

PERHITUNGAN DESAIN TERMAL KONDENSOR PADA SISTEM PENDINGIN PWR

SUKMANTO DIBYO

*Bidang Fisika dan Teknologi Reaktor – PTRKN Batan
sukdibyo@batan.go.id*

Abstrak

PERHITUNGAN DESAIN TERMAL KONDENSOR PADA SISTEM PENDINGIN PWR. Alat kondensor merupakan komponen sistem pendingin yang sangat penting. Dalam sistem pembangkit energi, aliran uap air yang keluar turbin melepaskan kalor pada kondensor. Uap ini dikondensasikan menjadi fasa cair (air) untuk dipompakan kembali ke pembangkit uap. Dalam rangka estimasi desain dan penguasaan konsep desain kondensor pada PWR (pressurized Water Reactor), maka makalah ini bertujuan menghitung desain termal dengan menggunakan data parameter operasi laju aliran dan data termal yang dibebankan pada kondensor. Parameter operasi sistem kondensor-permukaan (surface condenser) dari data referensi, digunakan sebagai data perhitungan. Prinsip perhitungan desain ini adalah terpenuhinya kinerja kondensor secara termal pada kondisi normal. koefisien transfer kalor, dihitung untuk menentukan dimensi parameter desain kondensor. Perhitungan ini menggunakan model kondensasi film (film-wise) pada permukaan tube dan tidak melibatkan kondisi sub-cooling. Disamping itu juga digunakan beberapa data asumsi untuk kondisi once-through dan cooling tower system yang mengalirkan air untuk sirkulasi pendingin. Dari hasil perhitungan desain termal ini diperoleh data informasi tentang spesifikasi parameter desain kondensor yaitu, koefisien transfer kalor, laju aliran pendingin, luasan transfer kontak jumlah dan dimensi tube. Pada sistem once-through pendingin tersier yang telah di desain yang menggunakan air laut sebagai media pendingin untuk pembuangan kalor, laju aliran pendinginnya adalah 156.261 m³/jam sedangkan pada cooling tower system 180.700 m³/jam. Begitu juga jumlah tube untuk once-through system adalah 64.073 batang dan cooling tower system 73.032 batang. Dalam penentuan parameter temperatur desain kondensor sistem cooling-tower, harus mempertimbangkan kinerja cooling-tower dan perubahan temperatur udara.

Kata kunci : desain termal, kondensor

Abstract

THERMAL DESIGN CALCULATION OF CONDENSER IN THE PWR COOLING LOOP. Condenser equipment is one of cooling system component that very important. In the power plant, the steam flows from the turbine exhaust released heat into the condenser. The steam is condensed to become liquid phase (water) then flows to the steam generator. In order to govern the PWR (pressurized Water Reactor) condenser design estimation and design concept, accordingly this paper purposes to calculate thermal design using parameter of flow rate and thermal data that loaded in the condenser. Surface condenser system operation parameters taken from references are applied as object of data calculation. Principle of design calculation is met the condenser performance thermally in the normal condition. Heat transfer coefficient calculated to determine the dimension of condenser design parameters. This calculation uses film-wise model at tube surface and sub-cooling condition is not included. In addition, assumptions for the calculation of once-through and cooling tower system are used. Based on the thermal design calculation, information of condenser design parameter specification could be obtained. It's including heat transfer coefficient, coolant flow rate, contact transfer area, dimension and number of tube. In the once-through tertiary coolant system that designed using sea water as cooling system therefore flow rate is 156.261m³/hr meanwhile for cooling tower system is 180.700m³/hr. And also number of tube for once-through system is 64.073 tubes and cooling tower system is 73.032 tubes. In the determining of temperature design of cooling-tower system condenser, the performance of cooling tower and weather temperature change should be considered.

Keywords : thermal design, condenser

PENDAHULUAN

PWR (*Pressurized Water Reactor*) merupakan reaktor daya nuklir yang berpendingin air ringan dan banyak beroperasi di dunia. Sistem pendingin pada PWR ini terdiri dari tiga untai aliran pendingin yaitu untai primer, untai sekunder dan tersier. Pada untai primer, energi kalor dari reaktor dialirkan ke pembangkit uap kemudian oleh untai sekunder uap air dari pembangkit uap (*steam generator*) digunakan untuk menggerakkan turbin. Uap keluaran dari turbin dikondensasikan oleh alat kondensor menjadi air kondensat. Kondensor menggunakan air pendingin yang dialirkan pada untai tersier.

Kondensor pada PWR merupakan komponen pendingin yang sangat penting yang berfungsi untuk memaksimalkan efisiensi pada turbin uap, oleh karena itu tekanan dan temperatur pada keluaran uap air diusahakan serendah mungkin sehingga diperoleh beda tekanan optimum pada turbin. Untuk itu, uap air yang keluar dari turbin yang telah bertekanan rendah perlu dilewatkan kondensor yang akan dikondensasikan menjadi air kondensat. Pada kondensor ini, terjadi pelepasan kalor secara kondensasi dan kalor sensibel. Pada instalasi PWR umumnya menggunakan kondensor tipe permukaan (*surface condenser*), tipe kondensor ini merupakan jenis *shell-tube* yang mana air pendingin disirkulasikan melalui *tube*. Uap keluar (*exhaust steam*) dari turbin masuk ke sisi-*shell* kondensor yang bertekanan rendah dikondensasikan dan dikonversikan menjadi air kondensat pada bagian luar permukaan *tube*. Kondensor biasanya menggunakan sirkulasi air pendingin dari menara pendingin (*cooling tower*) untuk melepaskan kalor ke atmosfer, atau *once-through water* dari sungai, danau atau laut [1].

Dasar perhitungan desain termal kondensor adalah terpenuhinya kinerja secara termal pada kondisi normal. Berbagai asumsi dapat diambil untuk penyelesaian dengan menentukan kondensor sebagai volume kontrol tunggal (*single control volume*) dan rerata koefisien transfer kalor dua sisi-masuk dan keluar. Koefisien transfer kalor didasarkan pada konstituen koefisien sisi-*shell* (kondensasi) dan sisi-*tube* (pendingin). Spesifikasi parameter desain kondensor termasuk luasan transfer

kalor, koefisien transfer kalor, parameter operasi dan dimensi-dimensi *tube* [2]. Desain termal (*thermal rating*) merupakan salah satu bagian kegiatan desain dari keseluruhan yang mencakup analisis vibrasi, analisis korosi, desain mekanik, gambar teknik (*engineering drawing*) dan fabrikasi.

Pemahaman tentang teori perhitungan desain termal kondensor PWR pada tulisan ini merupakan upaya penguasaan sumber daya manusia dibidang nuklir melakukan desain bagian sistem komponen PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir). Tujuan makalah ini adalah melakukan perhitungan desain termal kondensor PWR menggunakan referensi data operasional kondensor reaktor SONGS-Unit-3 PWR-1100 MWe USA. Dari perhitungan ini dapat diperoleh informasi data tentang spesifikasi parameter desain kondensor PWR. Diharapkan pula bahwa hal ini nantinya merupakan langkah penelusuran aspek desain yang lebih luas untuk dikembangkan lebih lanjut metoda desain yang akurat dan lebih detail termasuk masalah perhitungan di luar desain termal yang sebetulnya sangat kompleks.

TEORI

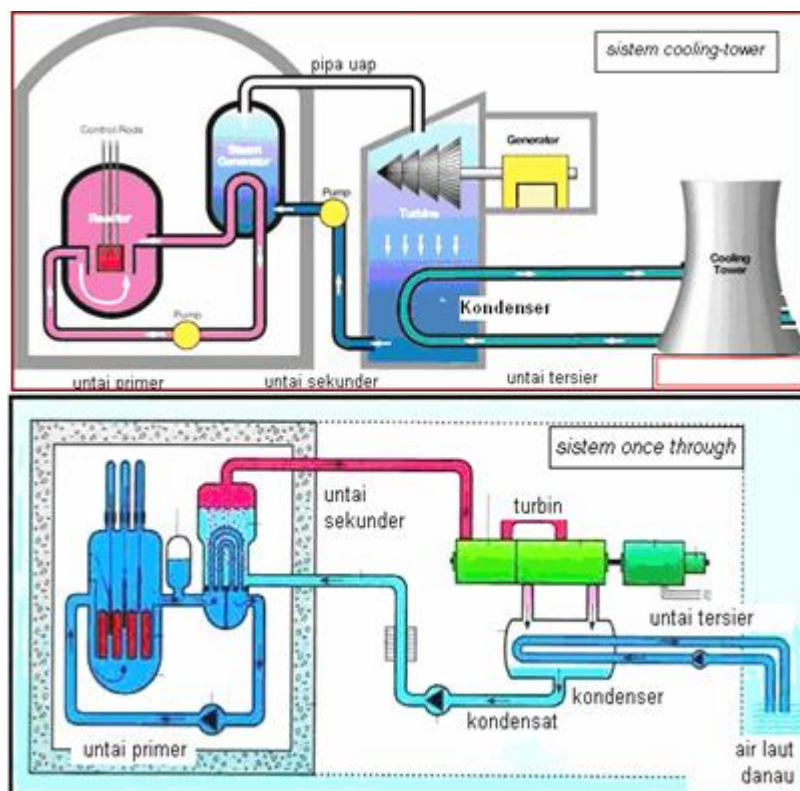
Kondensor Pada PWR

PWR memiliki tiga untai (*loop*) pendingin untuk melakukan transfer kalor. Pada untai pendingin primer, aliran air fasa cair yang bertekanan sekitar 155 bar pada temperatur sekitar 315°C dan bersifat radioaktif ini dipompakan dari reaktor menuju pembangkit uap dan selanjutnya dikembalikan ke reaktor. Di dalam pembangkit uap, air panas melalui sisi-*tube* untuk menguapkan aliran pendingin pada untai sekunder. Uap air pada untai pendingin sekunder dari pembangkit uap ini pada temperatur sekitar 275°C (530°F) atau tekanan 6.2 MPa (900 psia), digunakan untuk memutar turbin sebagai penggerak generator listrik. Uap air pada untai pendingin sekunder ini kehilangan energinya yang selanjutnya dikondensasikan dan didinginkan oleh kondensor untuk dikembalikan sebagai umpan air ke pembangkit uap. Kondensor ini terletak di bawah turbin, Pendinginan pada kondensor ini menggunakan untai tersier yang secara sirkulasi mengalirkan air dari menara pendingin atau sistem *once-through* dari sumber air

pendingin eksternal. Gambar 1 berikut menunjukkan diagram sederhana untai aliran pendingin pada instalasi PWR [3].

Secara umum, terdapat berbagai macam kondensator sesuai untuk aplikasi *steam power plant*, *chemical-processing plant* dan *nuclear power plant*. Pada prinsipnya terdapat 2 kelompok tipe kondensator yaitu tipe *spray* dan tipe *surface*. Tipe *Spray* menggunakan kontak langsung air pendingin dengan uap. Air pendingin disebarkan di dalam kondensator dalam bentuk semprotan air. Tipe ini biasanya menggunakan *dry cooling towers*. Sebagian

kondensat dari kondensator disirkulasikan melalui *dry cooling tower* dan dikembalikan ke kondensator. Kondensator permukaan pada dasarnya merupakan tipe *shell-tube heat exchanger* yang terdiri dari *water boxes* untuk mengalirkan air pendingin ke dan dari *horizontal tubes*. *Tube* dirangkai pada *tube sheets* dan didukung oleh *tube support plates*. Jumlah *tube* cukup banyak untuk transfer kalor yang besar. *Water boxes* dilengkapi dengan kanal pemisah sehingga dapat mengalirkan air pendingin pada sisi-masuk dan keluar [4].



Gambar 1. Diagram Untai Aliran Pendingin Pada PWR [3]

Secara umum, terdapat berbagai macam kondensator sesuai untuk aplikasi *steam power plant*, *chemical-processing plant* dan *nuclear power plant*. Pada prinsipnya terdapat 2 kelompok tipe kondensator yaitu tipe *spray* dan tipe *surface*. Tipe *Spray* menggunakan kontak langsung air pendingin dengan uap. Air pendingin disebarkan di dalam kondensator dalam bentuk semprotan air. Tipe ini biasanya menggunakan *dry cooling towers*. Sebagian kondensat dari kondensator disirkulasikan melalui *dry cooling tower* dan dikembalikan ke kondensator. Kondensator permukaan pada dasarnya merupakan tipe *shell-tube heat*

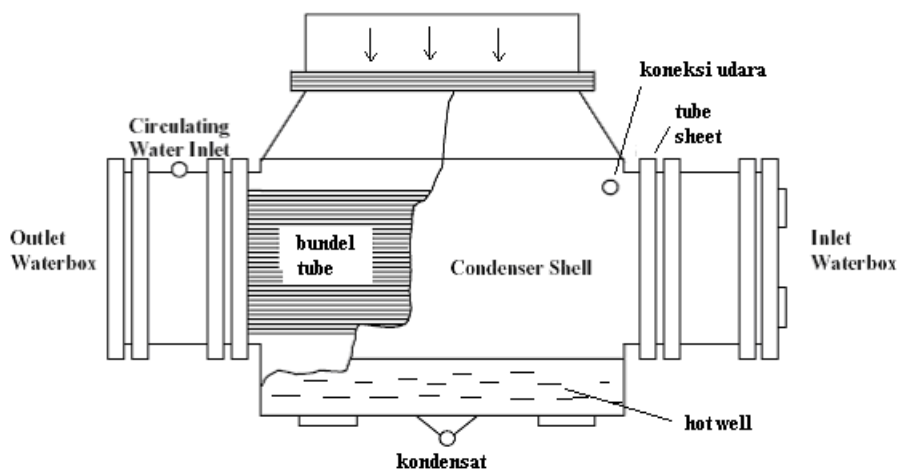
exchanger yang terdiri dari *water boxes* untuk mengalirkan air pendingin ke dan dari *horizontal tubes*. *Tube* dirangkai pada *tube sheets* dan didukung oleh *tube support plates*. Jumlah *tube* cukup banyak untuk transfer kalor yang besar. *Water boxes* dilengkapi dengan kanal pemisah sehingga dapat mengalirkan air pendingin pada sisi-masuk dan keluar [4].

Pada kondensator tipe *surface horizontal*, terdapat berbagai tipe aliran di sisi-*shell* diantaranya tipe E, G, H, J dan X. Kondensator tipe-X paling banyak digunakan untuk operasi vakum dan volume uap yang cukup besar untuk *power-plant*. Area aliran yang luas dan rugi

tekanan yang rendah, sangat penting dalam sistem operasi vakum (untuk menghindari penurunan temperatur saturasi). Pada tipe-X juga dilengkapi dengan *tube support* untuk melindungi vibrasi dan distribusi uap yang baik.

Kondensor horisontal pada umumnya yang merupakan jenis kondensor permukaan yang paling mudah estimasi desainnya dan memiliki kemampuan beban yang besar dan temperatur kondensasi yang rendah untuk menghasilkan efisiensi yang tinggi. Temperatur kondensasinya di atas temperatur air pendinginnya atau sekitar tekanan saturasi

0,048 bar-absolut, oleh karena itu hanya terjadi rugi tekanan yang kecil. Kondensor tipe horisontal ini memiliki luas permukaan yang lebih besar dan rugi tekanan yang rendah. Sistem ventilasi yang baik dan rugi tekanan yang rendah merupakan faktor penting pada desain kondensor ini. Bejana sisi-shell dapat berbentuk *box* atau silinder yang dapat dilengkapi dengan sistem *sub-cooler*. Kondisi *sub-cooling* pada kondensat ini diperlukan untuk mendapatkan operasi pompa yang aman terhindar dari kavitasi [5].



Gambar 2. Surface Condenser horizontal [5]

Kondensor Uap (*steam condenser*) pada PWR merupakan alat pemindah-kalor yang memiliki ribuan *tube* yang mana air pendingin mengalir dari untai tersier. Uap terkondensasi ketika melalui bundel *tube* dan kontak dengan permukaan *tube* tersebut. Kondensor terdiri dari bagian bejana *shell* yang merupakan sisi-luar dan rangkaian *tube* pada bagian dalam sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2. Untuk kondensor besar dapat digunakan *tube* BWG 18 dengan ketebalan 1,22 mm. Material *Shell* biasanya terbuat dari *plate carbon steel*. Selain itu, hal yang juga sangat penting adalah penggunaan konstruksi/ bahan material pada *tube*, *water box* sisi-shell dan komponen yang berinteraksi dengan uap air [5].

Faktor dan karakteristik yang penting adalah :

1. Proses kondensasi
2. Kondisi pendingin
3. Tekanan kondensasi
4. Sifat Korosi pendingin

5. Rentang temperatur
6. Ekspansi material dan aspek keselamatan.
7. Pengendalian kondensat

Fungsi utama dari kondensor uap pada PWR adalah untuk merubah uap dari keluaran turbin dialirkan melalui bundel *tube* untuk dikondensasikan menjadi fasa cair (air). Temperatur kondensat menentukan tekanan di dalam sisi-shell kondensor. Tekanan yang selalu dijaga lebih rendah dari atmosfer (vakum) ini disebut sebagai *turbine backpressure*. Penurunan temperatur kondensat akan menghasilkan *turbine backpressure* yang rendah, sehingga penurunan ini dapat menaikkan efisiensi turbin [6].

Kondensor juga mempunyai fungsi lain yaitu menampung kondensat pada *hot-well* pada bagian bawah kondensor sebagai sisi- hisap pompa untai sekunder disamping juga menampung gas yang tidak terkondensasi (*non-condensable gas*).

Dalam operasi kondensor, terdapat gas atau udara terlarut dari atmosfer ke dalam sistem siklus uap (*steam-cycle equipment*) maupun dari zat kimia yang terdapat pada *chemicals feedwater treatment*. Udara tidak terkondensasi ini berada dibalik *header tube* ketika terjadi kondensasi uap. Udara ini akan terakumulasi apabila tidak dikeluarkan dari sistem kondensor. Oleh karena itu fitur yang juga penting pada kondensor adalah terdapatnya fasilitas ventilasi untuk pemindah udara tidak terkondensasi. Catatan bahwa kandungan udara tidak terkondensasi dapat mengurangi koefisien kondensasi. *Othmer* menyampaikan bahwa 1% udara tercampur ke dalam volume uap maka dapat menurunkan koefisien kondensasi 56% oleh karena itu gas yang terakumulasi ini tidak dapat ditoleransi selama operasi kondensor [7].

Sistem kondensor uap yang terdapat pada instalasi *power-plant*, secara umum menggunakan prinsip perhitungan koefisien transfer kalor pada sisi-*tube* dan sisi-*shell*. Ketika uap masuk ke kondensor, maka akan memberikan kalor *latent* kondensasi isothermal yang merubah fasa uap menjadi cair. Setelah uap terkondensasi, air saturasi ini mengalir dan terkumpul pada *bottom (hot-well)* kondensor. Kondisi *subcooling* oleh *subcooler* terpisah (*separate subcooler*) juga data diperlukan untuk melindungi kavitasi pada pompa kondensat.

Pada umumnya dalam desain temperatur uap keluar turbin (*discharge temperature*) tidak lebih dari 158°F (70°C) hal ini karena temperatur yang lebih tinggi cenderung memberikan *trouble* deposit kerak. Sementara itu pengalaman dalam pengoperasian alat kondensor membuktikan bahwa kasus korosi telah mengakibatkan banyak *trouble* sebagaimana pernah terjadi pada kondensor reaktor PWR Arkansas Nuclear One, UNIT 1 (ANO-1). Biasanya korosi terutama cenderung terjadi pada *saltwater cooling system (SWCS)* sistem pendingin tersier yang menggunakan air laut sebagai pendingin.

Transfer Kalor

Perhitungan desain untuk alat penukar kalor kondensor pada dasarnya adalah menentukan koefisien transfer kalor dan luasan transfer kalor (*heat transfer area, A*) persamaan berikut ini yang digunakan [8],

$$A = \int_{t_i}^{t_o} \frac{m_p \cdot c_p}{U_o \cdot LMTD} \cdot dT \quad (1)$$

Dalam hal ini koefisien transfer kalor, menggunakan nilai *overall heat transfer coefficients (U_o)* yang merupakan gabungan dari faktor konstituen berdasarkan penurunan temperatur (*temperature drop*), *U_o* merupakan kombinasi koefisien konveksi pada permukaan kedua sisi.

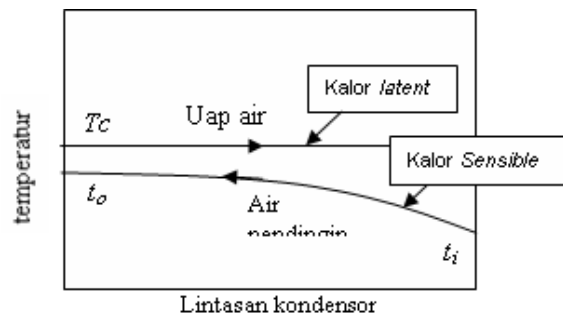
Pada kondensor, jumlah kalor untuk melakukan kondensasi uap adalah;

$$Q_c = m_c = (i_i - i_o) \quad (2)$$

selanjutnya persamaan konstitutif untuk pendinginan dan perubahan temperatur keluar-masuk aliran pendingin melalui *tube* :

$$Q_p = m_p \cdot c_p [t_o - t_i] \quad (3)$$

m_c dan *m_p* adalah laju aliran uap dan air pendingin, (*i_i - i_o*) = λ, kalor *latent* kondensasi, dan *c_p* : kalor spesifik pendingin, (*t_o - t_i*) = beda temperatur keluar dan masuk pendingin. Gambar 3 menunjukkan contoh profil temperatur pada kondensor.



Gambar 3. Profil temperatur Pada Kondensor

Nilai *LMTD* yang merupakan beda temperatur logaritmik antar fluida diekspresikan oleh persamaan berikut,

$$LMTD = \frac{t_o - t_i}{\ln \left[\frac{T_c - t_i}{T_c - t_o} \right]} \quad (4)$$

Untuk koefisien transfer kalor air pendingin pada sisi-*tube* menggunakan korelasi *Dittus-Boelter* untuk mendefinisikan *Nusselt Number*, *Nu* yakni:

$$Nu = h_t \cdot d_t / k_t = 0,023 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (5)$$

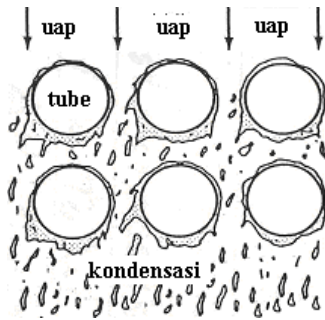
h_t = koef. transfer kalor pendingin

d_t = diameter *tube*,

k_t = konduktivitas termal.

Persamaan ini didasarkan data eksperimental ekstensif pada rentang angka *Reynold* 10.000 – 120.000.

Proses kondensasi di permukaan luar *tube* horisontal, merupakan model kondensasi film (*film-wise*) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Kondensasi pada tube horisontal

Untuk menghitung koefisien kondensasi uap di luar *tube* horisontal (*sisi-shell*) menggunakan korelasi kondensasi film berikut ini [8] :

$$hs = 0,725 \left[\frac{k_c^3 \cdot \rho_c^2 \cdot g \cdot \lambda}{(t_c - t_w) \cdot d_t \cdot \mu_c} \right]^{0,25} \quad (6)$$

Dalam perhitungan sistem kondensasi film ini merupakan bentuk yang umum lazim digunakan dan cukup memuaskan. Namun di beberapa kasus kondensasi, terjadi tetesan kondensat yang tersisa pada permukaan kemudian jatuh dan tanpa menyebar melalui seluruh permukaan. Dalam model kondensasi film itu sendiri dapat mengakibatkan resistansi laju transfer kalor, sehingga laju transfer kalor pada kondensasi film ini diharapkan lebih rendah dari pada laju transfer kalor pada kondensasi tetesan (*drop condensation*). Laju transfer kalor permukaan (*surface heat-transfer rates*) untuk kondensasi butiran lebih besar puluhan kali dibanding laju kondensasi film.

Selanjutnya U_o dihitung dengan persamaan (7) berikut,

$$U_o = \frac{1}{(1/h_s) + (1/h_t) + Rd} \quad (7)$$

keterangan,

k_c, ρ_c, μ_c = konduktifitas termal, densitas dan viskositas kondensat,

Re (Angka *Reynolds*) = $d_{tube} \cdot v \cdot \rho / \mu$,

Pr (Angka *Prandtl*) = $c_p \cdot \rho / k$,

g = percepatan gravitas,
 t_c = temperatur saturasi uap,
 t_{wall} = temperatur dinding *tube*,
 Rd = faktor resistansi,
 Ht = koef. transfer kalor sisi *tube*,
 Hs = koef. transfer kalor kondensasi.

METODA PERHITUNGAN

Langkah yang dilakukan dalam perhitungan desain termal secara skematis ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan data yang berhasil diperoleh maka data parameter-parameter operasi kondensator reaktor PWR SONGS (*San Onofre Nuclear Generating Station*) unit-2 *Northern San Diego* USA (Tabel 1) dipakai sebagai data referensi [9].

Data tersebut mencakup data operasi (temperatur, laju aliran, beban termal) sebagaimana tercantum dalam Tabel 3. disamping itu digunakan pula data tambahan dan asumsi yang dianggap perlu.

Tahapan perhitungan desain terdiri dari :

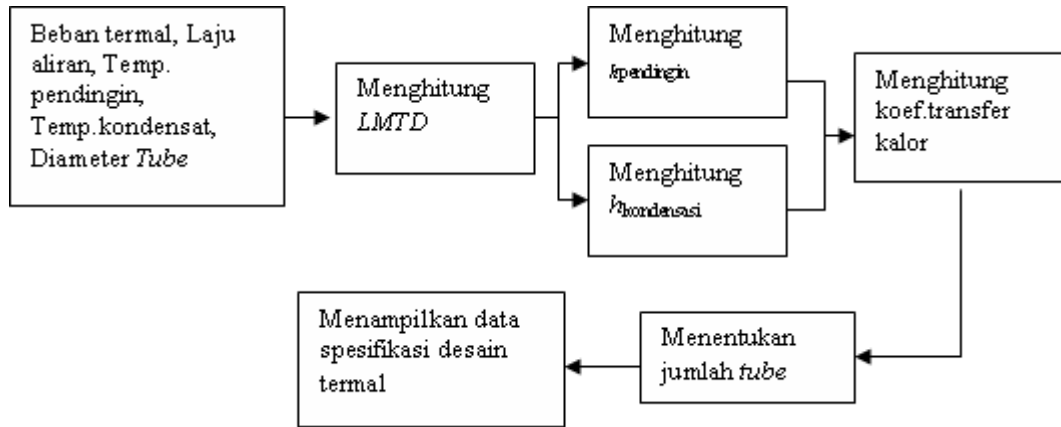
8. Menentukan input data temperatur, laju aliran pendingin dan dimensi standar *tube*.
9. Mengasumsikan parameter yang belum teridentifikasi menggunakan data referensi [10,11,12].
10. Menghitung beban kalor kondensasi, nilai *LMTD*, koefisien transfer kalor dan luasan transfer kalor (A). Sifat termal pendingin berdasarkan temperatur rerata aliran. Jumlah *tube* dihitung berdasarkan nilai A dibagi luasan satu batang *tube* (A_t) yang telah ditentukan pada awal perhitungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap awal perhitungan, yang perlu diperiksa adalah keberlakuan persamaan koefisien transfer kalor. Tercatat bahwa besarnya angka *Reynolds* sebagai indikasi turbulensi berada dalam rentang 10.000 – 120.000 pada Tabel-2, dengan demikian nilai U_o yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung desain termal kondensator. Hasil perhitungan U_o berada dalam rentang nilai standar yang berlaku, hal ini cukup memuaskan karena diperoleh dari komponen koefisien transfer kalor pada *tube* dan kondensasi di luar *tube*. Sementara itu, koefisien kondensasi (persamaan 6) menggunakan model kondensasi film pada permukaan *tube* dan tidak melibatkan perhitungan *sub-cooling* di dalam kondensator.

Sementara itu tidak melibatkan pengaruh *gravity controlled* dan *shear vapour* pada kondensasi di sepanjang bundel *tube* yang pada hakekatnya lebih kompleks. Namun telah dilaporkan bahwa model kondensasi film memiliki angka laju

transfer kalor yang lebih rendah daripada model kondensasi tetesan/butiran (*drop condensation*) [8], dengan demikian hasil perhitungan desain cenderung konservatif, hal ini ditambah dengan penggunaan faktor *fouling*, *Rd*.



Gambar 5. Diagram Tata-Kerja

Tabel 1. Data Input Parameter Operasi Kondensator

Data Parameter	Aliran uap	Aliran Pendingin	Keterangan
Beban termal, KKal/jam		7,9.10 ⁸	
Laju aliran pendingin, m ³ /jam	-----	180.700	SONS
Temperatur masuk pendingin, °C [10, 13]	-----	32,2°C / 28,8	CTS/OTS (*)
Temperatur keluar pendingin, °C [11]	-----	38,8°C / 35,5	CTS/OTS (*)
Temperatur kondensat, °C	36	-----	
Diameter <i>tube</i> , mm, 18BWG	-----	31,75	
Panjang <i>tube</i> , m	-----	9,14	Referensi (**)

(*) Asumsi menggunakan *cooling tower system* (CTS) dan *once-through system* (OTS) [9,10]
Temperatur OTS berdasarkan *Twet-bulk* = 28,8°C, Temperatur CTS = temperatur dari *cooling tower system* = 32,2°C.

(**) *Table of tube Commonly Used in steam condenser (Allis Chalmers Mfg.Co.)*

Tabel 2 menunjukkan data spesifikasi dari hasil perhitungan desain kondensator yang untuk sistem *cooling-tower* dan didasarkan pada data input Tabel 1 yang menggunakan data dari referensi. Dalam hal ini diperlukan data asumsi dan data tambahan lain untuk parameter yang belum teridentifikasi seperti temperatur pendingin masuk dan faktor resistansi (*Rd*).

Tabel 3 adalah perolehan hasil perhitungan desain untuk temperatur air pendingin yang menggunakan dua asumsi yaitu sistem *once-through* dan sistem *cooling tower* yang mengalirkan air untuk sirkulasi pendingin.

Dalam asumsi ini, dianggap temperatur pada sistem *once-through* 28,8°C, sedangkan penggunaan *cooling tower* memiliki temperatur yang lebih tinggi yaitu 32,2°C (asumsi tersebut berdasarkan kondisi temperatur bola basah di Indonesia)[12].

Tampak bahwa hasil perhitungan desain sistem *once-through* pada kondensator berbeda dengan sistem *cooling tower*. Hal ini karena dalam perhitungan ini menggunakan beda temperatur pendingin masuk dan keluar yang berbeda. Penentuan parameter temperatur desain kondensator sistem *cooling-tower*, harus mempertimbangkan kinerja *cooling-tower* dan

perubahan cuaca. Kelebihan kondensor menggunakan sistem *once-through* adalah tanpa *cooling tower* dan ketersediaan air tidak terbatas. Akan tetapi dalam penggunaan air laut memerlukan perhatian pada material sistem pendingin.

Spesifikasi hasil desain ini tentu berbeda dengan data spesifikasi kondensor referensi, hal

tersebut karena perhitungan ini memasukkan data temperatur air pendingin yang lebih tinggi. Begitu pula, parameter yang menggunakan data asumsi termasuk data koefisien fouling dan asumsi ketebalan *tube* kondensor. Data desain termal yang juga penting dalam perhitungan ini adalah Jumlah *tube*, 64073 *tube* untuk *once-through* dan 73032 *tube* untuk *cooling tower*.

Tabel 2. Data Spesifikasi Hasil Desain Termal Kondensor (Sistem Cooling-Tower)

Data Parameter Desain	Sisi-Uap (<i>steam</i>)	Sisi-Pendingin (air)
Tipe Kondensor	<i>Horizontal surface condenser</i>	
Total Beban Termal, KKal/ jam	$7,9 \cdot 10^8$	
Laju aliran pendingin, m ³ /jam	----	180.700
Temperatur masuk pendingin, °C	----	32,2
Temperatur keluar pendingin, °C	----	38,8
Temperatur kondensat, °C	36	----
Tekanan Saturasi uap, KPa	5,940	----
<i>LMTD</i> , °C	6,46	
<i>Tube OD</i> /18BWG, mm	----	38,1
<i>Tube ID</i> , mm	----	35,1
Panjang <i>tube</i> , m	----	9,14
Jumlah <i>Tube</i>	----	73032
Luasan transfer kalor, m ²	66.638	
Re	----	73837
Pr	----	2,52
Koef. transfer kalor h_t , KKal/(j.m.°C)	----	4814
Koef. transfer kalor h_s , KKal/(j.m.°C)	5854	----
Koef. transfer kalor U_o , KKal/(j.m.°C)	1264	
Desain Resistansi, R_d , m ² .°C.j/KKal	0,0097	
Jumlah <i>pass-tube</i>	----	2
Kalor <i>Latent</i> λ , KKal/kg	582,2	----
Kecepatan pendingin, m/detik	----	2,042

Tabel 3. Parameter kondensor Berdasarkan temperatur *once-through* dan *cooling tower* system

Data Parameter	Temperatur pendingin masuk	
	<i>once-through water</i> 28,8°C	<i>Cooling tower system</i> 32,2°C
<i>LMTD</i> , °C	5,76	6,46
Jumlah <i>Tube</i>	64073	73032
A , m ²	58.463	66.638
U_o , KKal/(j.m.°C)	1217	1257
Laju aliran pendingin, m ³ /jam	156.261	180.700

KESIMPULAN

Dalam perhitungan desain termal ini tidak dapat menjangkau semua permasalahan desain kondensor secara rinci, akan tetapi prinsip dasar perhitungan desain termal telah dapat dikuasai. Problem desain di luar

perhitungan desain termal akan dipelajari pada tahap selanjutnya, termasuk teknik desain dengan mempertimbangkan tingkat konservatif tertentu.

Pada sistem *once-through* pendingin tersier yang telah di desain yang menggunakan air laut sebagai media pendingin untuk pembuangan kalor, laju aliran pendinginnya

adalah 156.261 m³/jam sedangkan pada *cooling tower system* 180.700 m³/jam. Begitu juga jumlah *tube* untuk *once-through system* adalah 64073 batang dan *cooling tower system* 73032 batang. Hal yang diperlukan dalam desain kondensor menggunakan *cooling-tower* adalah penentuan parameter temperatur yang sangat dipengaruhi oleh kinerja *cooling-tower* dan perubahan temperatur cuaca setempat.

DAFTAR PUSTAKA

1. http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_power_plant.
2. MULLER.A.C, " Selection of Condenser", Heat Exchanger Design Handbook, Hemisphere Pub. Corp, 1983.
3. http://en.wikipedia.org/wiki/pressurized_water_reactor#pwr_reactor_design, Pressurized water reactor - Wikipedia, the free encyclopedia
4. RICHARD EP - JW. HARPSTER, "The Economic Effects Of Condenser Backpressure On Heat Rate, Condensate Subcooling And Feedwater Dissolved Oxygen", OH Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference Miami Beach, Florida, July 23-26, 2000.
5. <http://www.honeywell.com/imc> , " HC900 Power Plant Condenser Application Brief Industry: Utility",
6. WALTER GLOYER, "Thermal Design of Condensers", American Loc.Co, Alco Product Division, Dunkirk, NY, 1978.
7. <http://www.cbu.edu/~rprice/lectures/condhtc.html>
8. NN, " estimation of a condenser re-optimization for SONGS", N. San Onofre Nuclear Generating Station Southern SAN CLEMENTE, *California's Coastal Power Plants, Dec-2005*.
9. BATAN, "Safety Analysis Report-RSG-GAS", revisi-9, Section-6, page 6-6, 2002.
10. <http://www.engineeringtoolbox.com/cooling-tower-efficiency.mht>
11. <http://www.energy.qld.gov.au/electricity/infosite/index.htm>
12. <http://www.batan.go.id/datalingkungan/index.php?id=11>
13. DOUGLAS E – ARMOND D, " Modular Condenser Replacement At ANO- 1 Solve Operating Problems And Improves Performance', Arkansas Nuclear One 1448 S.R. 333,1999.

TANYA JAWAB

Pertanyaan

1. Parameter apa yang mempengaruhi baik buruknya kualitas dari kondenser? (Adi Abimanyu).
2. Jika kita ingin membuat sistem kontrol suatu kondenser, parameter input, output dan *disturbance* (gangguan) apa apa yang harus diperhatikan? (Adi Abimanyu).
3. Apakah data tampilan dari alur sekunder untuk alur primer dengan kapasitas yang sama?

Jawaban

1. Untuk kondenser PLTN, parameter kapasitas pendingin sangat penting, tahanan rendah juga penting, supaya kondensat temperatur rendah bias dipompa kembali ke steam generator. Catatan, temperatur tinggi menyebabkan kavitasi pompa.
2. Desain kondenser biasanya mempertimbangkan rentang temperatur, tekanan, dan flow yang harus dipenuhi dalam operasi.
3. Tentu saja kapasitas sekunder lebih besar.

