

$$\text{Total produksi listrik} = \text{Daya} \times \text{Efisiensi siklus} \times 24 \text{ jam} \times 365 \text{ hari}$$

$$= 402.872.400 \text{ kWh.}$$

$$\text{Penjualan Listrik pertahun} = \text{Total produksi listrik} \times \text{BPP}$$

$$= 402.872.400 \text{ kWh} \times \text{Rp. 936/kWh}$$

$$= \text{Rp. 377.088.566.400}$$

Perhitungan kondisi tekanan vakum kondensor 0,15 bar abs.

Menghitung kerja steam turbin

$$W_{\text{Turbine}} = (m_1 \times h_1) - (m_2 \times h_2) - (m_3 \times h_3) - (m_4 \times h_4) - (m_5 \times h_5) - (m_6 \times h_6) - (m_7 \times h_7) - (m_8 \times h_8)$$

$$= 101.013,72 \text{ kW}$$

Menghitung Efisiensi isentropik steam turbin

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \times 100 \%$$

$$= 0,7984 \times 100 \%$$

$$= 79,84 \%$$

Menghitung kerja pompa

a. Kerja condensate pump

$$W_{\text{CP}} = (m_{10} \times h_{10}) - (m_9 \times h_9)$$

$$= 152,48 \text{ kW}$$

b. Kerja boiler feed pump

$$W_{\text{BFP}} = (m_{15} \times h_{15}) - (m_{14} \times h_{14})$$

$$= 1.626,42 \text{ kW.}$$

c. Kerja total pompa

Untuk mencari kerja total pompa dapat dihitung dengan menjumlahkan kerja *condensate pump* dan *boiler feed pump*.

$$W_{\text{total}} = W_{\text{CP}} + W_{\text{BFP}}$$

$$= 152,48 \text{ kW} + 1.626,42 \text{ kW}$$

$$= \mathbf{1.778,9 \text{ kW}}$$

Menghitung Q boiler

$$Q_{\text{boiler}} = (m_1 \times h_1) - (m_{17} \times h_{17})$$

$$= \mathbf{267.407,51 \text{ kW.}}$$

Menghitung efisiensi termal siklus PLTU

$$\eta = \frac{W_{\text{turbin}} - W_{\text{pompa}}}{Q_{\text{boiler}}} \times 100 \%$$

$$= 0,3711 \times 100 \%$$

$$= \mathbf{37,11 \%}$$

Biaya Pokok Produksi dan Penjualan Listrik

Dengan melihat adanya perubahan efisiensi siklus PLTU dikarenakan tekanan vakum kondensor maka selanjutnya dapat dihitung kerugian biaya dalam satu tahun akibat naiknya tekanan vakum kondensor dengan asumsi beban tetap 100 MW, konsumsi bahan bakar juga tetap dan biaya pokok produksi / kWh (area Lampung) sebesar Rp 936 /kWh.

$$\text{Total produksi listrik} = \text{Daya} \times \text{Efisiensi siklus} \times 24 \text{ jam} \times 365 \text{ hari}$$

$$= 100.000 \text{ kW} \times 0,3711 \times 24 \text{ jam} \times 365 \text{ hari}$$

$$= \mathbf{325.083.600 \text{ kWh.}}$$

$$\text{Penjualan Listrik pertahun} = \text{Total produksi listrik} \times \text{BPP}$$

$$= 325.083.600 \text{ kWh} \times \text{Rp. 936/kWh}$$

$$= \mathbf{\text{Rp. 304.278.249.600}}$$

Hasil Simulasi dan Perhitungan Menggunakan Cycle Tempo Release 5.0

Tabel 1. Hasil Simulasi dan perhitungan pengaruh tekanan vakum kondensor yang bervariasi terhadap efisiensi siklus PLTU Unit 1 Sebalang

Tekanan vakum (kpa)	Hasil Perhitungan				
	W_{Turbin} (mW)	Efisiensi Isentr opik turbin (%)	W_{pompa} (mW)	Q_{Boiler} (mW)	Efisiensi termal siklus (%)
-92	117,22	84,58	1,70	251,20	45,99
-91	114,43	83,71	1,72	254,00	44,38
-90	111,84	82,93	1,73	256,59	42,91
-89	109,42	82,22	1,74	259,01	41,57
-88	107,15	81,56	1,75	261,28	40,34
-87	104,99	80,95	1,76	263,43	39,19
-86	102,95	80,38	1,77	265,47	38,11
-85	101,01	79,85	1,78	267,42	37,11

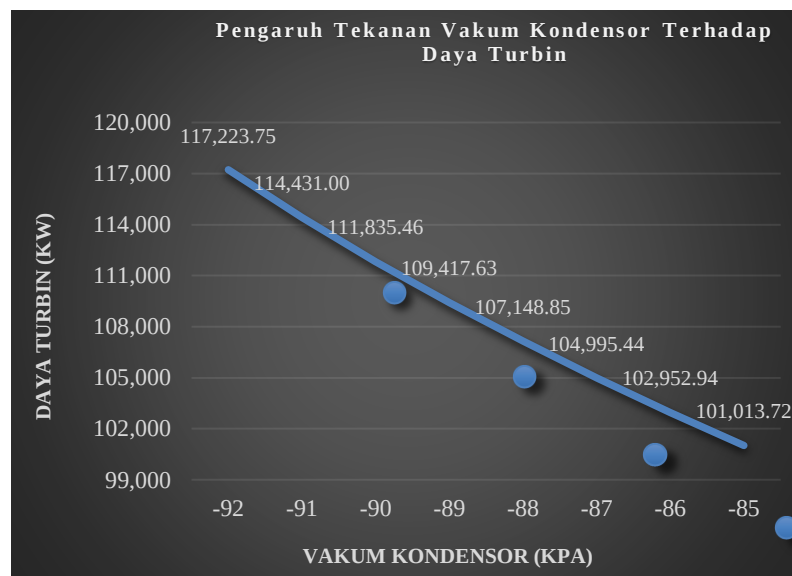
Tabel 2. Hasil perhitungan penjualan listrik per tahun

Tekanan vakum (kpa)	Daya (MW)	Efisiensi termal siklus (%)	Total Produksi listrik / tahun (mWh)	Penjualan listrik / tahun (JtRp)
-92	100	45,99	402.853,4	377.070,8
-91	100	44,38	388.732,7	363.853,8
-90	100	42,91	375.905,5	351.847,5
-89	100	41,57	364.176,4	340.869,1
-88	100	40,34	353.367,6	330.752,1
-87	100	39,19	343.290,0	321.319,4
-86	100	38,11	333.883,6	312.515,1
-85	100	37,11	325.071,0	304.266,5

4.2. Analisis Hasil Perhitungan

Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kerja dari turbin uap

Berdasarkan tabel 1 dapat digambarkan grafik pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kerja dari turbin uap

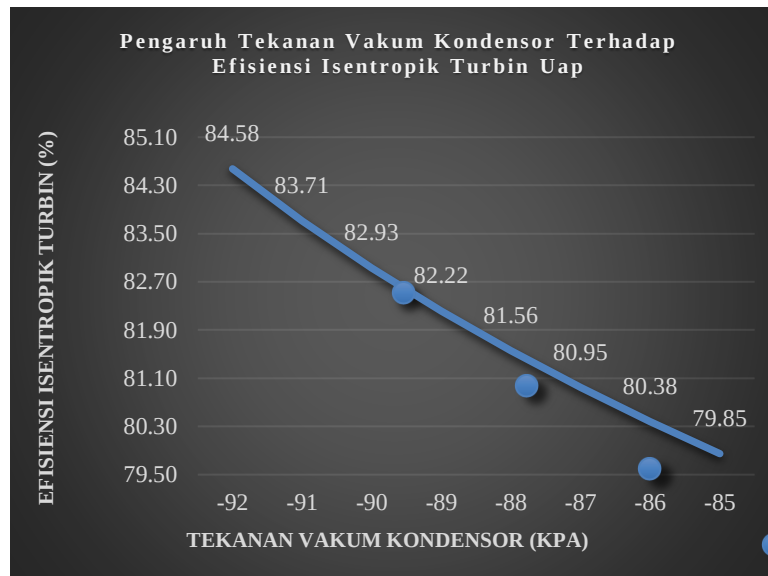


Gambar 18. Grafik pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin uap

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap kerja turbin uap. Ketika tekanan vakum kondensor pada angka -92 kPa daya yang dihasilkan turbin sebesar 117.223,75 kW dan ketika vakum kondensornya mengalami penurunan menjadi -85 kPa daya yang dihasilkan turbin juga mengalami penurunan menjadi 101.013,72 kW. Hal ini berarti daya yang dihasilkan oleh turbin uap mengalami penurunan sebesar 16.260,03 kW akibat penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa atau rata -rata penurunan daya sebesar 2.315 kW setiap 1 kPa.

Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi isentropik turbin uap

Berdasarkan tabel 2 dapat digambarkan grafik pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi isentropik dari turbin uap

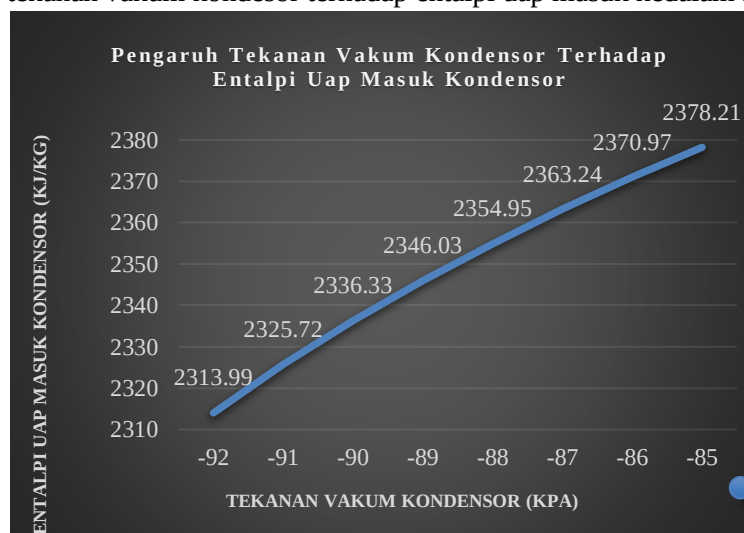


Gambar 19. Grafik pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi isentropik turbin

Berdasarkan grafik diatas dapat diketahui pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi isentropik dari turbin uap. Ketika tekanan vakum kondensor pada angka -92 kPa efisiensi isentropik turbin uap mencapai 84,58 % sedangkan ketika tekanan vakum kondensornya mengalami penurunan menjadi -85 kPa efisiensi isentropik turbin uap juga mengalami penurunan menjadi 79,85 %. Hal ini berarti efisiensi isentropik turbin uap mengalami penurunan sebesar 4,73 % yang diakibatkan oleh penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa atau rata -rata penurunan efisiensi isentropik turbin uap sebesar 0,67 % setiap 1 kPa.

Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap entalpi uap masuk kondensor

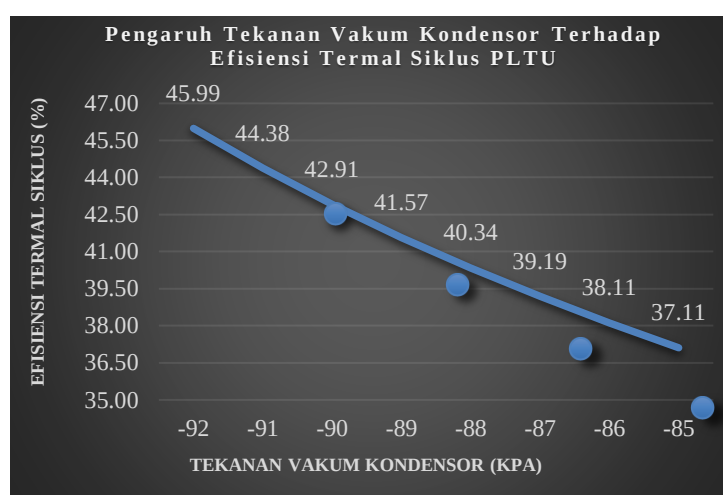
Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *cycle tempo release 5.0*, dapat dibuat grafik tentang pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap entalpi uap masuk kedalam kondensor.



Gambar 20. Grafik pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap entalpi uap masuk kondensor

Untuk entalpi uap masuk masuk kondensor terlihat dari grafik diatas bahwa penurunan tekanan vakum kondensor menyebabkan naiknya nilai entalpi uap yang masuk ke dalam kondensor. Pada tekanan vakum kondensor -92 kPa nilai entalpi uap masuk ke kondensor sebesar 2.313,99 kJ/kg sedangkan pada tekanan vakum kondensor -85 kPa nilai entalpi uap masuk kondensor mengalami kenaikan menjadi 2.378,21 kJ/kg. Dapat disimpulkan bahwa turunnya tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa mengakibatkan kenaikan nilai entalpi uap masuk kondensor sebesar 64,22 kJ/kg atau rata – rata kenaikan nilai entalpi uap sebesar 9,17 kJ/kg setiap 1 kPa.

Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi termal siklus PLTU

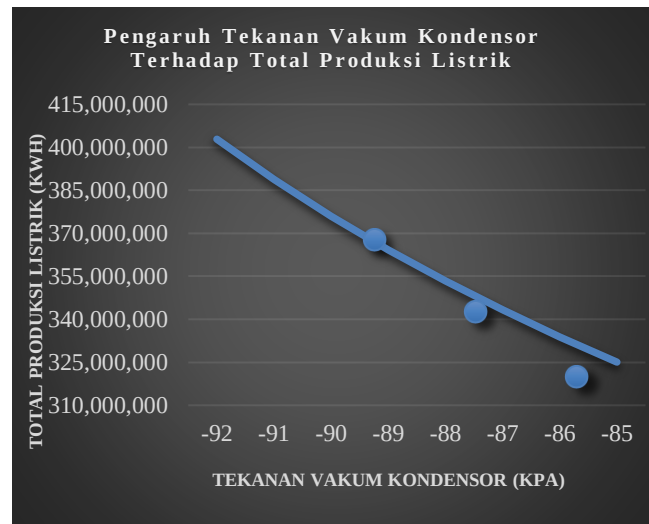


Gambar 21. Grafik Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap efisiensi termal siklus PLTU

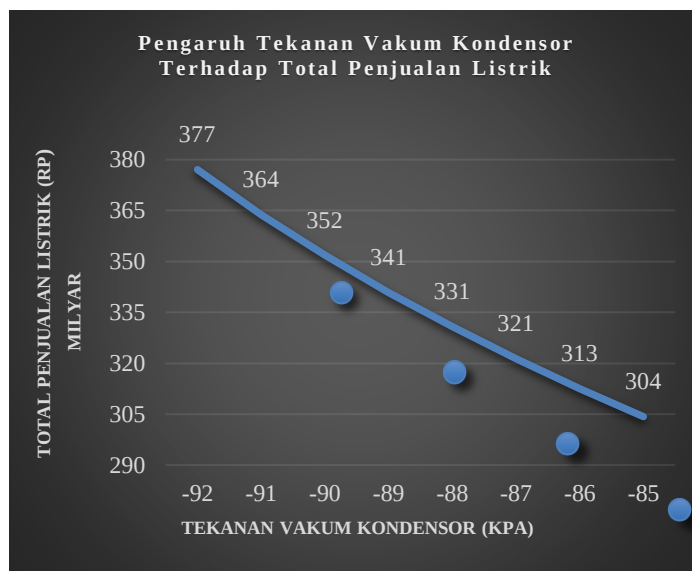
Dilihat dari gambar 21 penurunan tekanan vakum kondensor menyebabkan turunnya efisiensi siklus PLTU Unit 1 Sebalang. Pada tekanan vakum kondensor -92 kPa efisiensi termal siklus yang dihasilkan sebesar 45,99 %. Sedangkan pada saat tekanan vakum kondensor mengalami penurunan menjadi sebesar -85 kPa, efisiensi termal siklus yang dihasilkan mengalami penurunan menjadi 37,11 %. Hal ini berarti bahwa terjadinya penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa mengakibatkan ikut turunnya efisiensi termal siklus PLTU sebesar 8,88 % atau rata – rata penurunan efisiensi termal siklus sebesar 1,27 % setiap 1kPa.

Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap total produksi listrik dan total penjualan listrik PLTU unit 1 Sebalang

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan *cycle tempo release* 5.0, turunnya efisiensi siklus akibat penurunan tekanan vakum kondensor dapat dikonversikan ke dalam rupiah. Turunnya tekanan vakum kondensor juga mengakibatkan turunnya total produksi listrik dan penjualan listrik PLTU unit 1 Sebalang. Sehingga dapat dibuat grafik pengaruh vakum kondensor terhadap total produksi listrik dan total penjualan listrik seperti dibawah ini.



Gambar 22. Grafik Pengaruh tekanan vakum kondensor terhadap total produksi listrik PLTU unit 1 Sebalang



Gambar 23. Grafik Pengaruh Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Total Penjualan Listrik PLTU unit 1 Sebalang

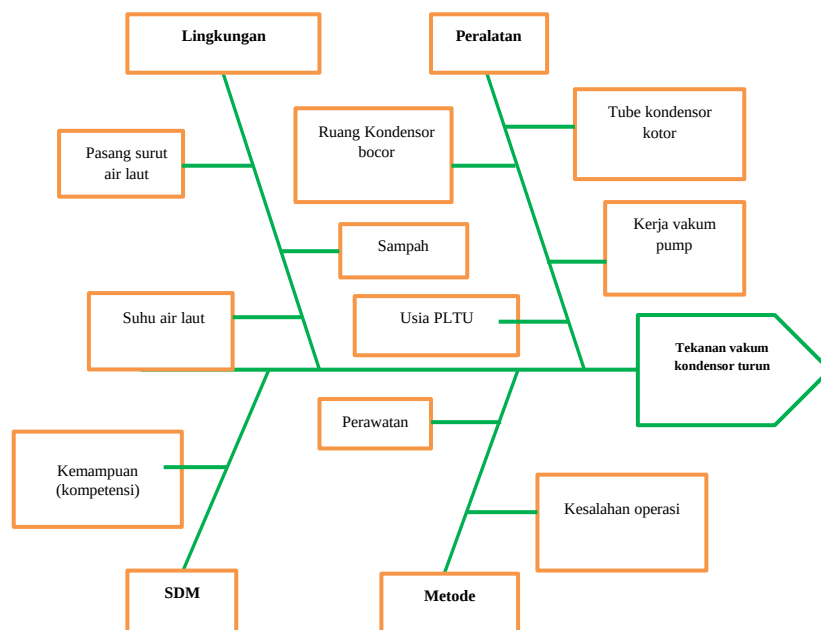
Dilihat dari gambar 22 dan 23, turunnya tekanan vakum kondensor juga berdampak pada total produksi listrik dan penjualan listrik di PLTU unit 1 Sebalang. Pada tekanan vakum -92 kPa, PLTU Unit 1 bisa menghasilkan listrik sebesar 402.853.369,71 kWh dalam satu tahun, sedangkan pada kondisi tekanan vakum -85 kPa PLTU unit 1 hanya mampu menghasilkan listrik sebesar 325.071.044,78 kWh dalam satu tahunnya. Ini berarti terjadi penurunan produksi listrik pada PLTU Unit 1 Sebalang sebesar 77.783.324,93 kWh dalam satu tahun akibat penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa atau rata-rata penurunan produksi listrik dalam satu tahun sebesar 11.111.760,7 kWh setiap 1 kPa. Total produksi listrik tersebut jika dikalikan dengan biaya pokok produksi akan menjadi total penjualan listrik dalam satu tahun. Dimana biaya pokok produksi untuk PLTU Unit Sebalang sebesar Rp. 936/kWh.

Penurunan tekanan vakum kondensor juga mengakibatkan kerugian dari penjualan listrik dimana pada kondisi tekanan vakum kondensor -92 kPa PLTU Unit 1 bisa menjual listrik sebesar

Rp. 377.070.754.048 dalam satu tahun. Akan tetapi ketika tekanan vakum kondensor turun menjadi -85 kPa, PLTU Unit 1 hanya bisa menjual listrik sebesar Rp. 304.266.497.919 dalam satu tahun. Artinya PLTU Unit 1 Sebalang mengalami kerugian penjualan listrik sebesar Rp. 72.804.256.130 dalam satu tahun akibat penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa atau rata – rata kerugian penjualan listrik sebesar Rp. 10.400.608.020 setiap penurunan 1 kPa.

4.3. Identifikasi Masalah Menggunakan Diagram Fishbone

Berdasarkan heat balance PLTU Unit 1 Sebalang hasil simulasi menggunakan aplikasi *cycle tempo release 5.0* dengan tekanan vakum kondensor yang divariasikan, mengakibatkan terjadinya perubahan nilai dari parameter di beberapa komponen dari PLTU. Telah dibuktikan bahwa semakin turun tekanan vakum kondensor mengakibatkan semakin berkurang daya yang dibangkitkan oleh turbin uap sehingga efisiensi siklus PLTU juga akan semakin kecil. Efisiensi siklus nantinya akan mempengaruhi total produksi listrik yang bisa dibangkitkan oleh PLTU tersebut. Apabila efisiensi siklus PLTU semakin kecil, maka total produksi listrik akan berkurang yang artinya PLTU mengalami kerugian seiring dengan turunnya tekanan vakum kondensor. Untuk mengetahui penyebab terjadinya penurunan tekanan vakum kondensor perlu dilakukan Analisa menggunakan diagram *fishbone* sebagai berikut :



Gambar 24. Diagram fishbone penyebab penurunan tekanan vakum kondensor

Strategi dan Solusi Penyelesaian Masalah

Setelah dilakukan analisis penyebab turunnya tekanan vakum kondensor menggunakan diagram *fishbone*, selanjutnya perlu dilakukan upaya – upaya untuk menjaga atau menaikkan kembali tekanan vakum kondensor. Sehingga rugi daya maupun material bisa diminimalisir dengan meningkatkan tekanan vakum pada kondensor. Berikut solusi untuk menyelesaikan masalah pada tekanan vakum kondensor :

Backwash Condensor

Backwash kondensor merupakan salah satu usaha untuk menjaga performa kondensor dengan cara membalik arah aliran kondensor. Fungsinya yaitu untuk membersihkan kondensor dari kotoran yang menyumbat dan mengganggu proses aliran air pendingin dengan cara membalik arah

alirannya, bahasa mudahnya untuk *flushing* kotoran - kotoran yang mengganggu aliran air laut ke kondensor khususnya yang berada di *inlet tube* kondensor. Kondensor di desain dengan dua sisi yang arah alirannya berlawanan.

Tujuan dari *backwash* kondensor ini dimaksudkan agar aliran air pendingin lebih baik, lebih lancar sehingga proses perpindahan panas antara steam dan air laut (proses kondensasi) berjalan lebih baik dan lebih cepat. Hasilnya yaitu peningkatan vakum kondensor sehingga efisiensi unit kembali bertambah. selain itu dengan adanya *backwash* kondensor ini *differential pressure inlet* dan *outlet* kondensor akan lebih rendah.

Dalam penentuan kapan proses *backwash* kondensor itu dilaksanakan sebenarnya lebih dominan dilihat dari *Differential Pressure* antara *Inlet* dan *Outlet pressure* kondensor atau *pressure drop sea water inlet* dan *outlet* kondensor. Hal ini karena tujuan kita melakukan *backwash* kondensor yaitu membuang kotoran, sampah, yang menghalangi aliran *sea water (plugging) tube* kondensor. Efek dari *plugging tube* ini akan menyebabkan aliran *sea water* terhalang dan jumlah *flow rate sea water* yang masuk ke tube-tube kondensor akan berkurang, sehingga *inlet pressure* akan tinggi dan *outlet pressure* akan rendah.

Tes kebocoran pada kondensor

Air leakage test pada kondensor bisa dilakukan dengan berbagai cara, diantaranya yaitu pengujian dengan *gas tracer* seperti dengan menggunakan gas helium atau halogen. Selain itu juga bisa dilakukan *air leakage test* secara *ultrasonic* ataupun secara *thermograph*, selain itu tes leak dengan air merupakan salah satu yang paling murah dan banyak dilakukan. Perlu diketahui juga bahwasanya pada PLTU biasanya memiliki peralatan khusus untuk tes leak pada tube baik itu kondensor maupun heat transfer equipment lainnya.

Metode maintenance ini sudah banyak digunakan pada berbagai pembangkit di Indonesia. Selain lebih praktis dan efisien, metode *checking air leakage* juga termasuk dalam metode *maintenance* yang tergolong murah dalam segi ekonomis. Saat ini banyak dikembangkan untuk menambah daya bangkitan kondensor dan menaikkan efisiensi termal dari sebuah PLTU.

Floating Intake

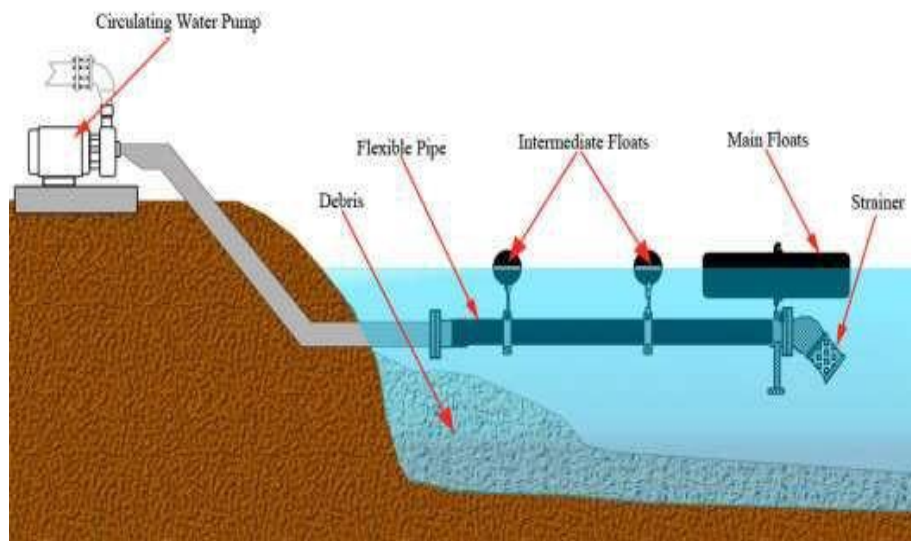
Intake adalah suatu unit yang berfungsi untuk menyadap atau mengambil air baku dari badan air sesuai dengan debit yang diperlukasn untuk pengolahan. Variasi kualitas air permukaan sangat berarti dalam menentukan titik pengambilan air. Dimana terdapat adanya variasi yang konstan (tidak befluktuasi), di tempat seperti inilah merupakan titik pengambilan yang diharapkan.

Analisa kualitas air permukaan pada setiap bagian penampang di titik yang dinilai cocok untuk pengambilan air sangat penting bagi penetapan lokasi intake, terutama intake langsung. Dan analisa kualitas pada bagian air permukaan horizontal sangat pokok untuk menetapkan titik pegambilan semua jenis *intake*.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perencanaan *intake* :

- *Intake* sebaiknya terletak di tempat dimana tidak ada aliran deras yang bisa membahayakan *intake*.
- Tanah disekitar *intake* seharusnya cukup stabil dan tidak mudah terkena erosi.
- *Inlet* sebaiknya berada di bawah permukaan badan air untuk mencegah masuknya benda-benda terapung. Disamping itu *inlet* sebaiknya terletak cukup di atas air.
- *Intake* seharusnya terletak jauh sebelum sumber kontaminasi.
- *Intake* sebaiknya dilengkapi dengan saringan kasar (*bar screen*) yang selalu dibersihkan. Ujung pengambilan air (*inlet*) yang berhubungan dengan pompa sebaiknya juga diberi saringan (*strainer*).

Air permukaan dapat diambil dari kanal sebagai *intake*, dimana pengambilan airnya ditampung dalam sebuah penampung (*chamber*). Dari penampung ini air dilairkan menuju instalasi pengolahan dengan pipa yang dilengkapi dengan *bar screen* dan *traveling screen*.



Gambar 25. Desain Floating Intake^[3]

Floating Intake merupakan jenis *intake* yang jarang ditemukan, bahkan masih belum digunakan pada berbagai perusahaan baik perusahaan pembangkit maupun perusahaan air minum. *Floating intake* ini dibuat dengan design inlet pipe yang terapung dengan bantuan floats dan *flexible pipe*. Seperti yang terlihat pada gambar 25 tersebut, *inlet* pipa dibuat terapung dengan bantuan main floats, di sepanjang *flexibel pipe* diberikan *intermediate floats* untuk membantu menopang agar tidak terjadi lengkungan pada *flexibel pipe* tersebut. Di ujung *inlet* diberikan *strainer* untuk menyaring kotoran yang terkandung dalam air yang masuk ke dalam *inlet* tersebut.

Desain *floating intake* ini dibuat untuk menyesuaikan level air yang ada pada kanal *intake*. Pada PLTU yang menggunakan air laut sebagai media pendingin (*cooling water*) untuk sistem pendinginannya akan berpengaruh besar ketika air laut mengalami musim pasang ataupun musim surut. Ketika musim surut, tidak menutup kemungkinan terjadi pendangkalan *intake* dan tidak cukup level air laut untuk menyentuh atau sama dengan level *suction inlet* pada pipa pompa sehingga mengakibatkan unit pada PLTU tersebut tidak dapat beroperasi. Dengan adanya *design floating intake* ini diharapkan masalah ketika air laut pasang maupun surut bisa teratasi, dimana dengan bantuan *floats* tersebut inlet akan selalu dalam level sama (dibawah permukaan air) dan cukup untuk melakukan proses pendinginan pada PLTU. Selain itu, dengan design ini *flow rate* yang akan masuk ke dalam instalasi pompa akan cenderung selalu konstan, tidak lagi terpengaruh pada pasang surut air laut.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi heat balance siklus PLTU unit 1 Sebalang menggunakan *cycle tempo release 5.0* dengan variasi tekanan vakum kondensor antara 0,08 bar abs – 0,15 bar abs, dapat diketahui bahwa perubahan tekanan vakum kondensor menyebabkan perubahan – perubahan nilai dari parameter pada komponen lainnya di dalam sistem pembangkit. Sehingga dapat dibuat kesimpulan sebagai berikut:

1. Turbin uap mengalami penurunan daya sebesar 16.260,03 kW akibat turunnya tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa, atau rata -rata penurunan daya turbin uap sebesar 2.315 kW setiap tekanan vakum turun 1 kPa
2. Efisiensi isentropik turbin uap turun sebesar 4,73 % yang diakibatkan oleh turunnya tekanan vakum kondensor 7 kPa, atau rata -rata efisiensi isentropik turbin uap turun sebesar 0,67 % setiap penurunan 1 kPa.
3. Penurunan tekanan vakum kondensor sebesar 7 kPa mengakibatkan ikut turunnya efisiensi termal siklus PLTU sebesar 8,88 %, atau rata – rata penurunan efisiensi termal siklus sebesar 1,27 % akibat tekanan vakum kondensor turun 1 kPa.
4. PLTU Unit 1 Sebalang mengalami kerugian penjualan tenaga listrik sebesar Rp.72.804.756.730,- dalam satu tahun akibat penurunan vakum kondensor sebesar 7 kPa atau rata-rata kerugian penjualan listrik sebesar Rp.10.400.608.020,- setiap penurunan 1 kPa.

5.2. SARAN

Beberapa saran yang bisa diberikan setelah dilakukannya penelitian tentang pengaruh penurunan tekanan vakum kondensor antara lain sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan *Backwash kondensor* yang berfungsi untuk membersihkan kondensor dari kotoran yang menyumbat dan mengganggu proses aliran air pendingin dengan cara membalik arah alirannya.
2. Perlu dilakukan tes kebocoran pada ruang kondensor. Kebocoran ini menyebabkan masuknya udara dari lingkungan yang dapat membentuk gas – gas yang tidak bisa terkondensasi. Dengan dilakukannya tes kebocoran ini diharapkan dapat mengatasi permasalahan terkait turunnya tekanan vakum kondensor.
3. Mendesain ulang *water intake* untuk *inlet* air laut dengan menggunakan desain *floating intake*. Mengingat sering terjadinya pasang surut air laut akibat kondisi alam di lokasi PLTU unit 1 Sebalang yang tidak stabil. Dengan adanya *design floating intake* ini diharapkan masalah ketika air laut pasang maupun surut bisa teratasi, dimana dengan bantuan *floats* tersebut inlet akan selalu dalam level sama (dibawah permukaan air) dan cukup untuk melakukan proses pendinginan pada PLTU.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hariyadi, Slamet & Setiyawan, Atok. *Analisa Termodinamika Pengaruh Penurunan Tekanan Vakum Pada Kondensor Terhadap Performa Siklus PLTU Menggunakan Software Gate Cycle*. Surabaya
- [2] Puspawan, Angky. *Analysis Of Steam Turbin Isentropic Efficiency Type Condensate 5U- GT 102 B In Plant Urea P-1 B, Case Study in PT. Pupuk Sriwidjaja-Persero Palembang By Using Computer Aided Thermodynamics Table 3 (CATT3)*. Jurnal Ilmiah Teknik Mesin. Volume 1 (2). Oktober 2017
- [3] Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya. *Analisa dan Pemeliharaan pada Kondensor PLTU PT. PJB Services Unit Pembangkitan PLTU Nii Tanasa Kendari*. Laporan Kerja Praktik. Surabaya
- [4] Pasriyanto, Blegoh Purwo. *Pengaruh Perubahan Tekanan Vakum Kondensor Terhadap Efisiensi Siklus PLTU*. Skripsi tidak diterbitkan. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknik – PLN. 2016

- [5] Ridho, Muhammad. *Pengaruh Operasi Feed Water Heater Terhadap Efisiensi Termal PLTU Sebalang*. Skripsi tidak diterbitkan. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknik – PLN. 2017
- [6] Udiklat Suralaya. *Pengoperasian PLTU*. PT. PLN (Persero). 2014
- [7] Rochani, Habib, *Modul Teknik Tenaga Uap*. Jakarta: Sekolah Tinggi Teknik – PLN. 2013
- [8] Cahyadi, Dwi. *Analisa Perhitungan Efisiensi Turbine Generator QFSN-300-2-20B Unit 10 Dan 20 Pt. PJB UBJOM PLTU Rembang*. Semarang. Juni 2015
- [9] *Cycle Tempo Release 5.0* (Build 480)