

SISTEM PENDINGIN REAKTOR

**Pelatihan
Operator dan Supervisor Non Daya (Reaktor Kartini)**



**DIREKTORAT PENGEMBANGAN KOMPETENSI
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
2024**

DAFTAR ISI

	Halaman
BAB I. PENDAHULUAN	3
A. Latar Belakang	3
B. Tujuan Penulisan Diktat	3
BAB II. DASAR-DASAR PERPINDAHAN PANAS	4
A. Fungsi dan Mekanisme Pendinginan Teras	4
B. Karakteristik dan Batas Desain Suhu Elemen Bahan Bakar TRIGA	5
BAB III. SISTEM PENDINGIN REAKTOR	8
A. Sistem Pendingin Primer	8
B. Tangki reaktor	8
C. Pompa Primer	9
D. Alat Penukar Panas (<i>Heat Exchanger/HE</i>)	10
1. Proses penukaran/perpindahan panas	10
2. Penukar Panas Tipe <i>Shell and Tube</i> dan Tipe Plat	13
E. Sistem Penambahan Air Pendingin Primer	18
F. Perpipaan dan Alat Ukur Pada Pendingin Primer	18
G. Sistem Pendingin Sekunder	21
H. Menara Pendingin (<i>Cooling Tower</i>)	24
I. Sistem Moderasi	29
J. Sistem Pendingin Teras Darurat (SPTD)	29
K. Sistem Pembuangan Panas Peluruhan	30
DAFTAR PUSTAKA	27

BAB I PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Reaktor nuklir adalah perangkat pembangkit uap yang menggunakan bahan bakar nuklir misalnya uranium dan thorium. Untuk reaktor Kartini merupakan jenis reaktor nuklir yang tidak digunakan untuk membangkitkan uap melainkan reaktor untuk penelitian dengan memanfaatkan fluks neutron yang dihasilkan. Pada reaktor Kartini, bahan bakar dimasukkan ke dalam kelongsong bahan bakar yang selanjutnya dimasukkan ke dalam teras reaktor yang diisi dengan air demineralisasi, air demineralisasi ini sebagai pendingin primer. Saat reaktor Kartini dioperasikan terjadi reaksi fisi yang menghasilkan neutron dan panas, neutron tersebut dimanfaatkan untuk penelitian dan panasnya harus dipindahkan dari teras reaktor ke lingkungan melalui air pendingin melalui proses pendinginan. Proses pendinginan ini dimulai dari penyerapan panas dari bahan bakar oleh air demineralisasi di dalam teras reaktor sebagai pendingin primer. Pendingin primer didinginkan oleh air pendingin (pendingin sekunder) di dalam penukar kalor (*Heat Exchanger*). Selanjutnya panas dari air pendingin (pendingin sekunder) dibuang ke lingkungan melalui proses pendinginan di dalam *cooling tower*.

B. Tujuan Penulisan Diktat

Penulisan diktat bertujuan untuk:

1. Memperjelas proses pendinginan akibat panas yang dibangkitkan oleh bahan bakar di dalam teras reaktor Kartini khususnya pada saat reaktor dioperasikan.
2. Meningkatkan motivasi dan gairah belajar bagi peserta diklat;
 - a. Mengembangkan kemampuan proses pendinginan bahan bakar di dalam reaktor Kartini.
 - b. Mengembangkan kemampuan dalam mempelajari bagian-bagian dari perangkat pendingin yang digunakan pada reaktor Kartini.

BAB II PENDINGIN TERAS REAKTOR

A. Fungsi dan Mekanisme Pendinginan Teras

Sistem pendingin reaktor pada dasarnya berfungsi untuk memindahkan panas yang dibangkitkan oleh elemen elemen bahan bakar sehingga dapat mencegah terjadinya kerusakan akibat mengalami pemanasan yang berlebihan (*overheated*). Pendinginan teras reaktor ini dilakukan sedemikian rupa agar suhu elemen bahan bakar tidak melampaui batas desain keselamatan yang ditetapkan selama reaktor beroperasi pada rentang daya yang direncanakankan. Selama batas maksimum operasi tersebut tidak dilampaui maka dapat dijamin bahwa kelongsong bahan bakar yang terbuat dari bahan SS-304 tidak akan mengalami kerusakan atau keretakan, sehingga tidak akan terjadi pelepasan radioaktivitas keluar dari elemen bahan bakar. Mekanisme pendinginan teras reaktor, secara ringkas diuraikan sebagai berikut:

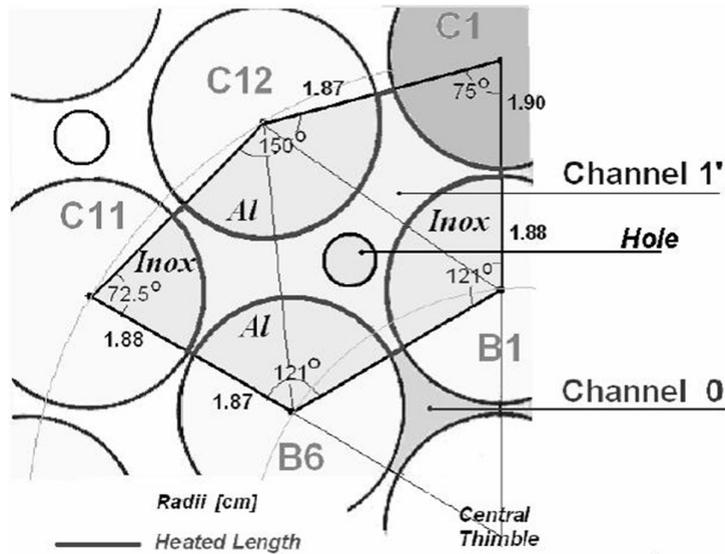
1. Panas yang terbentuk di dalam teras reaktor sebagai akibat terjadinya reaksi fisi, di dalam elemen bahan bakar dipindahkan ke air dimineralisasi (pendingin primer) di sekitar kelongsong elemen bahan bakar secara konveksi alam.
2. Air yang lebih panas di bagian teras reaktor selanjutnya akan bergerak ke bagian atas tangki reaktor, dan kemudian dialirkan ke alat penukar panas (*heat exchanger*) untuk didinginkan dengan air pendingin (pendingin sekunder).
3. Panas yang diserap oleh air pendingin (pendingin sekunder) selanjutnya dipindahkan ke udara sekitar (lingkungan) diluar gedung reaktor melalui menara pendingin (*cooling tower*).
4. Air pendingin primer yang telah didinginkan oleh pendingin sekunder sehingga sudah menjadi lebih dingin dan selanjutnya di semburkan ke bagian teras reaktor untuk mendinginkan di dalam teras reaktor.

B. Karakteristik dan Batas Desain Suhu Elemen Bahan Bakar TRIGA

Elemen bahan bakar reaktor Kartini menggunakan elemen bahan bakar standar TRIGA, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 dengan susunan di dalam teras reaktor ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1. Elemen bahan bakar standar TRIGA [1].



Gambar 2.2. Susunan bahan bakar di dalam teras reaktor TRIGA [2].

Desain tipe 104 menggunakan uranium dengan pengkayaan U^{235} sekitar 20% dalam bentuk matrik $U-ZrH_x$ dengan x adalah rasio jumlah atom H terhadap Zr.

Untuk tipe 104, $x = 1,65$. Bahan bakar U-ZrH selanjutnya dimasukkan ke dalam kelongsong yang terbuat dari bahan SS-304 dengan tebal 0,51 mm. Tabel 2.1 merupakan data spesifikasi desain untuk elemen bahan bakar TRIGA tipe 104.

Tabel 2.1. Data Spesifikasi Desain Elemen Bahan Bakar TRIGA Tipe 104 [3].

Komponen	Parameter Desain	Komponen	Parameter Desain
Elemen Bahan bakar		Reflektor Aksial	
Diameter luar	3,81	Bahan	Grafit
Panjang elemen	72,14	Densitas (g/cc)	3,56
Bahan Bakar		Diameter	6,6
Komposisi bahan	U-ZrH _{1,65}	Tinggi bagian atas	9,4
Densitas	6,0	Tinggi bagian bawah	
Kandungan uranium	8,5	Kelongsong	
Pengkayaan (%)	20	Bahan	SS-304
Kandungan U ²³⁵ rerata (g)	38	Densitas (g/cc)	7,9
Diameter luar U-ZrH _{1,65}	3,56	Tebal	0,051
Diameter dalam	0,64	Tutup atas dan bawah	
Tinggi aktif	38,1	Bahan	SS 304
Batang Zr		Densitas (g/cc)	7,9
Bahan	Zr	Tinggi tutup atas	10,41
Densitas (g/cc)	6,5	Tinggi tutup bawah	7,62
Diameter	0,64		
Tinggi	38,1		

Berdasarkan sifat fisis dari bahan bakar TRIGA, khususnya terkait dengan pengaruh suhu terhadap proses disosiasi hidrogen dan batas kekuatan mekanik dari kelongsong, maka berdasarkan batas keselamatan desain suhu untuk kondisi operasi normal pada kelongsong ditetapkan sebesar 500 °C. Batasan tersebut didasarkan pada pertimbangan bahwa pada suhu kelongsong sebesar 500 °C maka suhu bahan bakar tertinggi dapat mencapai 1.150 °C. Pada suhu tersebut maka tekanan disosiasi hidrogen mencapai sekitar 141,54 atm (2.080 psi), yang akan menyebabkan tekanan kumulatif pada dinding bagian dalam kelongsong sekitar 28,58 atm (420 psi). Tekanan tersebut maka dapat memberikan beban pada dinding

kelongsong hingga mengalami tegangan sekitar 1.056,1 atm (15.529 psi), yang masih jauh dari batas kekuatan tarik (*tensile strength*) dari kelongsong (SS-304 yang digunakan) sebesar 3.910,6 atm (57.470 psi) maupun kekuatan *yield* sekitar 2.453,07 atm. Dengan demikian bila suhu kelongsong bahan bakar dapat dipertahankan dibawah 500 °C, maka dapat dijamin bahan bakar tidak akan mengalami kerusakan.

Untuk memberikan margin keselamatan yang lebih tinggi, maka ditetapkan batas desain keselamatan untuk suhu bahan bakar reaktor Kartini sebesar 700 °C, dan suhu air tangki reaktor maksimum sebesar 47 °C [4]. Dengan batasan suhu air tersebut maka selain tidak menimbulkan panas lebih (*over heating*) pada kelongsong juga tidak menurunkan kinerja resin pada sistem pemurnian air.

Untuk dapat merealisasikan kondisi tersebut, maka diperlukan sistem pendingin yang mampu memindahkan panas yang dibangkitkan oleh bahan bakar sedemikian rupa sehingga suhu bahan bakar tidak melampaui batas keselamatan yang ditetapkan. Bahan pendingin yang digunakan untuk reaktor TRIGA adalah air (H₂O) yang selain untuk mengambil panas dari permukaan kelongsong elemen bahan bakar, juga berfungsi sebagai perisai radiasi ke arah vertikal. Selain itu suhu air pendingin pada tangki reaktor tidak boleh melebihi 47 °C. Batas ini didasarkan pada pertimbangan batas maksimum suhu kerja resin, di mana bila dioperasikan di atas suhu 49 °C maka akan rusak.

Untuk keperluan tersebut maka diperlukan sistem pendingin reaktor yang dalam hal ini terdiri dari 2 sub sistem yaitu sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Sistem pendingin primer berfungsi menyerap panas dari bahan bakar di dalam tangki reaktor dan dipindahkan ke sistem pendingin sekunder melalui alat penukar panas (*heat exchanger*) untuk selanjutnya dibuang ke udara sekitar (lingkungan/bagian luar gedung reaktor).

BAB III

SISTEM PENDINGIN REAKTOR

A. Sistem Pendingin Primer

Sistem pendingin primer berfungsi memindahkan panas yang dibangkitkan di dalam teras reaktor ke sistem pendingin sekunder, untuk selanjutnya dibuang ke lingkungan di luar gedung reaktor. Dengan demikian suhu elemen bahan bakar tetap berada di bawah batas keselamatan suhu operasi yang ditetapkan. Beberapa komponen utama dari sistem pendingin primer antara lain tangki reaktor, pompa primer, alat penukar panas dan pipa penghubung.

B. Tangki reaktor

Tangki reaktor terbuat dari bahan aluminium tipe 1.100 dengan ukuran diameter sekitar 2 meter dan tinggi sekitar 6,4 meter [4]. Teras reaktor ini diisi air demineralisasi (H_2O) sebagai bahan pendingin primer. Gambar 3.1 menunjukkan penampang vertikal dari teras reaktor Kartini. Bahan aluminium yang digunakan berderajat nuklir, sehingga relatif tahan terhadap korosi maupun radiasi. Sekalipun demikian untuk menjaga laju korosi diminimalkan dengan memperhatikan mutu air pendingin primer. Disamping hal tersebut juga perlu dilakukan pemantauan secara berkala terhadap kondisi tangki reaktor. Pemantauan terhadap mutu air pendingin primer dilakukan pada setiap akan dilakukan operasi reaktor atau sekurang-kurangnya 1 bulan sekali dan pengamatan/inspeksi terhadap kondisi tangki reaktor dilakukan sekurang-kurangnya 1 kali dalam setahun. Inspeksi dilakukan baik secara visual maupun menggunakan peralatan ultrasonik untuk mengetahui ketebalan atau kemungkinan adanya proses korosi yang terjadi di bagian dalam dinding tangki reaktor.



Gambar 3.1. Penampang vertikal reaktor Kartini [4].

C. Pompa Primer

Air pendingin primer dipompa untuk disirkulasikan menggunakan pompa jenis sentrifugal yang mampu mensirkulasikan air dengan laju aliran hingga sekitar 438 liter per menit melalui alat penukar panas untuk dipindahkan panasnya ke air pada sistem pendingin sekunder. Pompa pada sistem pendingin primer reaktor Kartini ada 2 buah, yang dioperasikan secara bergantian atau salah satu sebagai cadangan. Tabel 3.1 menunjukkan data karakteristik dari pompa primer yang digunakan pada reaktor Kartini.

Berdasarkan hasil evaluasi, dengan memperhatikan karakteristik desain alat penukar panas dan komponen/peralatan lainnya pada sistem pendingin sekunder maka dengan debit air tersebut pompa primer yang digunakan mampu digunakan untuk mendukung pengoperasian reaktor hingga 394,28 kW atau sudah 396% melebihi kebutuhan untuk operasi pada tingkat daya 100 kW. Dengan demikian untuk batas keselamatan daya reaktor Kartini sebesar 115 kW masih dalam batas kemampuan sistem pendingin primer dari reaktor Kartini. Untuk menjaga keandalan dan kinerja dari pompa primer maka perlu dilakukan pemeriksaan kondisi pompa

pada saat akan dilakukan pengoperasian reaktor atau sekurang-kurangnya sebulan sekali.

Tabel 3.1. Karakteristik Pompa Primer reaktor Kartini [4].

Nama komponen	Karakteristik	Keterangan
Pompa Primer	<i>Centrifugal self priming</i> Merk : Flowmax 10 Model : 26006 Seri : 76 F 135 Head : 40 m Debit : 438 Lpm	Jumlah : 2
Motor pompa primer	Merk : Baldor Daya : 5 HP Phase : 3 Voltase : 208/230/460 Amper : 12,6/12/6 Cycle : 50/60 Hz Rpm : 3450 Suhu : 40°C	Jumlah : 2

D. Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger/HE*)

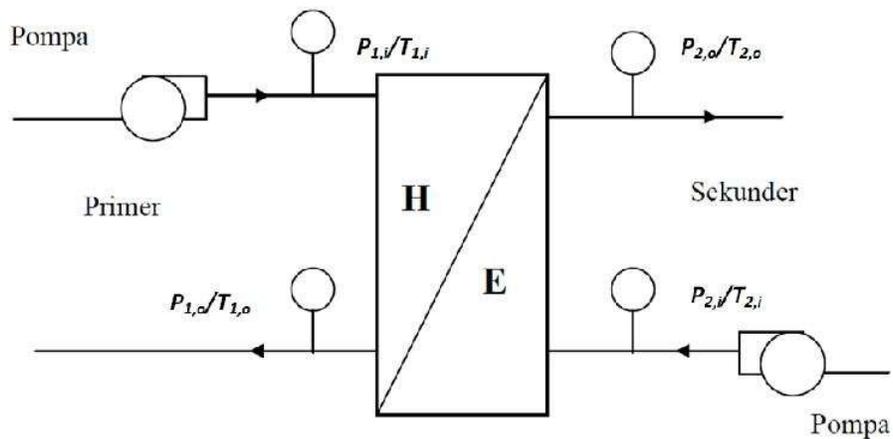
Alat penukar panas berfungsi untuk memindahkan panas dari pendingin primer (air demineralisasi dari tangki reaktor) ke pendingin sekunder (air pendingin yang didinginkan oleh menara pendingin (*cooling tower*)). Reaktor Kartini menggunakan 2 jenis alat penukar panas, yaitu 1 buah jenis *shell and tube heat exchanger* dan 1 buah jenis *plate heat exchanger*, yang dioperasikan secara bergantian atau salah satu sebagai cadangan. Tabe 3.2. menunjukkan karakteristik dari alat penukar panas yang digunakan pada reaktor Kartini. Untuk mempertahankan kinerja dari alat penukar panas, maka dilakukan pembersihan dan atau inspeksi sekurang-kurangnya satu kali per tahun.

1. Proses penukaran/perpindahan panas

Proses perpindahan ini adalah proses perpindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder. Proses terjadinya perpindahan panas di dalam penukar panas dtunjukkan pada Gambar 3.2.

Tabel 3.2: Karakteristik dari Komponen alat penukar panas [4].

No	Nama	Karakteristik	Keterangan
1	Alat Penukar Panas <i>Shell and Tube</i>	Bahan Shell : besi Diameter shell D_S : 39,2 cm Bahan Tube : SS Jumlah tube : 144 Diameter luar D_{OT} : 19,09 mm Diameter dalam D_{IT} : 16,74 mm Jumlah baffle : 16 Kapasitas : 250 kW	Jumlah : 1
2	Alat Penukar Panas <i>Plate</i>	Bahan : SS Jumlah plate : 75 Pass : 1 Luas permukaan : 6,17 m ² Kapasitas : 250 kW	Jumlah : 1



Gambar 3.2. Skema sistem aliran pada HE dan Pompa [4].

Persamaan-persamaan dasar yang digunakan dalam perhitungan sistem penukar panas adalah sebagai berikut,

Untuk sisi primer [5]:

$$Q_P = m_p \cdot C_p (\Delta T_1) = m_p \cdot C_p (T_{1i} - T_{1o}) \quad (3.1)$$

Untuk sisi sekunder [5]:

$$Q_S = m_s \cdot C_p (\Delta T_2) = m_s \cdot C_p (T_{2o} - T_{2i}) \quad (3.2)$$

Perpindahan panas dari pendingin primer ke pendingin sekunder [5]

$$Q_a = U_a \cdot A_o (LMTD) \quad (3.3)$$

dan

$$U_a = (NTU) \cdot M C_p / A_o \quad (3.4)$$

dengan Q_p dan Q_s adalah besar laju perpindahan panas yang terjadi didasarkan kapasitas panas pada pendingin primer dan sekunder, Q_a besar laju perpindahan panas yang terjadi sesuai kapasitas HE, m_p dan m_s laju aliran air pendingin di sisi primer dan sekunder, C_p kalor jenis (kapasitas panas) air pendingin, T_1 dan T_2 suhu air pendingin di sisi primer dan sekunder, U_a koefisien perpindahan panas total sesungguhnya, A_o luas permukaan perpindahan panas total, LMTD *Logarithmic Mean Temperature Difference* (perbedaan suhu rata-rata logaritmis) dan NTU *Number of Transfer Unit* (jumlah satuan perpindahan panas). Besarnya LMTD suatu HE berbeda antara yang satu dengan yang lainnya tergantung pada konfigurasinya, sedangkan besarnya NTU menunjukkan baik dan tidaknya kondisi suatu HE.

Berdasarkan rumus-rumus dasar HE yang telah diuraikan diketahui bahwa banyak faktor yang mempengaruhi keberhasilan terjadinya perpindahan panas di dalam HE. Namun satu hal yang tidak dapat dihindari yaitu bahwa besarnya perpindahan panas yang terjadi akan sangat dipengaruhi oleh kondisi HE. Maksudnya adalah apabila kondisi permukaan perpindahan panas menurun karena kotor maka koefisien perpindahan panas total (U_a) akan menurun dan hal ini akan mengakibatkan Q_a lebih kecil dan sebaliknya. Jadi besar dan kecilnya U_a atau Q_a tergantung pada kondisi HE yaitu tingkat kebersihan dan aliran yang terjadi. Agar Q_a berharga besar maka permukaan perpindahan panas HE harus bersih dan hal ini memerlukan perawatan, termasuk perawatan (*treatment*) dari air pendingin yang masuk ke HE.

Di reaktor Kartini Yogyakarta terdapat dua jenis sistem penukar panas

yaitu tipe *Shell and Tube* atau *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE) dan tipe Plat atau *Plate Heat Exchanger* (PHE). Kedua HE tersebut mempunyai fungsi dan kapasitas pendinginan yang mendekati sama yaitu sebesar 250 kW. Keberhasilan dari perpindahan panas dari ke (2) dua HE tersebut sangat ditentukan oleh baik dan buruknya alat penukar panas (HE) dan fluida pendinginnya. Karena fluida pendingin selalu dijaga kualitasnya maka keberhasilan pendinginan Air Tangki Reaktor (ATR) hanya bergantung pada kondisi HE. HE dikatakan baik apabila mempunyai nilai transfer panas (NTU) yang baik dan hal tersebut hanya terjadi apabila dalam proses transfer panas tidak terjadi hambatan yang berlebihan yang diakibatkan oleh adanya pengotor (*fouling*) di dalam HE. Jadi agar kontinuitas operasi reaktor Kartini terjaga maka sistem pendingin primer harus selalu dalam keadaan baik. Hal ini dilakukan dengan perawatan khususnya untuk pembersihan HE dari pengotor yang ada. Pengotor pada HE di reaktor Kartini kebanyakan terdapat pada sisi sekunder karena air pendingin sekunder tidak dimurnikan tetapi diambilkan dari air sumur, baik untuk ke 2 (dua) HE yang mempunyai reaktor Kartini yaitu tipe *Shell and Tube* (*Shell and Tube Heat Exchanger*) dan tipe Plat (*Plate Heat Exchanger*)

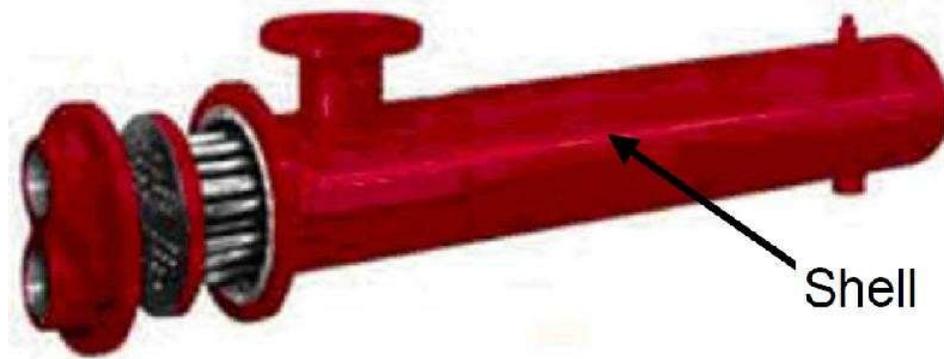
Jadi tujuan dari perawatan adalah untuk menjaga kinerja HE agar berfungsi sesuai dengan yang diinginkan yaitu dapat mendinginkan air teras reaktor sampai pada batas suhu seperti yang tercantum di dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK) yaitu 40 °C [4]. Disamping itu bila terjadi kerusakan dari komponen HE, dapat dilakukan perbaikan sedini mungkin sehingga umur pakai (*life time*) dari HE dapat diperpanjang.

2. Penukar Panas Tipe *Shell and Tube* dan Tipe Plat

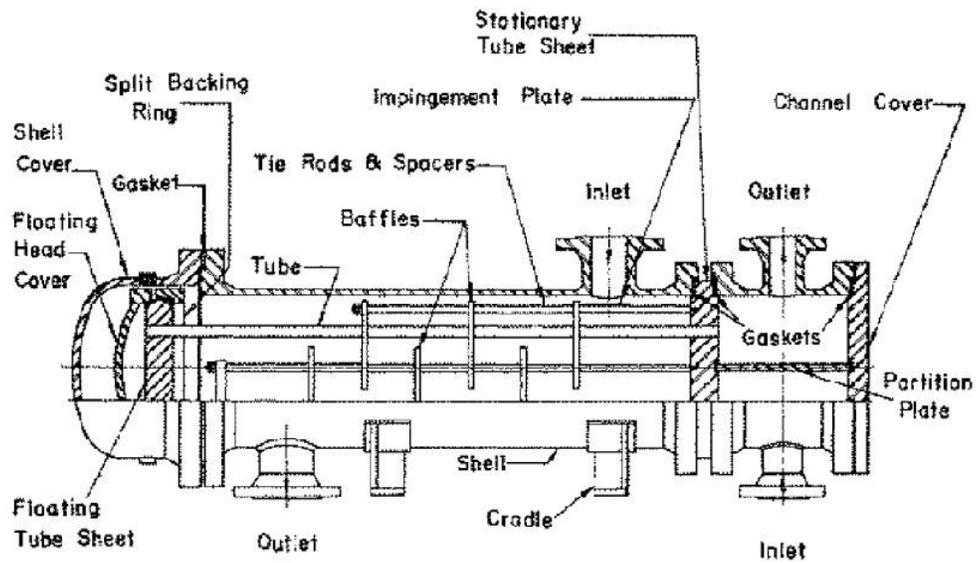
Di R eaktor Kartini menggunakan 2 jenis penukar panas yaitu tipe *shell and tube* dan tipe plat. Kedua penukar panas tersebut mempunyai kapasitas pendinginan yang sama yaitu 250 kW.

Penukar Panas tipe *Shell and Tube*

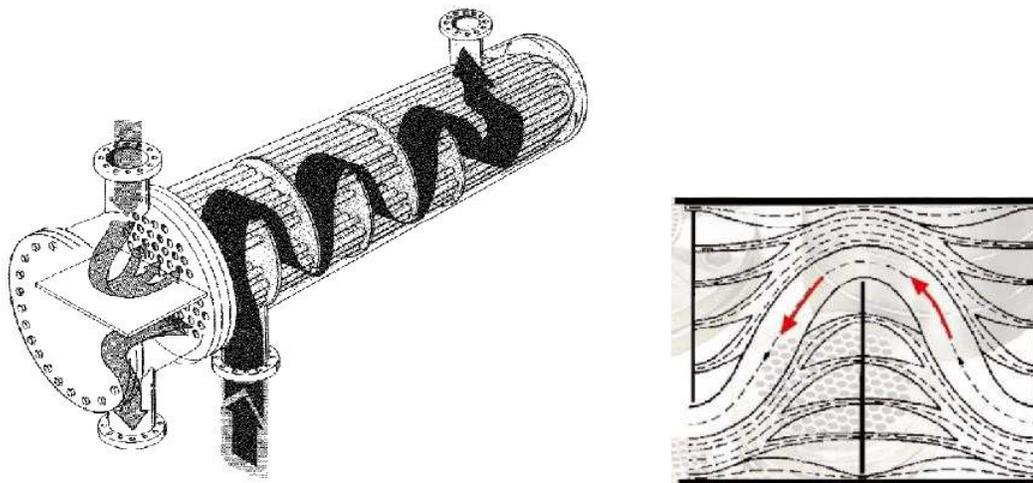
Penukar panas tipe *Shell and Tube* yang dipakai di reaktor Kartini mempunyai 74 buah pipa terbuat dari bahan stainless steel 304 dan 32 buah *baffle* yang terbuat dari baja karbon. Berdasarkan konstruksinya, jarak antar buluh/pipa (*tube*) sangat sempit, maka pengotor akan sangat mudah terakumulasi pada dinding pipa khususnya di sekitar *baffle* sehingga dapat mengakibatkan terganggunya perpindahan panas antara sisi primer dan sekunder. Di samping itu karena *baffle* berfungsi sebagai penghalang dan pengarah aliran yang dibuat dari baja karbon maka mudah berkarat dan mengalami kerusakan karena korosi dan erosi (pengikisan aliran). Dengan kondisi-kondisi tersebut di atas, kegiatan perawatan sangat penting. Beberapa contoh konstruksi penukar panas tipe *Shell and Tube* ditunjukkan pada Gambar 3.3 sampai dengan Gambar 3.6.



Gambar 3.3. Bentuk penukar panas tipe *shell and tube* jenis *U-tube* [6].

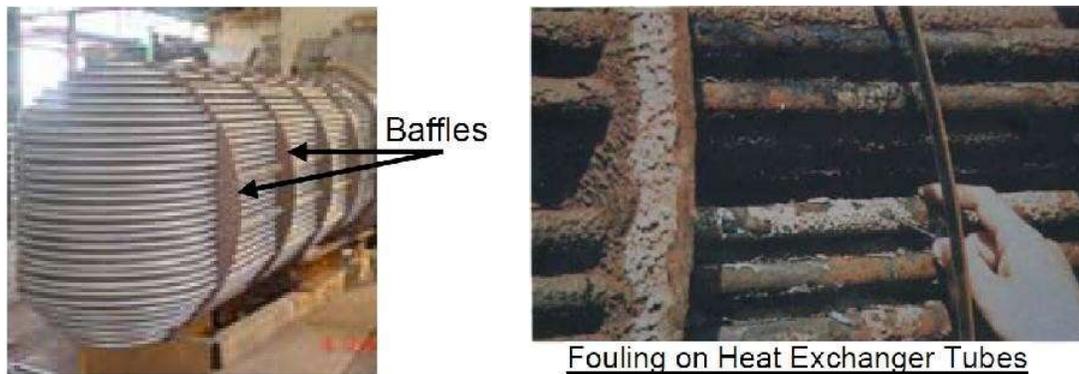


Gambar 3.4. Bagian-bagian penukar panas tipe *shell and tube* jenis *Floating tube* [7].



a. Aliran fluida di dalam penukar panas b. Aliran fluida diantara *baffle*

Gambar 3.5. Aliran fluida di dalam penukar panas tipe *shell and tube* jenis *U-tube* [7].



a. Konstruksi *baffle* dan *tube*

b. Kondisi terjadi pengerasan dan korosi

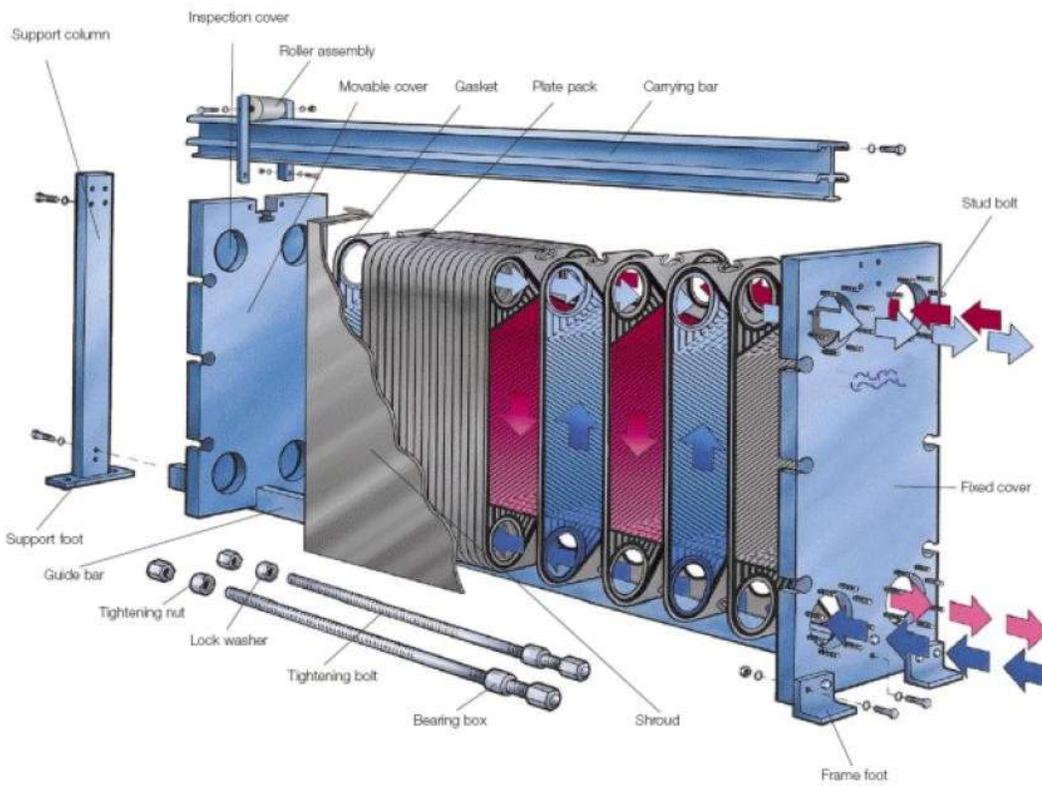
Gambar 3.6. Bagian di dalam penukar panas tipe *shell and tube* jenis *U-tube* [7].

Penukar Panas Tipe Plat

Penukar panas tipe plat yang dipakai di reaktor Kartini adalah model EC4-075-1M dengan jumlah plat dan gasket sebanyak 75 buah. Arah aliran fluida primer berlawanan dengan arah aliran fluida sekunder pada sisi plat yang berbeda atau bersebelahan. Didasarkan dari konstruksinya, jarak atau volume ruang antar plat sangat sempit, maka pengotor akan sangat mudah terakumulasi pada plat sehingga dapat mengakibatkan terganggunya perpindahan panas antara sisi primer dan sekunder. Dengan demikian, perawatan penukar panas tipe plat harus dilakukan dengan cermat dan hati-hati sesuai dengan prosedur. Perawatan yang tidak sesuai prosedur dan tidak hati-hati dapat mengakibatkan hal serius yaitu terjadinya kebocoran antara sisi primer dan sekunder. Contoh konstruksi penukar panas tipe plat ditunjukkan pada Gambar 3.7 sampai dengan Gambar 3.8. Jika dibandingkan dengan penukar panas tipe *shell and tube*, penukar panas ini lebih kompak karena dengan ukuran yang kecil mampu memindahkan (*men-transfer*) panas (beban) yang cukup besar.



Gambar 3.7. Penukar panas tipe plat [8].



Gambar 3.8. Detil penukar panas tipe plat dan aliran fluidanya [8].

E. Sistem Penambahan Air Pendingin Primer

Pada saat reaktor beroperasi, ketinggian permukaan air kolam reaktor harus dijaga agar tetap tidak melewati batas terendah yang ditetapkan, yaitu sebesar 20 cm yang diukur dari bagian atas (bibir) tangki reaktor. Dengan batas tersebut, maka volume air yang ada di dalam tangki masih mampu melakukan pendinginan terhadap teras reaktor secara konveksi alam dengan baik, sehingga terhindar dari kerusakan kelongsong maupun pelelehan bahan bakar. Selain itu, dengan batas maksimum penurunan air pendingin tersebut, maka tingkat paparan radiasi diatas anjungan (*deck*) reaktor masih dalam batas yang aman. Berkurangnya air pendingin primer disebabkan adanya penguapan, baik pada saat reaktor dioperasikan maupun tidak dioperasikan.

Berdasarkan hasil pemantauan, laju penguapan air tangki berkisar antara 10 - 60 liter perbulan, tergantung pada frekuensi pengoperasian reaktor dan kondisi udara lingkungan. Untuk itu diperlukan penambahan secara periodik, agar level permukaan air tangki selalu dalam batas yang ditetapkan. Apabila level permukaan air di tangki reaktor mendekati batas bawah yang ditetapkan, maka ditambah dari air *make-up*. Penambahan air dilakukan secara manual dengan menggunakan pompa air dari tangki *make-up* ke tangki reaktor.

F. Perpipaan dan Alat Ukur Pada Pendingin Primer

Perpipaan pada sistem pendingin didesain dengan mempertimbangkan aspek keselamatan. Untuk itu maka perlu dipilih bahan yang memenuhi kriteria terkait sifat fisis seperti tahan korosi dan memiliki kekuatan mekanik yang baik. Terkait dengan hal tersebut maka pada sistem pendingin primer reaktor Kartini digunakan pipa dari bahan aluminium. Selain itu juga dilakukan upaya pengamanan untuk meminimalkan kemungkinan terjadinya kebocoran air pendingin primer melalui beberapa langkah berikut:

1. Untuk mencegah kebocoran pada sambungan pipa, maka setiap sambungan digunakan ulir yang dilapis dengan pita teflon dan dipadatkan dengan epoxy.
2. Pipa masukan sirkulasi pada jarak 1,5 m dari bibir tangki diberi lubang dengan

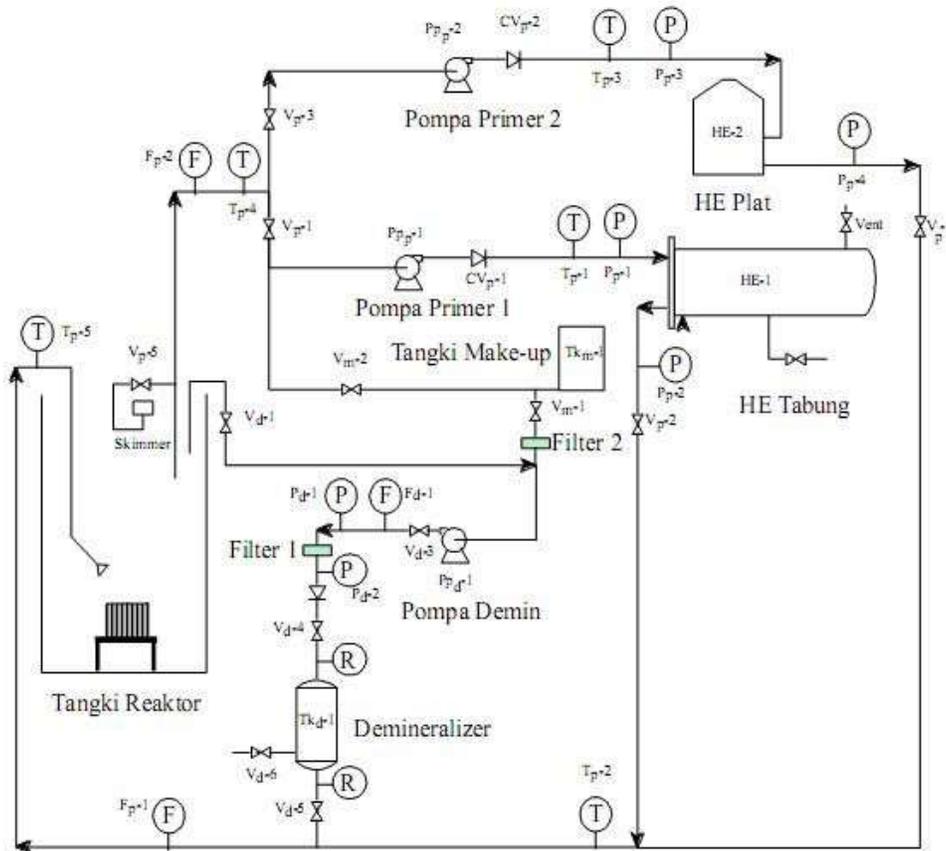
diameter 8 mm pada ketinggian 42 cm dari bibir, dengan maksud bila sistem gagal atau bocor, maka permukaan air tangki akan turun paling rendah hanya sampai batas lubang.

3. Pada pipa sisi masuk dan keluar pompa dipasang katup pengaman, yang dimaksudkan untuk menghentikan aliran air melalui pompa tersebut, sehingga dimungkinkan untuk melakukan perbaikan atau penggantian pompa bila terjadi kerusakan. Selain itu pada saluran keluaran pompa juga masih terdapat *check valve*.
4. Untuk mengurangi kemungkinan kerusakan katup akibat benturan dari luar, maka katup keluaran pompa dipasang pada sisi tegak dengan maksud bila pada sisi keluaran pompa terjadi kebocoran, katup bisa ditutup dan air tidak mengalir keluar dari tangki.
5. Bila terjadi kerusakan alat penukar panas, maka untuk perbaikan dapat dilakukan dengan menutup katup-katup yang masuk tangki, sehingga tidak perlu mengosongkan air tangki reaktor.
6. Pompa dan alat penukar panas diletakkan di tempat yang rendah dengan maksud mengurangi gangguan atau benturan dari luar dan bila ada kebocoran dari luar, air bisa terkumpul pada ruang rendah tersebut.

Untuk pengecekan dilakukan dengan mengamati alat ukur yang terpasang pada instalasi pendingin reaktor Kartini. Untuk mengetahui kinerja dari beberapa komponen utama pada sistem pendingin primer sewaktu reaktor dioperasikan, dipasang beberapa alat ukur, seperti pengukur laju aliran (*flow meter*), pengukur tekanan (*barometer*) dan pengukur suhu air (termometer). Tabel 3.3 menunjukkan karakteristik beberapa alat ukur yang digunakan pada sistem pendingin primer. Untuk meyakinkan ketelitian dari alat ukur tersebut, maka dilakukan kalibrasi sekurang-kurangnya 2 tahun sekali. Adapun skema instalasi dari sistem pendingin primer ditunjukkan pada Gambar 3.9.

Tabel 3.3: Karakteristik Alat Ukur Pada Sistem Pendingin Primer [4].

Nama komponen	Karakteristik	Keterangan
Flowmeter	Merk : Dynasonic Type : TFXL Ultrasonic Flowmeter.	Jumlah : 2 , inlet dan outlet HE plate Dapat dimonitor di komputer
Termometer	Merk : Sika Isian : alkohol Range : 0 - 100°C	Jumlah : 4 Masing-masing inlet dan outlet HE
Termometer	Type RTD Range : 0 - 300°C	Jumlah : 4 Masing-masing inlet dan outlet HE Dapat dimonitor di komputer
Barometer	Type : pegas Range : 0 - 40 psi	Jumlah : 4 Masing-masing inlet dan outlet HE



Gambar 3.9. Skema rangkaian dari sistem pendingin primer reaktor Kartini [4].

G. Sistem Pendingin Sekunder

Sistem pendingin sekunder berfungsi untuk mengambil panas dari sistem pendingin primer, untuk selanjutnya dibuang ke lingkungan/udara di luar gedung reaktor. Proses pengambilan panas terjadi di dalam alat penukar panas di mana air pendingin primer yang lebih panas akan memindahkan panasnya ke air pendingin sekunder yang lebih dingin.

Tekanan air pada sistem pendingin sekunder dibuat lebih besar dari tekanan air pada sistem pendingin primer. Hal ini dimaksudkan untuk mencegah kemungkinan masuknya air pada sistem pendingin primer ke dalam sistem pendingin sekunder. Jika hal ini terjadi maka berpotensi untuk terjadinya pelepasan zat radioaktif ke lingkungan melalui perangkat penukar panas (*heat exchanger*), bila terjadi kebocoran pada elemen-elemen penukar panas.

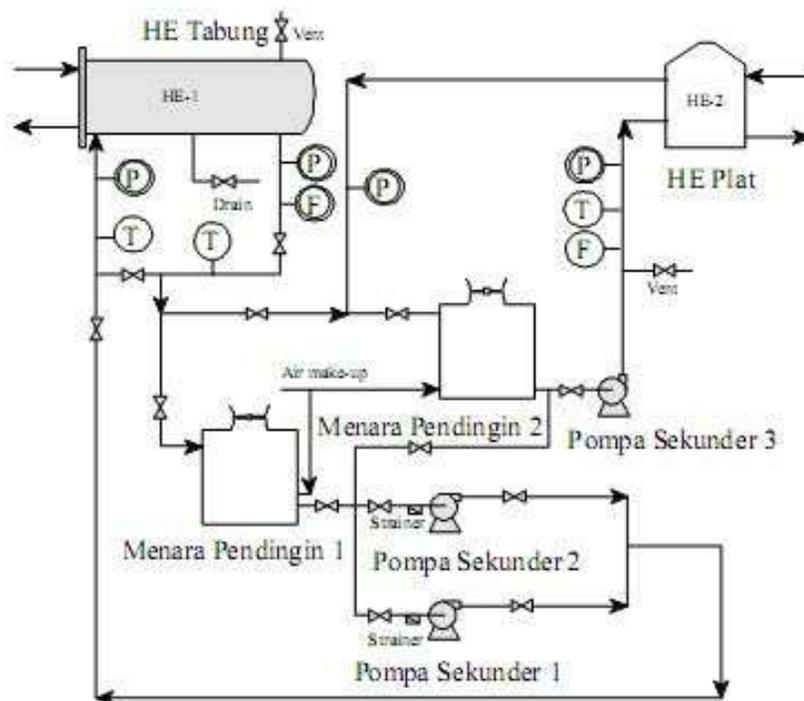
Proses pembuangan atau pelepasan panas ke lingkungan dilakukan dengan cara menyinggungkan butiran-butiran air dengan udara secara berlawanan arah di dalam menara pendingin, sehingga air akan melepaskan panasnya ke udara secara difusi dan konveksi. Selanjutnya air yang sudah dingin dipompa kembali ke penukar panas.

Air pendingin sekunder disiapkan dari air sumur dangkal yang mutunya dikontrol untuk meminimalkan proses korosi dan pergerakan pada komponen alat penukar panas, pompa sekunder, maupun sistem perpipaan. Parameter yang digunakan dalam menjaga mutu air dalam hal ini konduktivitas dan pH dari air tersebut. Batas maksimum konduktivitas air dalam hal ini ditetapkan sebesar 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sedang pH antara 5,5 sampai 6,5.

Untuk mensirkulasikan air baik untuk penukar panas jenis *shell and tube* maupun jenis plat menggunakan pompa. Dua buah pompa dihubungkan dengan pesawat penukar panas *shell and tube*, dan satu buah pompa dihubungkan ke pesawat penukar panas plat serta dua buah menara pendingin. Saat menggunakan pesawat penukar panas *shell and tube* maka sistem sekunder dilayani oleh dua pompa yang dioperasikan secara bergantian. Demikian juga menara pendingin dioperasikan secara bergantian.

Laju aliran air pendingin sekunder bisa mencapai 520 lpm (137 gpm) jika memakai pesawat penukar panas plat sedang jika memakai pesawat penukar panas shell and tube sebesar 820 lpm (217 gpm). Berdasarkan hasil perhitungan, maka dengan laju alir air pendingin sebesar itu, sistem pendingin sekunder telah mampu mengambil panas dari reaktor hingga 250% lebih besar dari kebutuhan.

Tabel 3.4 dan Tabel 3.5 menunjukkan data karakteristik dari komponen menara pendingin dan pompa sekunder yang digunakan. Gambar 3.10 menunjukkan skema rangkaian dari sistem pendingin sekunder reaktor Kartini secara keseluruhan. Jika Gambar 3.9 dan Gambar 3.10 disatukan maka diperoleh gambar rangkaian sistem pendingin reaktor Kartini secara keseluruhan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.11.



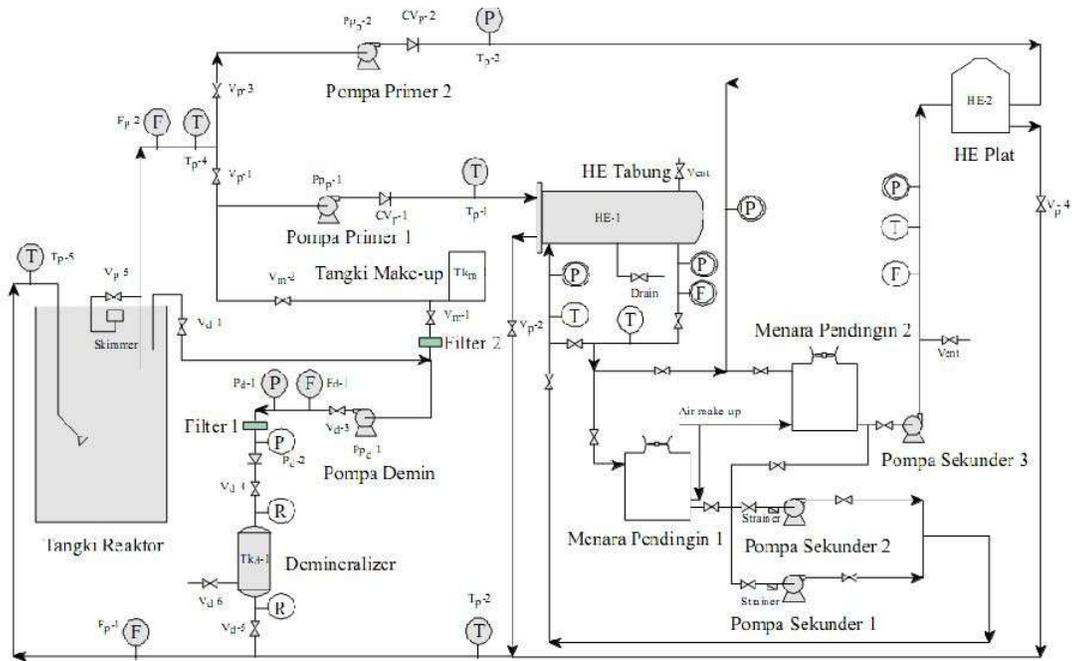
Gambar 3.10. Skema rangkaian sistem pendingin sekunder pada reaktor Kartini [4].

Tabel 3.4. Karakteristik dari Komponen Menara Pendingin [4].

Nama Komponen	Karakteristik	Keterangan
Menara Pendingin	Model : LBC - 80 Tinggi 1925 cm Diameter bak 2175 cm Pipa overflow 25 mm (1") Pipa inlet 4", outlet 4" Pipa drain 1" Automatic filler ¾" Quick filler 1" Aliran nominal 275 GPM Kapasitas 312 kkal/jam Berat kering 300 kg Berat operasi 700 kg	Jumlah : 2
Fan motor	Diameter kipas 46 " Power 2 HP Volum Udara 10900 cfm	Jumlah : 1 untuk setiap menara pendingin

Tabel 3.5. Karakteristik dari Komponen Pompa Sistem Pendingin Sekunder [4].

Nama Komponen	Karakteristik	Keterangan
Pompa Sekunder	Jenis : <i>Centrifugal</i> Merk : KSB Torishima Model : ETA 50 - 20 Seri : 76 F 135 Head : 47 - 58 m Putaran : 2900 rpm Debit : 25 – 68 m ³ /min	Jumlah : 2
Motor pompa	Merk : AEG Daya : 18,5 kW Phase : 3 Voltase : 380 V Arus : 36 A Cycle : 50 Hz Rpm : 2930	Jumlah : 2
Pompa Sekunder	Jenis : <i>Centrifugal</i> Merk : Ebara Model : ETA 50 - 20 Head : 47,5 m Putaran : 2950 rpm Debit : 0,417 m ³ /det	Jumlah : 1
Motor pompa	Merk : Hitachi Daya : 10 HP Phase : 3 Voltase : 220 / 380 V Arus : 24 A Cycle : 50 Hz Rpm : 2900	Jumlah : 1



Gambar 3.11. Skema rangkaian sistem pendingin reaktor Kartini [4].

H. Menara Pendingin (*Cooling Tower*)

Cooling tower atau menara pendingin adalah peralatan yang dipakai untuk membuang panas yang dikandung oleh air pendingin sekunder reaktor Kartini. Air pendingin sekunder digunakan untuk mendinginkan (menerima *transfer* panas) dari air pendingin primer yang ada di dalam tangki reaktor, di mana air tangki reaktor (ATR) menjadi panas akibat dari pelepasan energi pada saat terjadi reaksi pembelahan inti di dalam teras reaktor. Air pendingin sekunder semula berasal dari sumur dalam (*submersible*), namun karena kualitasnya kurang menguntungkan, untuk *make-up* diganti dengan air dari sumur dangkal menggunakan pompa sentrifugal.

Dalam instalasi *cooling tower* pada reaktor nuklir, fluida pendingin sekunder harus dijaga kandungan mineral yang ada di dalamnya. Kandungan mineral yang terlalu tinggi akan menimbulkan kerak pada sistem pemipaan dan penukar panas. Untuk penukar panas tipe plat, kerak akan cepat mempersempit celah di antara plat

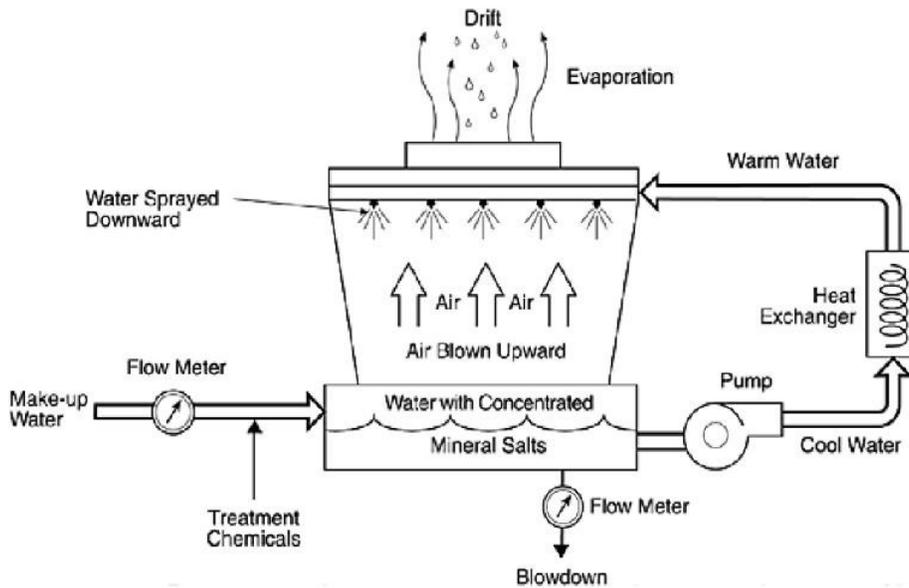
yang untuk mengalirkan fluida sehingga karakteristik aliran fluida akan berubah. Akibatnya jumlah panas yang dapat dipindahkan berkurang dan penurunan tekanan menjadi bertambah. Untuk mengatasi timbulnya kerak, air pendingin sekunder harus dijaga supaya mineral yang dapat menyebabkan pengerasan dapat dikurangi. Untuk pendinginan pendingin sekunder menggunakan 2 (dua) *cooling tower* dengan merk Liang Ho tipe LBT 350. Adapun data spesifikasi teknisnya ditunjukkan pada Tabel 3.6. *Cooling Tower* ini berhubungan langsung dengan udara lingkungan sehingga lebih mudah kotor atau kemasukan benda-benda yang dapat mengganggu sistem pendingin reaktor. Pada umumnya instalasi *cooling tower* ditunjukkan pada Gambar 3.12. Didasarkan pada instalasi tersebut proses pendinginan terjadi 2 cara yaitu secara perpindahan panas konveksi dan penguapan sehingga membutuhkan panas laten. Untuk perpindahan panas secara konveksi sangat ditentukan oleh koefisien perpindahan panas konveksi, suhu udara lingkungan (suhu bola kering/*dry bulb temperature*) dan luas kontak antara air dan udara.

Tabel 3.6. Data spesifikasi teknis *Cooling Tower* reaktor Kartini [9].

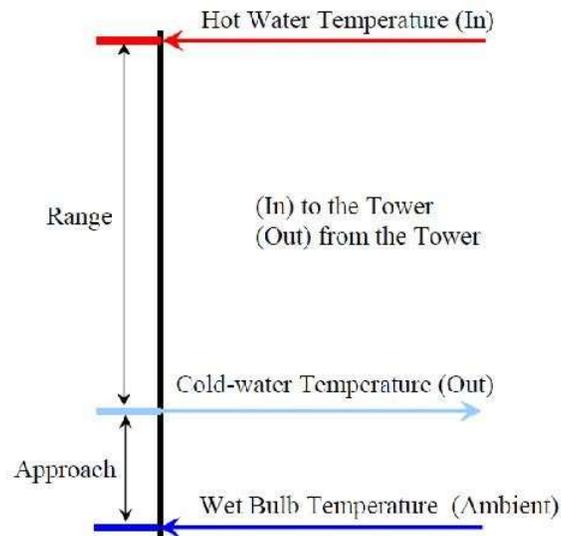
No	Besaran	Satuan
1	Kapasitas	: 350 ton refrijerasi
2	Tinggi	: 3360 Mm
3	Diameter	: 4600 Mm
4	Daya motor	: 10 HP
5	<i>Head</i> untuk pompa	: 4,2 M
6	Debit air nominal	: 4500 liter/menit

Proses pendinginan karena penguapan sangat ditentukan oleh laju penguapan air di dalam *cooling tower*, kelembaban udara yang dapat diukur dengan suhu bola basah (*wet bulb temperature*) dan suhu bola kering (*dry bulb temperature*). Makin rendah kelembaban udara makin besar laju penguapan sehingga makin banyak panas laten yang diambil oleh air tersebut untuk penguapan atau makin besar

pendinginannya. Dari uraian tersebut suhu air keluar dari *coling tower* sangat dipengaruhi oleh kelembaban atau suhu bola basah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13.



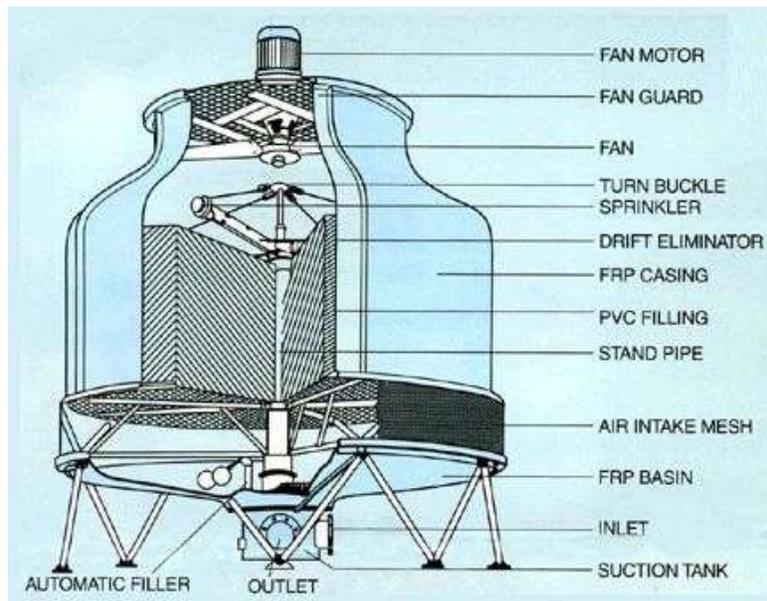
Gambar 3.12. Instalasi cooling tower [9].



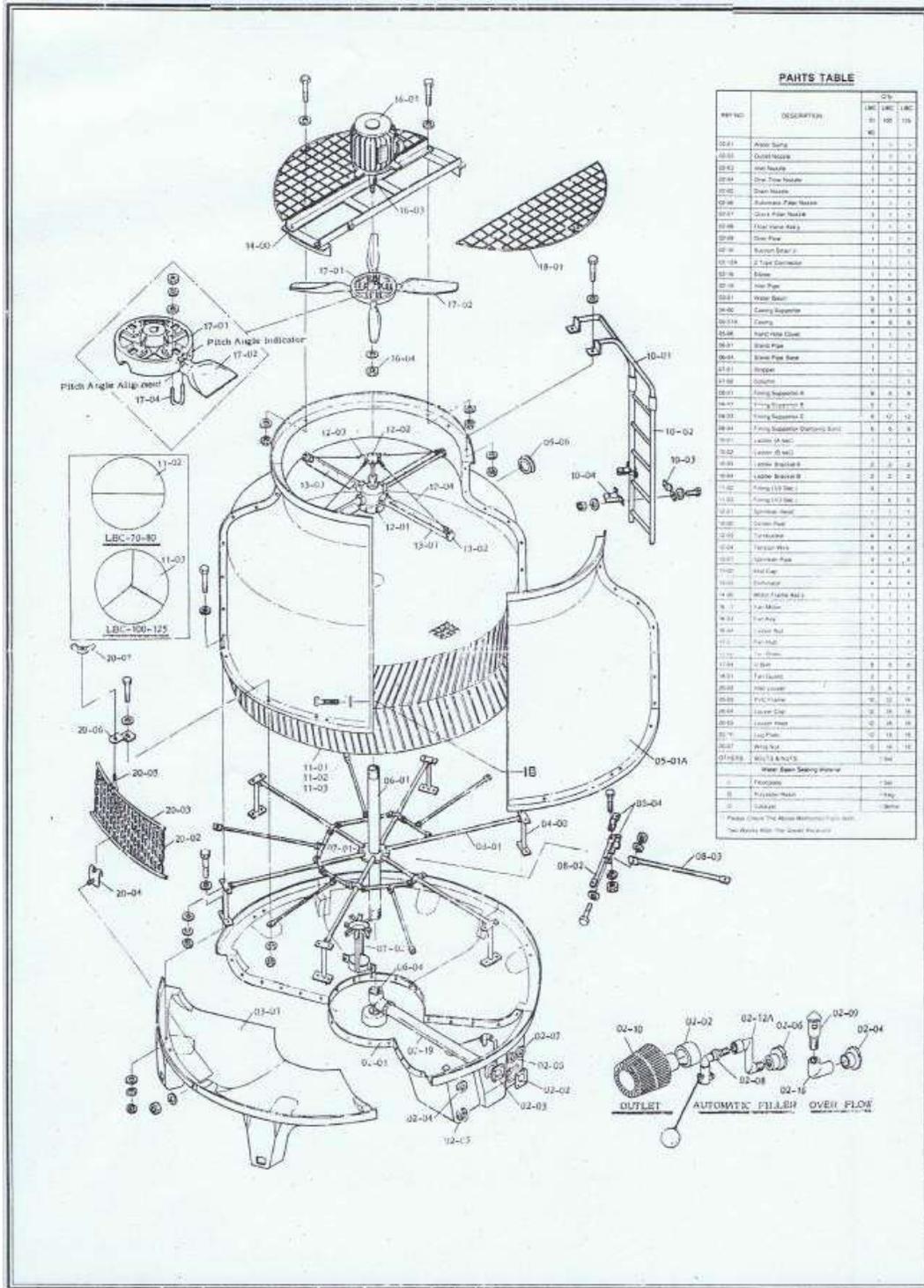
Gambar 3.13. Suhu air masuk dan keluar *cooling tower* serta suhu bola basah udara [10].

Jika di dalam HE dikenal NTU yang menunjukkan satuan pertukaran panas, maka di dalam *cooling tower* dikenal NDU (*number of diffusion unit*) yaitu bilangan yang menunjukkan baik dan tidaknya kondisi suatu *Cooling Tower* dan hal ini terkait dengan besarnya pertukaran panas seperti yang terjadi pada HE.

Cooling tower mempunyai beberapa bagian, susunan bagian-bagian dari *cooling tower* ini ditunjukkan pada Gambar 3.14 (gambar potongan) dan rincian detilnya pada Gambar 3.15 (gambar bagian-bagian *cooling tower* dilepas).



Gambar 3.14. Gambar potongan *cooling tower* untuk menunjukkan bagian-bagiannya [9].



Gambar 3.15. Rincian detil bagian-bagian cooling tower [9].

I. Sistem Moderasi

Moderasi yang dipergunakan di dalam reaktor Kartini ada 2 (dua), yaitu : UZrH yang berada di dalam bahan bakar dan air pendingin primer. Unsur hidrogen (H) di dalam bahan bakar dan air pendingin primer berfungsi sebagai moderator, yaitu menurunkan energi neutron yang dihasilkan dari reaksi fisi, sehingga diperoleh neutron termal yang diperlukan untuk reaksi fisi selanjutnya. Berdasarkan karakteristik dari UZrH maka bahan bakar reaktor Kartini memiliki sifat keselamatan melekat (*inherm safety*) yang tinggi; yaitu apabila suhu bahan bakar naik, maka densitas atom hidrogen di dalam bahan bakar berkurang, yang berdampak pada penurunan reaktivitas reaktor. Kondisi ini dapat membantu mencegah terjadinya pemanasan yang berlebihan yang dapat merusak kelongsong.

J. Sistem Pendingin Teras Darurat (SPTD)

Pada reaktor Kartini tidak dilengkapi dengan sistem pendingin teras darurat (*emergency core cooling system*). Kondisi darurat yang terparah adalah bila terjadi kehilangan air pendingin, akibat adanya kebocoran pada sistem pendingin primer atau tangki reaktor. Beberapa pertimbangan teknis memungkinkan untuk meniadakan perlunya sistem pendingin teras darurat (SPTD) pada reaktor Kartini, antara lain:

1. Sistem *shutdown* mampu melakukan pemadaman secara cepat.
2. Sistem katup pada sistem pendingin primer dapat secara efektif mengatasi terjadinya kebocoran pada sistem perpipaan.
3. Tingkat daya reaktor yang relatif kecil.
4. Reaktivitas lebih teras yang relatif kecil.
5. Sifat *inherm safety* yang sangat baik dari bahan bakar UZrH yang digunakan.

K. Sistem Pembuangan Panas Peluruhan

Sesaat setelah reaktor dipadamkan (*shutdown*) maka masih tersisa panas peluruhan dari teras sekitar 5 – 6 % dari daya nominal. Untuk membuang panas peluruhan tersebut, maka setelah reaktor *shut-down*, sistem pendingin primer dan sekunder masih tetap dihidupkan sekurang-kurangnya selama 30 menit agar panas peluruhan yang timbul bisa diambil oleh air pendingin dan dibuang ke lingkungan.

DAFTARPUSTAKA

- [1] Simnad T. The U-Zrh Alloy: Its Properties and Use in TRIGA Fuel, August 1980 n.d.
- [2] ----- . Nuclear Power Reactor Safety, EE Levis, WILEY-INTERSCIENCE PUBLICATION, John Wilwey & SONS, Ney York, 1977 n.d.
- [3] ----- . TRIGA Reactor Characteristics, Technical data of a typical TRIGA MarkII reactor, IAEA,[http://ansn.iaea.org/Common/documents/Training/TRIGA Reactors](http://ansn.iaea.org/Common/documents/Training/TRIGAReactors) n.d.
- [4] ----- . Dokumen Laporan Analisa Keselamatan (LAK) reaktor Kartini 2008. n.d.
- [5] Yunus A C. Heat Transfer, A Practical Approach. Second. 2002.
- [6] Kesco BH. Heat Exchangers, Queens University 2007.
- [7] ----- . Funke Heat Exchangers, Shell and Tube Heat Exchangers n.d.
- [8] ----- . Alfa Laval heat exchangers, Plate heat exchangers, The theory behind heat transfer n.d.
- [9] ----- . LBCs 3-1000 Assembly Instructions n.d.
- [10] <http://myhome.hanafos.com/~criok/english/publication/thermal/thermallisteng.html> n.d.