
STUDI DESAIN KONSEPTUAL SISTEM *BALANCE OF PLANT* (BOP) PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP (PLTU) SKALA KECIL

Hariyotejo Pujowidodo

Balai Termodinamika Motor dan Propulsi (BTMP)
Puspipstek Serpong Tangerang Selatan Banten 15314
e-mail : h_pujowidodo@yahoo.co.id

Abstraksi

Studi ini merupakan kegiatan untuk mendukung pelaksanaan program Pengembangan Pembangkit Listrik Skala Kecil kapasitas 2x7 MegaWatt (MW), sebagai tahap awal studi pendahuluan untuk mengumpulkan data dan informasi perancangan system *Balance of Plant* (BOP). Studi berisi tentang kajian filosofi desain dan penetapan model acuan yang akan digunakan dalam perancangan (desain) yang dilaksanakan berdasarkan eksplorasi data dan tinjauan pada beberapa standar referensi *Heat Exchanger Institute* (HEI), *TEMA* (*Tubular Exchanger Manufacturer*) dan *ASME* (*American Society Mechanical Engineer*) section VIII untuk komponen *condenser*, *feedwater heater* dan *deaerator* yang terdapat dalam system BOP. Hasil studi yang diperoleh adalah berupa hasil analisa berupa sebuah desain konseptual sistem BOP untuk PLTU 2x7 MW yang meliputi data dan informasi parameter persyaratan, kerangka utama filosofi desain dan penetapan model/acuan yang akan digunakan.

Kata-kata kunci : BOP, PLTU, filosofi desain, model/acuan
Keywords : BOP, Steam Power Plant, Design Philosophy, Reference

1. LATAR BELAKANG

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (*Steam Power Plant*) adalah satu system penghasil tenaga listrik yang menggunakan energi uap sebagai sumbernya dan siklus uap Rankine (*Rankine Cycle*) yang mengubah proses konversi energi system. Untuk kebutuhan pembangkit listrik 7 Megawatt, terdapat sistem BOP (*Balance of Plant*) sebagai sistem optimasi termal memanfaatkan energi uap/ekstraksi untuk memanaskan dan memurnikan air umpan boiler.

Untuk melaksanakan kegiatan perancangan, perlu dilakukan studi perancangan konseptual untuk mengumpulkan kriteria persyaratan proses dan peralatan sistem BOP, melalui kegiatan survei lapangan dan penelusuran standard desain komponen BOP seperti kondenser, heater dan deaerator yang akan diuraikan dalam penjelasan berikut ini.

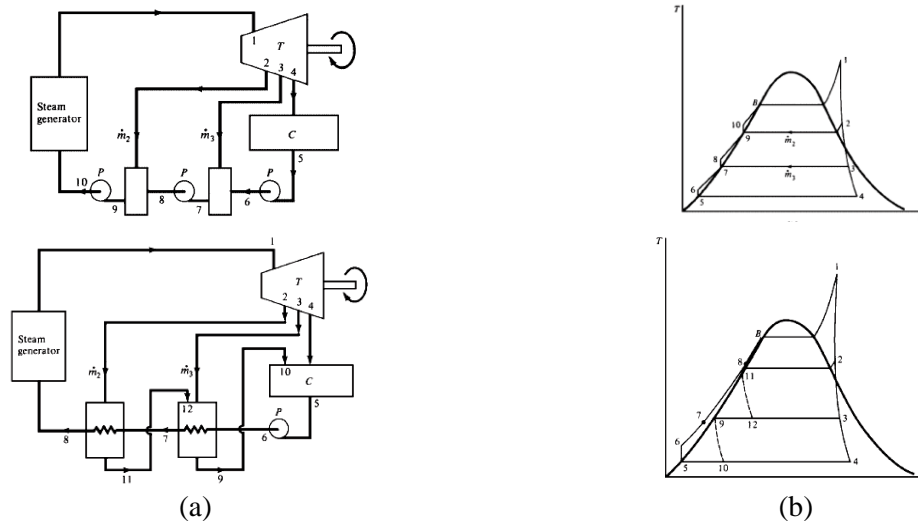
2. FILOSOFI DESAIN DAN TINJAUAN STANDARD

2.1. Filosofi Desain

Adalah sebuah kegiatan tentang studi beberapa hal terkait dengan asumsi-asumsi, landasan utama dan segala implikasi yang berkaitan dengan sebuah perancangan (*design*). Sistem BOP merupakan sebuah sistem yang bertujuan untuk meningkatkan utilisasi energi termal/mengurangi irreversibilitas siklus tenaga uap, melalui pemanfaatan energi panas uap yang keluar/ekstraksi dari komponen turbin setelah energi termal dikonversikan menjadi energi mekanik putaran poros. Penentuan filosofi perancangan sistem BOP dilakukan kepada aspek perancangan termal (*Thermal Design*) melalui kegiatan pengkajian siklus Rankine tertutup regenerative, fungsi dan deskripsi komponen BOP (Kondenser, Pemanas Air Umpan dan Deaerator).

2.1.1. Siklus Rankine Tertutup Regenerative

Agar efisiensi siklus meningkat, maka air umpan boiler yang telah dipompakan perlu untuk diproses hingga mendekati tingkat keadaan jenuh pada kondisi pemanasan uap. Hal ini dilakukan dengan cara pemanasan air umpan (*Feedwater Heating*) yang menggunakan sebagian ekstraksi uap keluar turbin. Proses pemanasan air umpan menggunakan 2 macam pemanasan yaitu pemanasan terbuka (*Open Feedwater Heater*) dan pemanasan tertutup (*Close Feedwater Heater*). Dalam pemanasan air umpan secara terbuka, air kondensat bercampur secara langsung dengan uap ekstraksi turbin pada tekanan yang sama saat kondisi saturasi, sedangkan pemanasan tertutup kontak terjadi pada tekanan berbeda melalui suatu bidang pemisah.



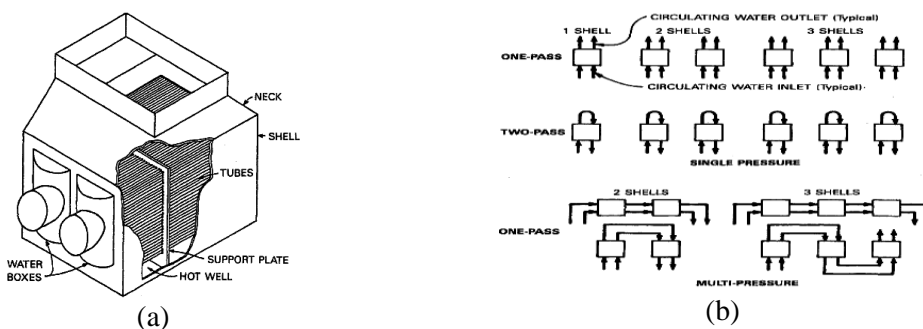
Gambar 1. Pemanas Air Umpan Sistem Terbuka (atas) dan Tertutup (bawah)
(a) Skema aliran (b) Non ideal Superheated dengan 2 pemanas air umpan

2.1.2. Kondenser

Merupakan bagian komponen system yang berfungsi untuk mengkondensasikan uap keluar turbin, mengumpulkan kondensat dan mengurangi tekanan turbin keluar, melalui air pendingin atau udara atmosfer secara langsung. Kondenser yang menggunakan air pendingin adalah normal, kecuali dalam beberapa lokasi di mana air sangat mahal, maka pendingin udara dapat digunakan.

2.1.2.1. Susunan Kondenser

Banyak kondenser yang terpasang di dalam plant langsung di bawah turbin sehingga uap mengalir ke bawah melalui leher kondenser ke dalam kondenser. Susunan fisik lainnya dapat melokasikan kondenser di sisi samping atau ujung dari turbin.



Gambar 2. Tipikal Kondenser (a) dan alternative susunan air sirkulasi (b)

2.1.2.2. Kondenser Pendingin Udara (Air-Cooled Condensers)

Kondenser ini dapat mengurangi masalah air penambah (make-up water) , polusi air sirkulasi, plume pada menara ataupun pembekuan menara pendingin. Sementara kekurangan yang dapat ditimbulkan yaitu tekanan operasi yang lebih tinggi, tempat yang lebih besar, kebisingan yang tinggi dan biaya operasi yang lebih besar. Terdapat 2 macam kondenser pendingin udara yaitu kondenser jet dengan menara pendingin kering, sebagian kondensat digunakan untuk mengkondensasikan uap buang turbin dan kondenser pendingin udara langsung. Pendingin udara langsung memiliki kemudahan tidak membutuhkan saluran (ducting) buang uap yang besar dan pompa air sirkulasi dan memberikan kondisi operasi vakum yang lebih baik dan hanya memiliki satu pendekatan (*approach*) udara ke uap.



Gambar 3. Jenis Kondenser Pendingin udara

2.1.3. Pemanas Air Umpan (*Feedwater Heater*)

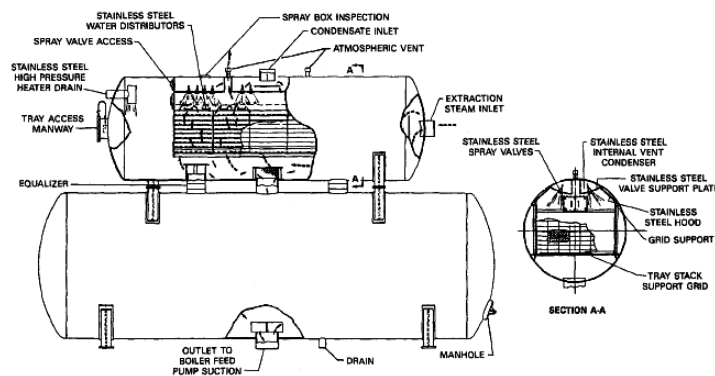
Di dalam siklus regenerative, uap diekstrasikan dari turbin beberapa tingkat untuk memanaskan air umpan, sehingga mengurangi kehilangan energy panas di condenser dan meningkatkan efisiensi sistem.

2.1.3.1. Konstruksi Pemanas

Dalam analisis siklus terhadap perlunya pemanas air umpan, beberapa pertimbangan harus dikaji tentang tipe pemanas yang akan digunakan, parameter desain, dan metode pembuangan uap terkondensasi dari pemanas. Ada 2 jenis pemanas air umpan yaitu tipe terbuka (kontak langsung) dan tertutup (kontak dengan separasi). Untuk tipe terbuka (*Open FWH*), uap ekstraksi bercampur dengan air umpan untuk dipanaskan. Uap terkondensasi di dalam *chamber* dan keluar bersama air umpan panas dari pemanas. Tipe ini juga didesain untuk men-deaerasi (sebagai *De-aerator*) kondensat yang datang, membebaskan gas-gas terlarut dan non-kondensasi yang memiliki kandungan utama oksigen, nitrogen, ammonia dan karbondioksida dari kondensat, yang berasal dari adanya kebocoran dan reaksi kimia. Kelemahan tipe ini adalah ukurannya besar dan berat, serta memerlukan pompa untuk mengalirkan air umpan keluar pemanas menuju proses berikutnya di dalam siklus plant.

2.1.3.1. A. Konstruksi Pemanas terbuka

Terdiri atas 3 bagian yaitu bagian pemanas (*heater*), *condenser vent*, dan penyimpanan (*storage*). Proses deaerasi mengikuti gabungan ketetapan hukum Dalton dan Henry tentang kuantitas sebuah gas terlarut di dalam sebuah cairan akan berkurang ketika temperature cairan bertambah, dan jika cairan dipanaskan hingga titik didih seluruh gas terlarut akan terlepas.



Gambar 4. Tipikal Deaerator Tipe Tray (*Open FWH*)

Kemampuan deaerasi unit diukur dari banyaknya oksigen terlarut di dalam kondensat yang keluar dari FWH. Kapasitas unit ditentukan oleh kuantitas air umpan yang dikeluarkan oleh bagian penyimpanan. Banyak unit yang beroperasi pada tekanan positif terhadap tekanan atmosferik dan berada di atas tekanan ekstraksi uap.

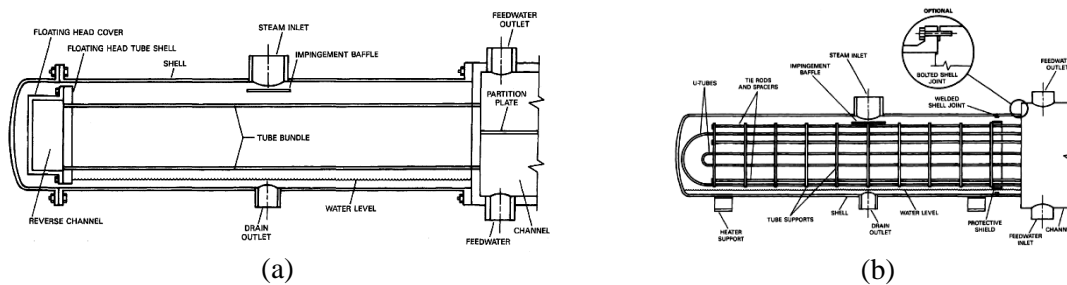
Dearator juga berfungsi untuk memproses fluida buang dari pemanas tekanan tinggi, uap ekstraksi untuk pemanas udara pembangkit uap, trap tekanan tinggi, sehingga terdapat katup pengaman untuk menjaga agar tekanan tidak melampaui batas tekanan cangkang. Untuk

melindungi kehilangan suplai uap, terpasang pula perangkat *vacuum breaker* yang berfungsi mencegah terjadinya tekanan subatmosferik.

2.1.3.1. B. Konstruksi Pemanas Tertutup

Merupakan bentuk penukar kalor cangkang dan tube, dengan kondensat atau air umpan yang mengalir di dalam tube dan uap ekstraksi di sisi cangkang. Konstruksi terdiri atas pelat pemisah pembagi aliran masuk dan keluar (*partition plate*), *reverse channel*, *floating head cover* dan *floating head tube shell*, yang berguna memudahkan pada saat membersihkan deposit (*scale*) di dalam tabung. Di samping itu juga terdapat desain *floating head* yang menggunakan konstruksi tabung-U.

Uap ekstraksi yang masuk berada pada kondisi panas lanjut (*superheated*), dan ketika kontak dengan permukaan luar tabung akan terkondensasi pada temperature saturasi. Sebuah desain ekonomis, unit dirancang untuk beda temperature antara temperature keluar feedwater dan temperature saturasi tersebut sebesar 5 °F (2,8 °F).



Gambar 5. Pemanas air umpan tabung lurus dengan floating reverse channel (a) dan U pengkondensasi (b)

Pemanas air umpan sebaiknya dikonstruksikan menurut standar *Boiler and Pressure Vessel Code*, Code for Unfired Pressure Vessels, Section VIII dan HEI (Heat Exchanger Institute) *Standards for Closed Feedwater Heaters*



Gambar 6. Pemanas Air Umpan Vertikal Posisi Kanal: (a) di bawah, (b) di atas

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Filosofi Desain

(i) Siklus Rankine tertutup regenerative

Dalam siklus rankine tertutup, maka kondensasi uap terjadi di dalam komponen *condenser*. Komponen tersebut berguna untuk mengubah kembali fluida uap keluar turbin menjadi air untuk umpan (fluida kerja) boiler. Untuk meningkatkan efisiensi system, air umpan sebaiknya diproses terlebih dahulu melalui pemompaan dan pemanasan hingga mendekati kondisi saturasi penguapan di pembangkit uap. Komponen yang berfungsi memanaskan air umpan disebut dengan *feedwater heater* beserta pompa air umpan yang menggunakan uap ekstraksi turbin sebagai fluida pemanas.

Sebelum air umpan tersebut diproses di pembangkit uap, perlu diproses terhadap standar air baku boiler terhadap kemurnian (kandungan impurities) agar tidak menyebabkan terjadinya korosi maupun deposit di boiler, melalui komponen *deaerator*. Deaerator berfungsi untuk melepaskan fluida gas non kondensasi (*NonCondensable Gas*) agar tidak mengandung gas korosif yang dapat merusak tabung pembangkit uap, menggunakan fluida uap ekstraksi dari turbin untuk memanaskan kondensat/air umpan.

Dalam menganalisa siklus tenaga uap, diperlukan analisa system termodinamika untuk mengkaji proses perpindahan energy panas (entalpi) dan massa fluida dengan mengacu pada sebuah ketetapan/hukum kesetimbangan panas dan massa (*mass and heat balance*). Terutama dalam perencanaan desain BOP, sangat diperlukan hasil studi awal terkait dengan analisa heat and mass balance dari system di dalam siklus berdasarkan analisa studi desain proses. Untuk analisa perhitungan termal system BOP, maka kesetimbangan massa dan energy dari turbin merupakan acuan awal di dalam analisa perancangan system komponen BOP guna menentukan perancangan model penukar kalor dari komponen condenser, FWH dan Deaerator sesuai dengan kebutuhan/kondisi batas desain yang direncanakan termasuk kebutuhan operasi maupun kondisi batas lapangan/tempat.

(ii) **Kondenser**

Secara umum condenser yang banyak digunakan untuk PLTU adalah tipe penukar kalor cangkang berbentuk pelat kotak dan tabung model permukaan uap (*steam surface shell & tube heat exchanger*). Langkah awal dalam mempersiapkan perancangan komponen condenser adalah menentukan besarnya panas uap yang akan dilepaskan melalui media pendingin yang tersedia. Media pendingin yang umum digunakan adalah menggunakan fluida air yang sumbernya bisa berasal dari air permukaan atau fluida udara yang berasal dari lingkungan atmosfer. Penentuan tipe media pendingin biasanya dipengaruhi oleh jumlah ketersediaan air pendingin. Namun fluida air memiliki properties fisik terhadap kemampuan memindahkan panas lebih baik dibandingkan dengan fluida udara.

Susunan condenser untuk turbin ukuran besar dengan fluida buang uap yang besar dapat dikonfigurasi secara serial atau parallel beberapa condenser dengan jumlah laluan fluida pendingin dapat 1 atau 2 laluan (*pass*). Namun dikarenakan proses kondensasi harus terjadi secara mudah, umumnya tekanan di dalam condenser berada pada kondisi vakum, sehingga jarak dan kerapatan system sambungan pada saluran fluida buang uap harus dapat menjaga kondisi tersebut.

(iii) **Pemanas Air Umpan**

Air umpan untuk boiler berasal dari air kondensat proses yang dihasilkan dari condenser, perlu dinaikkan temperaturnya hingga mendekati kondisi saturasi penguapan. Metodenya adalah dengan memanfaatkan fluida pemanas dari uap turbin melalui cara ekstraksi uap. Biasanya fungsi pemanas air umpan ini juga untuk melepaskan campuran gas tidak terkondensasi terpisah dari larutan air agar tidak bersifat korosif.

Ada 2 jenis model pemanas air umpan yaitu tipe terbuka (*Open FWH*) dan tipe tertutup (*Close FWH*). Perbedaannya adalah kontak antara fluida uap dengan media pendingin (kondensat) terjadi secara langsung atau tidak langsung melalui perantara dinding pemisah.

Berdasarkan proses pemanasan fluida kondensat oleh fluida uap ekstraksi, terdapat pembagian daerah zone proses di dalam komponen FWH yaitu 2 zone berupa *desuperheating dan kondensasi*, 2 zone *kondensasi dan subcooling* serta 3 zone berupa gabungan *desuperheating, kondensasi dan subcooling*.

Tata letak FWH terbagi 2 macam secara vertical dan horizontal. Masing-masing terdiri atas aliran uap yang mengalir melalui cangkang dan aliran kondensat yang melalui pipa tabung. Untuk tipe vertical kanal utama aliran kondensat masuk dan keluar bias berada di sisi atas atau sisi bawah. Namun untuk tipe vertical terjadi sebagian permukaan pipa tabung yang berada di bawah level ketinggian air kondensasi. Konstruksi untuk FWH yang beroperasi pada tekanan tinggi seluruh bagian konstruksi disambung melalui proses pengelasan untuk mencegah terjadinya resiko kebocoran/kegagalan.

3.2. Alternatif Metode/Model Acuan

Standar/Code yang menjadi acuan di dalam perancangan system BOP terdiri atas 3 macam yaitu :

a. HEI (*Heat Exchanger Institute*) untuk *Steam Surface Condenser dan Closed Feedwater Heaters*

- b. TEMA (*Tubular Exchanger Manufacture Association*).
- c. *Boiler and Pressure Vessel Code*, Code for Unfired Pressure Vessels, Section VIII

4. KESIMPULAN

Sebagai penutup, berikut disampaikan beberapa hal catatan utama yaitu :

- 1) Sistem BOP yang perlu disiapkan dalam perancangan system PLTU terdiri dari 3 komponen yaitu *condenser*, *feedwater heater* dan *deaerator*.
- 2) Kondenser menggunakan fluida pendingin air yang bersumber dari air permukaan melalui proses pemurnian kandungan air (*water treatment plant*), yang memiliki sifat memindahkan panas lebih baik dibandingkan jenis fluida pendingin yang lain.
- 3) Kondenser merupakan penukar kalor model cangkang dan tube dengan jenis kontak permukaan uap (*steam surface condenser*) dengan material konstruksi yang terbuat dari baja karbon (*Carbon Steel*).
- 4) Pemanas air umpan (*Feedwater Heater*) yang umum digunakan bagi PLTU skala kecil merupakan tipe kontak langsung (*open FWH*) dengan aliran berlawanan (*counterflow*) steam yang bertukar panas melalui fluida air yang mengalir melalui system tray (*Tray Deaerator*). Banyaknya jumlah pemanas bergantung kepada ukuran atau kapasitas turbin yang dipakai.
- 5) Standar acuan yang digunakan dalam perancangan BOP terdiri dari 3 macam yang berasal dari HEI (*Heat Exchanger Institute*), TEMA (*Tubular Exchanger Manufacturer*) dan ASME (*American Society Mechanical Engineer*) section VIII

UCAPAN TERIMA KASIH

Kepala Program *Pengembangan PLTU Skala Kecil* Pusat Teknologi Industri Manufaktur (PTIM) BPP Teknologi Jakarta.

DAFTAR ACUAN

- Black & Veatch, *Power Plant Engineering*, Springer, USA, 1996
Kiameh P., *Power Generation Handbook*, McGraw-Hill, 2008
Raja A.K., *Power Plant Engineering*, New Age International, New Delhi, 2006.
WP-2400, *Technical Report Pendampingan Desain BOP*, PP PLTU PTIM, BPPT, 2011.