

## **BAB II**

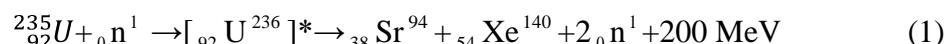
### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. Landasan Teori**

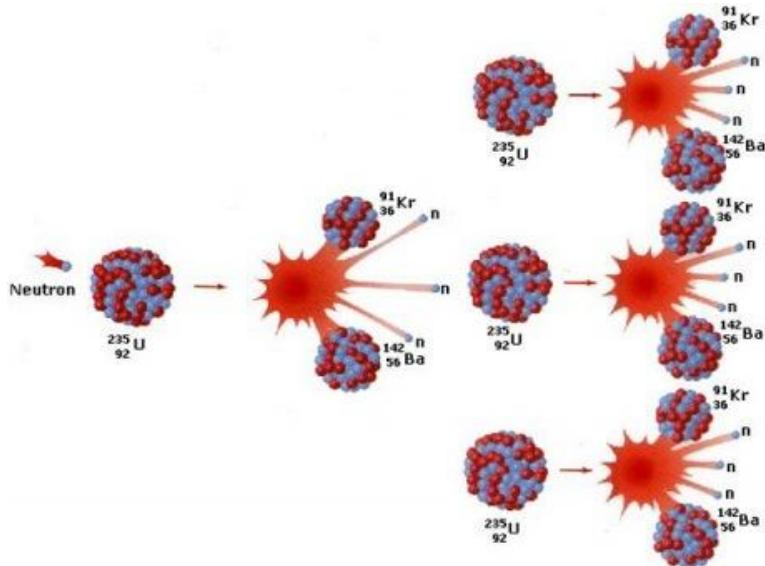
Reaktor nuklir merupakan tempat berlangsungnya reaksi fisi yang dihasilkan dari interaksi neutron dengan  $^{235}_{92}U$ . proses fisi diawali dari gerakan neutron termal menumbuk inti  $^{235}_{92}U$  yang menyebabkan inti atom menjadi tidak stabil dan kehilangan bentuknya, kemudian membelah menjadi unsur-unsur yang lebih kecil sambil melepaskan tenaga dalam bentuk panas dan membebaskan 2-3 neutron baru.

##### **1. Reaksi fisi**

Reaksi fisi terjadi antara neutron dengan inti uranium sehingga terjadi fragmen inti-inti atom disertai pembebasan energi. Energi pembelahan dari satu inti atom  $^{235}_{92}U$  adalah sekitar 200 MeV. Neutron-neutron baru hasil fisi mengalami proses perlambatan dalam media moderator dan menjadi neutron termal. Sebagian inti majemuk yang dihasilkan pada reaksi pembelahan bersifat tidak stabil dan mengalami peluruhan radioaktif menuju inti yang lebih stabil. Contoh reaksi fisi nuklir dan gambar reaksi fisi sebagai berikut:



Pada gambar berikut disajikan reaksi fisi



Gambar 1. Reaksi fisi  
(sumber: Fendy Sutrisna, 2009: 27)

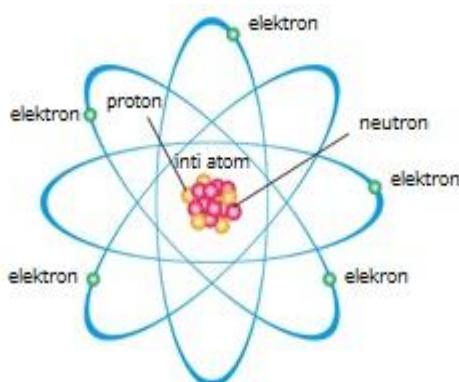
## 2. Reaksi fisi berantai

Proses yang terjadi pada reaksi fisi berantai adalah inti  $^{235}_{92}U$  menangkap neutron kemudian membelah menjadi inti baru sambil melepaskan energi dan 3 neutron baru, neutron baru mengalami proses moderasi di dalam moderator menjadi neutron termal. Neutron tersebut berdifusi dalam medium bahan bakar sebelum mengalami kemungkinan bereaksi dengan inti  $^{235}_{92}U$  lainnya.

Pada setiap reaksi fisi dihasilkan dua inti baru, dua atau tiga neutron baru dan sejumlah energi panas. Inti-inti baru terbentuk besifat tidak stabil (radioaktif). Untuk menjadi stabil inti-inti tersebut meluruh dengan memancarkan sinar-sinar maupun partikel. Inti-inti baru yang muncul sebagai

hasil fisi ini disebut petilan fisi (fragmen fisi) dan biasanya mempunyai ukuran tidak sama.

Pemodelan atom dilakukan pertama kali oleh Rutherford dan Bohr sekitar abad ke 20. Secara teori dan eksperimen yang dilakukan Rutherford dan Bohr menunjukkan bahwa atom disusun dari inti atom dan kulit atom. Kulit atom merupakan elektron (simbol e) yang menunjukkan sifat dari elemen. Sedangkan dalam inti terdapat proton (simbol p) dan neutron (simbol n). Umumnya semua massa atom terkonsentrasi dalam inti. Masa elektron kira-kira 1/2000 massa proton. Antara inti (proton) bermuatan positif dan elektron bermuatan negatif bekerja gaya coulomb (Arthur. dkk, 2000: 119) seperti tampak gambar model atom dibawah ini:



	Jumlah Proton	Jumlah Neutron	Jumlah Inti	% ketersediaan
Uranium 234	92	142	234	0.0055%
Uranium 235	92	143	235	0.7200%
Uranium 238	92	146	238	99.2745%

Gambar 2. Struktur atom (sumber: Fendy Sutrisna, 2009: 29)

Di bawah ini merupakan tabel sifat partikel elementer (massa dan muatan penyusun atom):

Tabel 1. Sifat partikel elementer

Partikel	Massa (g)	Muatan (C)
Proton ( $p$ )	$1,6726 \times 10^{-24}$ (1,007277) sma	$1,6 \times 10^{-19}$
Neutron ( $n$ )	$1,6749 \times 10^{-24}$ (1,008655) sma	0
Elektron ( $e$ )	$9,11 \times 10^{-31}$ (0,000548) sma	$-1,6 \times 10^{-19}$

$$1 \text{ sma} = 1,66 \times 10^{-24} \text{ g}, \text{ dalam satuan energy } 1 \text{ sma} = 931,478 \text{ MeV.}$$

Suatu inti dicirikan oleh  ${}^A_Z X$ , dengan X adalah nama elemen, A adalah nomer massa (jumlah proton dan neutron) dan Z adalah nomor atom (jumlah proton = jumlah elektron). Pada dasarnya massa atom terletak pada inti atomnya, di mana massa neutron lebih besar dari massa proton.

Proses reaksi fisi yang berlangsung tersebut akan menghasilkan panas yang sangat tinggi. Ada beberapa proses aliran panas pada proses tersebut antara lain: radiasi, konduksi, dan konveksi (Zuhrina.dkk, 2006: 2).

### 3. Perpindahan kalor

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan energi tidak dapat dimusnahkan. Energi hanya mengalami perubahan bentuk. Sebagai contoh energi gerak yang dilakukan oleh sebuah motor dapat berubah menjadi kalor, dan sebagainya. Dalam hal ini perpindahan kalor dapat melalui 3 cara, yaitu:

### a. Pancaran (Radiasi)

Pancaran (radiasi) adalah perpindahan kalor melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain. Semua benda memancarkan kalor. Keadaan ini baru terbukti setelah suhu meningkat. Pada hakikatnya proses perpindahan kalor radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet.

Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media pengantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan), dan absorpsi (diserap) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, sebagai contoh memantulkan sebagian besar radiasi yang jatuh padanya, sedangkan permukaan yang berwarna hitam dan tidak mengkilap akan menyerap radiasi yang diterima dan diubah menjadi kalor. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari.

Menurut hukum Stefan Boltzmann tentang radiasi panas berlaku hanya untuk benda hitam, bahwa kalor yang dipancarkan (dari benda hitam) dengan laju yang sebanding dengan pangkat empat *temperature absolute* benda itu dan sebanding dengan luas permukaan benda. (McCabe, 1993: 142)

$$q = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (2)$$

dimana:  $q = \text{pancaran}$

$\sigma = \text{konstanta proporsionalitas (tetapan Stefan Boltzmann)}$

$$\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$A = \text{luas permukaan bidang benda hitam}$

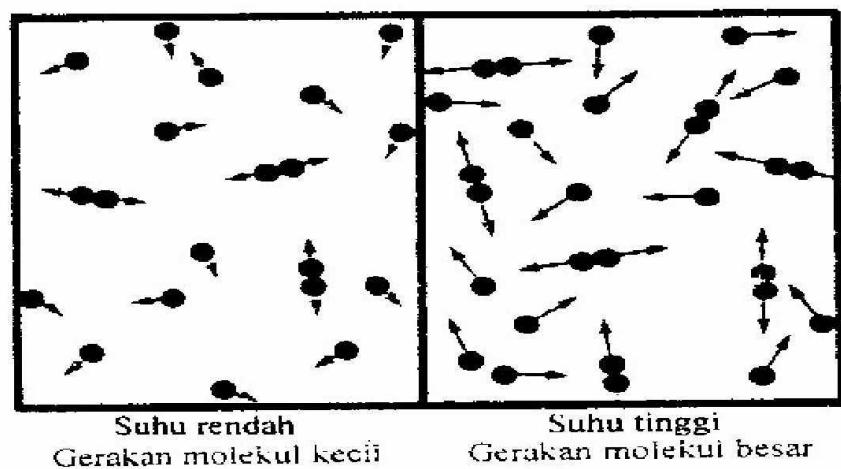
$T = \text{temperatur absolut benda hitam}$

### b. Hantaran (Konduksi)

Konduksi adalah peristiwa berpindahnya kalor melalui medium (zat perantara) tanpa disertai dengan perpindahan partikel medium tersebut.

Konduksi biasanya dapat terjadi pada zat padat seperti berbagai jenis logam dan gelas. Contohnya seperti ini, jika salah satu ujung logam dipanaskan maka ujung logam yang lain juga akan terasa panas karena kalor/panas merambat di dalam logam.

Konduksi *thermal* pada logam - logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi *thermal* yang mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul, seperti tampak pada gambar 4 dibawah ini.



Gambar 3. Pergerakan molekul yang sama dengan suhu beda  
(sumber: Rudi hartono, 2008: 3)

Contoh perpindahan kalor secara konduksi antara lain: perpindahan kalor pada logam cerek pemasak air atau batang logam pada dinding tungku. Laju perpindahan kalor secara konduksi sebanding dengan gradien suhu ( $q /A \sim T/x$ ) dan dengan konstanta kesetimbangan ( konduksi ) maka menjadi persamaan *Fourier*

$$q = - k A \cdot T/x \quad (3)$$

dimana;  $q$  = laju perpindahan kalor

$T/x$  = gradient suhu kearah perpindahan kalor

$k$  = konduktuvitas termal

$A$  = luas permukaan bidang hantaran

Tanda ( - ) digunakan untuk memenuhi hukum II Thermodinamika yaitu

“Kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur“

(Holman,1986: 132).

Penghantar yang buruk disebut isolator. Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor ialah koefisien konduksi termal. Apabila nilai koefisien ini tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat. Untuk bahan isolator, koefisien ini bernilai kecil. Pada umumnya, bahan yang dapat menghantar arus listrik dengan sempurna (logam) merupakan penghantar yang baik juga untuk kalor dan sebaliknya. Selanjutnya bila diandaikan sebatang besi atau sembarang jenis logam dan salah satu ujungnya diulurkan ke dalam nyala api, dapat diperhatikan bagaimana kalor dipindahkan dari ujung yang panas ke ujung yang dingin. Apabila ujung batang logam tadi menerima energi kalor dari api, energi ini akan memindahkan sebagian energi kepada molekul dan elektron yang membangun bahan tersebut. Molekul dan elektron merupakan alat pengangkut kalor di dalam bahan menurut proses perpindahan kalor konduksi. Dengan demikian dalam proses pengangkutan kalor di dalam bahan, aliran elektron akan memainkan peranan penting . Persoalan yang patut diajukan pada pengamatan ini ialah mengapa kadar alir energi kalor adalah berbeda. Hal ini disebabkan karena susunan molekul dan juga atom di dalam setiap bahan adalah berbeda. Untuk satu bahan berfasa padat molekulnya tersusun rapat, berbeda dengan satu bahan berfasa gas seperti udara. Molekul udara sangat renggang, tetapi dibandingkan dengan bahan padat seperti kayu, dan besi, maka molekul besi adalah lebih rapat

susunannya daripada molekul kayu. Bahan kayu terdiri dari gabungan bahan kimia seperti karbon, uap air, dan udara yang terperangkat. Besi adalah besi. meskipun ada bahan asing, bahan kimia unsur besi adalah lebih banyak.

**c. Aliran (Konveksi)**

Perpindahan panas secara konveksi adalah peristiwa berpindahnya kalor dalam suatu medium yang disertai dengan perpindahan partikel mediumnya. Sebagai contoh, suatu permukaan logam dengan fluida. Kalor yang dipindahkan secara konveksi dinyatakan dengan persamaan newton tentang pendinginan :

$$q = -h \cdot A \cdot \Delta T \quad (4)$$

dimana :  $q$  = kalor yang dipindahkan

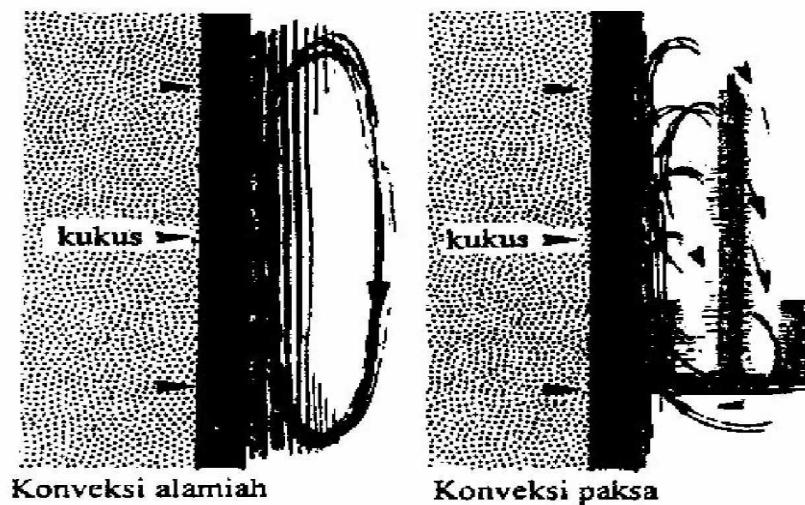
$h$  = koefisien perpindahan secara konduksi

$A$  = luas permukaan perpindahan panas

$T$  = temperatur

Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II thermodinamika, bahwa kalor mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah.

Perpindahan panas secara konveksi dapat dibagi menjadi 2 yaitu seperti pada gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Proses konveksi  
(sumber : Rudi hartono, 2008: 5)

### 1) Konveksi alamiah

Konveksi alamiah dapat terjadi karena adanya arus yang mengalir akibat gaya apung, sedangkan gaya apung terjadi karena perbedaan densitas. Perbedaan densitas disebabkan karena perbedaan suhu. Contoh konveksi alamiah yaitu aliran udara yang melewati radiator panas.

### 2) Konveksi paksa

Konveksi paksa terjadi karena arus yang digerakan oleh peralatan mekanik (pompa, kipas, dan lain-lain). Contoh konveksi secara paksa yaitu pemanasan air diikuti dengan pengadukan.

#### 4. Reaktor

Reaktor adalah suatu alat proses dimana terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia ataupun reaksi nuklir yang terkendali. Reaktor terbagi dalam dua jenis, yaitu reaktor nuklir fisi (pembelahan) dan reaksi fusi (penggabungan).

Semua proses reaksi akan berlangsung di dalam teras reaktor yang merupakan tempat berlangsungnya reaksi nuklir.



Gambar 5. Gedung Reaktor Kartini  
(sumber :wordpress.com)



Gambar 6. Teras Reaktor Kartini  
(sumber :wordpress.com)

Ada beberapa komponen Reaktor Kartini yang digunakan untuk menunjang pengoperasian, menurut syarif (1987: 36-49) komponen-komponen tersebut adalah:

**a. Bahan bakar nuklir/bahan dapat dibelah**

Bahan bakar nuklir adalah semua jenis material yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi nuklir, demikian bila dianalogikan dengan bahan bakar kimia yang dibakar untuk menghasilkan energi. Hingga saat ini, bahan bakar yang umum dipakai adalah unsur berat fissil yang dapat menghasilkan reaksi nuklir berantai di dalam reaktor nuklir. Bahan bakar nuklir dapat juga berarti material atau objek fisik, sebagai

contoh bundle bahan bakar yang terdiri dari batang bahan bakar yang disusun oleh material bahan bakar, bisa juga dicampur dengan material struktural, material moderator atau pemantul (*reflector*) neutron. Bahan bakar fissil sering digunakan adalah  $^{235}_{92}U$  dan  $^{239}_{94}Pu$ , dan kegiatan yang berkaitan dengan penambahan, pemurnian, penggunaan dan pembuangan dari material-material ini termasuk dalam siklus bahan bakar nuklir.

Tidak semua bahan bakar nuklir digunakan dalam reaksi fisi berantai. Sebagai contoh,  $^{239}_{94}Pu$ , dan beberapa unsur ringan lainnya digunakan untuk menghasilkan sejumlah daya nuklir melalui proses peluruhan radioaktif dalam generaor radiothermal, dan baterai atom. Isotop ringan seperti  $^3_1H$  (tritium) digunakan sebagai bahan bakar fusi nuklir. Bila melihat pada energi ikat pada isotop tertentu, terdapat sejumlah energi yang bisa diperoleh dengan memfusikan unsur-unsur dengan nomor atom lebih kecil dari besi, dan memfisikan unsur-unsur dengan nomor atom yang lebih besar dari besi.

Elemen bahan bakar dalam teras untuk mengatur daya yang diinginkan, dan terdapat tiga buah batang kendali yang mempunyai fungsi masing-masing sebagai pengatur, pengamanan dan kompensasi. Elemen bahan bakar ini memiliki kandungan uranium 8,5%-9% dengan pengkayaan  $^{235}_{92}U$  20 % menggunakan campuran zirconium hidrida (ZrH) dengan rasio 1,7 kandungan  $^{235}_{92}U$  dalam tiap bahan bakar bervariasi dari

37 gram sampai dengan 39 gram dan pada umumnya berat  $^{235}_{92}\text{U}$  dalam tiap elemen bakar adalah 38 gram. Posisi material tidak tercampur homogen pada elemen bahan bakar akan tetapi tersedia sebagai cakram yang berada pada persambungan bagian bawah antara batang grafit dan bahan bakar.

#### **b. Bahan moderator**

Dalam reaksi fisi neutron yang dapat menyebabkan reaksi pembelahan adalah neutron thermal. Neutron tersebut memiliki energi sekitar 0,025 eV pada suhu 27 °C, sementara neutron yang lahir dari reaksi pembelahan memiliki energi rata-rata 2 MeV, yang sangat jauh lebih besar dari energi thermalnya. Syarat bahan moderator adalah atom dengan nomor massa kecil. Namun demikian syarat lain yang harus dipenuhi adalah: memiliki tampang lintang serapan neutron (keboleh-jadian menyerap neutron) yang kecil, memiliki tampang lintang hamburan yang besar dan memiliki daya hantaran panas yang baik, serta korosif.

Contoh bahan moderator:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ , grafit, berilium (Be) dan lain-lain.

#### **c. Pendingin reaktor**

Pendingin reaktor berfungsi sebagai sarana pengambilan panas hasil fisi dalam elemen bakar untuk dipindahkan/dibuang ketempat lain/lingkungan melalui penukar panas (H.E) sesuai fungsinya maka bahan yang baik sebagai pendingin adalah fluida yang koefisien

perpindahan panasnya sangat bagus. Persyaratan lain yang harus dipenuhi agar tidak terganggu kelancaran reaksi proses fisi pada elemen bakar adalah pendingin, pendingin juga harus memiliki tampang lintang serapan neutron yang kecil, dan tampang lintang hamburan yang besar serta tidak korosif. Contoh fluida-fluida yang biasa dipakai sebagai pendingin adalah  $H_2O$ ,  $D_2O$ , Na cair dan gas He dan lain-lain.

Di dalam sistem pendingin reaktor ada dua sistem pendingin yaitu sistem pendingin primer yang berinteraksi langsung dengan teras reaktor dan sistem pendingin sekunder yang berinteraksi dengan menara pendingin.

### **1) Sistem pendingin primer**

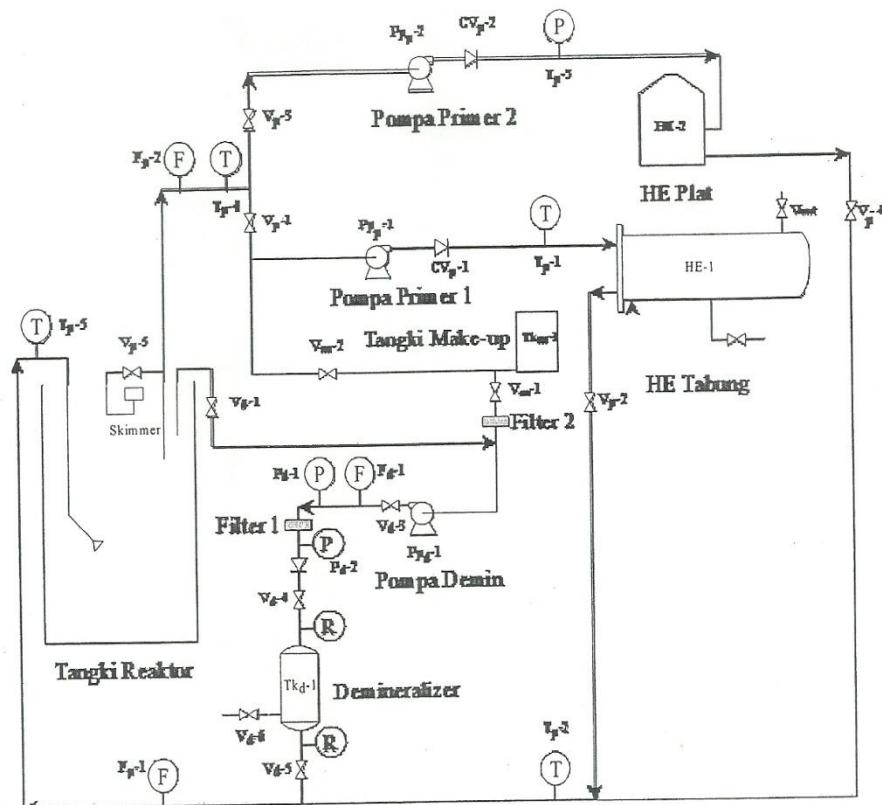
Sebagai medium pembawa panas pada sistem pendingin primer reaktor, maka digunakan air bebas mineral yang berasal dari sistem penghasil air bebas mineral. Penanganan terhadap kualitas air pendingin primer sangat perlu diperhatikan. Penanganan ini bertujuan untuk menjaga agar spesifikasi kualitas air pendingin primer tetap terjaga. Metode yang digunakan adalah secara kontinyu air pendingin primer dilewatkan pada sistem purifikasi (pemurnian) yang terdiri dari filter mekanis dan filter penukar ion dan dilakukan secara rutin seminggu sekali dilakukan pengukuran pH, konduktivitas dan perlakuan kimia yang berupa pengganti anresin penukar ion pada sistem purifikasi (pemurnian).

Untuk mengetahui kejenuhan resin penukar ion pada sistem purifikasi (pemurnian) dipasang instrumentasi pengukuran beda tekanan dan tingkat radioaktivitas air kolam. Apabila resin penukar ion tersebut telah jenuh, maka diganti dengan resin baru dan tidak dilakukan regenerasi, karena resin yang telah jenuh menjadi aktif. Pada proses purifikasi (pemurnian) air, pada prinsipnya adalah reaksi pertukaran ion dimana ion yang tidak dikehendaki diambil (dipindah) oleh resin penukar ion dari aliran air tersebut.

Resin adalah senyawa hidrokarbon terpolimerisasi sampai tingkat yang tinggi yang mengandung ikatan-ikatan hubung silang (*cross-linking*) serta gugusan yang mengandung ion-ion yang dapat dipertukarkan. Berdasarkan gugus fungsionalnya, resin penukar ion terbagi menjadi dua yaitu: resin penukar kation dan resin penukar anion.

Volume air pendingin primer total yang telah diketahui adalah sebesar primer total yaitu  $330\text{ m}^3$ , dengan rincian  $220\text{ m}^3$  volume kolam Reaktor Kartini,  $80\text{ m}^3$  volume *delay chamber* dan  $30\text{ m}^3$  pada sistem pemipaan. Pada sistem pendingin primer semua pipa yang berada di dalam kolam terbuat dari bahan  $\text{AlMg}_3$  dan yang berada di luar kolam terbuat dari bahan *stainless steel* begitu juga pipa dan katup di dalam gedung reaktor, terbuat dari *stainless steel*. Kehilangan air

pendingin sebagian besar akibat adanya penguapan, level permukaan air di tangki reaktor dikontrol dan jika kurang di tambah dari air *make-up*, air pendingin yang berada di dalam tangki reaktor perlu ditambah secara periodik, karena akan berkurang akibat adanya penguapan air yaitu sekitar 10-60 liter perbulan. Penambahan air dilakukan secara manual dengan menggunakan pompa air dari tangki *make-up* ke tangki reaktor.



Gambar 7. Diagram alir sistem pendingin primer  
(sumber : Sutjipto)

Sistem pendingin primer ini mampu memindahkan panas yang dihasilkan di dalam teras reaktor yang beroperasi 100 kW sesuai desain, dengan perhitungan sebagai berikut:

$$Q = m c_p \Delta T \quad (5)$$

dengan  $Q$  = kalor persatuan waktu yang dihasilkan di dalam reaktor,

J/s atau watt

$m$  = laju massa pendingin, kg/s

$c_p$  = panas jenis pendingin, watt s/g/ °K

$\Delta T$  = perubahan suhu pendingin keluar dan masuk teras, °C

Di bawah ini merupakan tabel spesifikasi dari sistem pendingin primer

Tabel 2. Spesifikasi sistem pendingin primer

No	Nama	Spesifikasi	Keterangan
1	Alat Penukar Panas <i>Shell and tube</i>	Kapasitas 250 kW Shell terbuat dari besi Ds 392 cm Tube terbuat dari SS Jumlah tube 144 Dot 19,09 cm D <sub>IT</sub> 16,74 cm Jumlah baffle 16	Jumlah: 1
2	Alat Penukar Panas <i>Plate</i>	Kapasitas 250 kW Bahan: SS Jumlah plate 75 Pass 1 Luas permukaan 6,17 m <sup>2</sup> Tebal plate 6,10 m	Jumlah: 1
3	Pompa Primer	Centrifugal self priming Merk: Flowmax 10 Model: 26006 Seri: 76 F 135	Jumlah: 2

4	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
5	Flowmeter	Merk: GF Signet Type: turbin Signal berupa frekuensi	Jumlah: 2, satu intlet HE Shell and tube, satunya inlet HE plate Bisa dimonitor di computer
6	Termometer	Merk: Sika Isian: alkohol Range: 0-100°C	Jumlah: 4 Masing-masing inlet dan outlet HE
7	Termometer	Type RTD Range: 0-300°C	Jumlah: 4 Masing-masing inlet dan outlet HE Bisa dimonitor di computer
8	Barometer	Type: pegas	Jumlah: 4 Masing-masing inlet dan outlet HE
9	Demineralizer	Merk:RM THOMAS Co Industrial Water Tangki SS Volume: 200 L Isi: resin IRN-150	Jumlah: 1
10	Pompa Demineralizer	Merk: Luitweler Type: sentrifugal	Jumlah: 1
11	Motor Pompa Demin	Daya: 2 HP Voltase: 230/115 Amper: 9,6/19 RPM: 2850 Phase: 1 Frekuensi: 50 Hz	Jumlah: 1

		Type: CP	
12	Panel Demineralizer	Konduktometer: 3 K-cm s/d ~ K-cm Flow meter: 0-60 GPM Barometer: 0-60 psi di inlet dan outlet filter	Jumlah: 1

## 2) Sistem pendingin sekunder

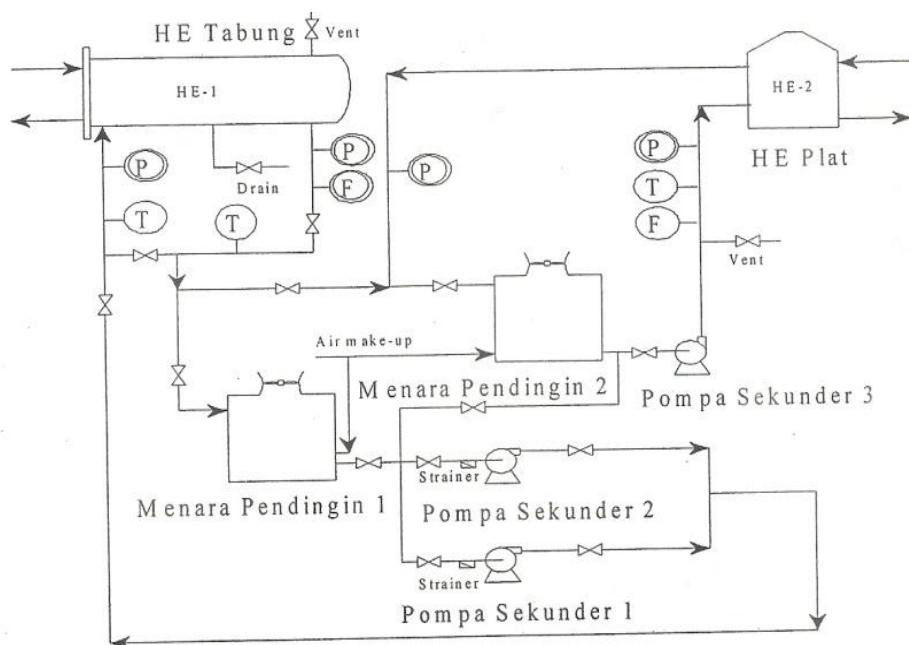
Penanganan kualitas air pendingin sekunder bertujuan untuk menjaga agar spesifikasi kualitas air pendingin sekunder tetap terpenuhi sehingga dapat menekan permasalahan yang biasa timbul pada air pendingin sekunder yaitu terjadinya korosi, timbulnya kerak dan adanya lumut/mikroorganisme. Metode yang dilakukan adalah dengan cara pengukuran terhadap pH, konduktivitas dan kandungan unsur-unsur kimia secara rutin seminggu sekali dan dilakukan perlakuan kimia yang berupa penambahan bahan kimia tertentu seperti Nalco 23226 untuk menghambat korosi dan Nalco 2593, Nalco 2890 dan NaOCl 12% untuk membersihkan lumut. Untuk penanganan masalah kerak di lakukan dengan menggunakan bola-bola karet yang di lewatkan dalam pipa. Pada sistem pendingin reaktor sekunder, pipa yang berada di dalam kolam terbuat dari *stainless steel*. Pipa dan katup yang berada di luar gedung reaktor terbuat dari *carbon steel* sedangkan pipa dan katup yang berada di dalam gedung reaktor terbuat dari *stainless steel*.

Di bawah ini merupakan tabel karakteristik pipa pendingin sekunder

Tabel 3. Karakteristik pipa sistem pendingin sekunder

<b>Karakteristik</b>	
Material	Besi baja
Diameter luar pipa (mm)	137
Ketebalan pipa (mm)	5
Yields stress (N/mm <sup>2</sup> )	236

Kedua sistem pendingin tersebut dialirkan dalam pipa-pipa yang telah dirancang kemudian terjadi pertukaran panas antara sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder melalui perangkat penukar panas (*heat exchanger*) tipe tabung. Berikut gambaran sistem pendingin sekunder reaktor :



Gambar 8. Diagram alir pendingin sekunder (sumber: Sutjipto)

Menara pendingin (*cooling tower*) digunakan sebagai media pembuangan panas hasil reaksi nuklir yang terjadi. Metode yang digunakan adalah dengan menghamburkan air yang keluar dari penukar panas (*heat exchanger*) pada sistem pendingin sekunder ke lingkungan kemudian kembali masuk ke dalam penukar panas (*heat exchanger*).

Pada tabel di bawah ini dapat ditunjukkan beberapa komponen pada sistem pendingin sekunder.

Tabel 4. Data komponen pendingin sekunder

Sistem	Tipe Komponen	Spesifikasi	Jumlah Komponen
PENDINGIN SEKUNDER	PIPA LURUS	5 in	11
		2,5 in	10
		2 in	1
	Elbow 90	5 in	22
		2.5 in	13
		2 in	4
		1 in	2
	Flens	5 in	76
		3 in	8
		2,5 in	2
		2 in	8
	Cek valve	5 in	2
	Gate valve	5 in	10
	Bellow	5 in	4
		2 in	2
		2 in	4
		1 in	1
	Ball valve	1 in	1
	Sensor temperature	(0-100)°C	4
	Centr. Pump		3
	Cooling tower		2

#### **d. Perangkat batang kendali**

Batang kendali berfungsi sebagai pengendali jalannya operasi reaktor agar laju pembelahan/populasi neutron di teras reaktor dapat diatur sesuai dengan kondisi operasi yang dikehendaki, selain itu, batang kendali juga berfungsi untuk memadamkan reaktor atau menghentikan reaksi pembelahan. Sesuai dengan fungsinya, bahan batang kendali adalah material yang mempunyai tampang lintang serapan neutron yang sangat besar, dan tampang hamburan yang kecil. Bahan-bahan yang sering dipakai adalah: boron, cadmium, godalinium dan lain-lain. Bahan-bahan tersebut biasanya dicampur dengan bahan lain agar diperoleh sifat yang tahan radiasi, titik leleh yang tinggi dan tidak korosif.

Prinsip kerja pengaturan operasi adalah dengan cara memasukkan dan mengeluarkan batang kendali dari teras reaktor. Jika batang kendali dimasukkan, maka sebagian besar neutron akan tertangkap olehnya, yang berarti populasi neutron di dalam reaktor akan berkurang dan kemudian padam. Sebaliknya jika batang kendali dikeluarkan dari teras reaktor, maka populasi neutron akan mencapai jumlah tertentu. Pertambahan/penurunan populasi neutron berkaitan langsung dengan perubahan daya reaktor.

### e. Perangkat detektor

Detektor adalah komponen penunjang yang mutlak diperlukan dalam reaktor nuklir. Semua informasi tentang kejadian fisis di dalam teras reaktor, yang meliputi popularitas neutron, laju pembelahan, suhu dan lain-lain, hanya dapat dilihat melalui detektor yang dipasang di dalam teras reaktor.

### f. Reflektor

Neutron yang keluar dari pembelahan bahan fisil, berjalan dengan kecepatan tinggi ke segala arah, karena sifatnya yang tidak bermuatan listrik maka gerakannya bebas menembus medium dan tidak berkurang bila tidak menumbuk suatu inti atom medium. Karena sifatnya tersebut, sebagian neutron tersebut dapat lolos keluar teras reaktor dan hilang dari sistem. Keadaan ini secara ekonomi berarti kerugian karena neutron tersebut tidak dapat digunakan untuk proses fisi berikutnya.

Untuk mengurangi kejadian ini, maka di sekeliling teras reaktor dipasang bahan pemantul neutron yang disebut reflector, sehingga neutron-neutron yang lolos akan bertahan dan dikembalikan ke dalam teras reaktor untuk dimanfaatkan lagi ada proses fisi berikutnya.

Bahan-bahan reflector yang baik adalah unsur-unsur yang mempunyai tampang lintang hamburan neutron yang besar, dan tampang lintang serapan yang sekecil mungkin serta tidak korosif. Bahan-bahan yang sering digunakan antara lain:berilium, grafit, paraffin, air, D<sub>2</sub>O.

### **g. Perangkat bejana dan perisai reaktor**

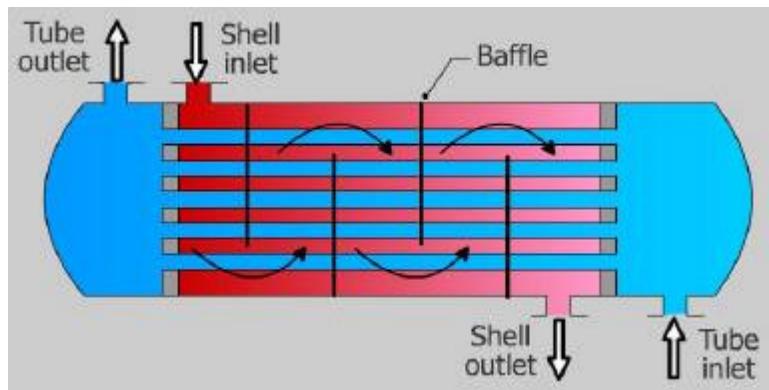
Bejana/tangki reaktor berfungsi untuk menampung fluida pendingin agar teras reaktor selalu terendam di dalamnya. Bejana tersebut selain harus kuat menahan beban, maka harus pula tidak korosif bila berinteraksi dengan pendingin atau benda lain di dalam teras, bahan yang bisa digunakan adalah: alumunium dan *stainless stell*.

Perisai reaktor berfungsi untuk menahan/menghambat/menyerap radiasi yang lolos dari teras reaktor agar tidak menerobos keluar sistem reaktor. Kerena reaktor adalah sumber radiasi yang sangat potensial, maka diperlukan suatu sistem perisai yang mampu menahan semua jenis radiasi tersebut, pada umumnya perisai yang digunakan adalah lapisan beton berat.

### **h. Penukar panas tipe tabung (*heat exchanger*)**

Bila media yang mengandung limbah panas adalah cairan atau uap yang memanaskan cairan lainnya, maka harus digunakan penukar panas jenis *shell and tube* karena kedua jalur harus ditutup rapat untuk mendapatkan tekanan fluida masing-masing. *Shell* terdiri dari sekumpulan pipa, dan biasanya terdapat *baffle* di dalamnya, untuk mengarahkan fluida dalam *shell* melewati pipa berkali-kali. *Shell* lebih lemah dari pada *tube*, sehingga fluida yang bertekanan tinggi disirkulasikan dalam *tubes* sementara fluida yang bertekanan rendah mengalir melalui *shell*. Bila uap yang mengandung limbah panas, biasanya mengembun, menyerahkan panas latennya ke cairan yang sedang dipanaskan, maka uap harus melewati *shell*. Jika diusahakan

kebalikannya, pengembunan uap didalam pipa paralel yang berdiameter kecil akan menyebabkan ketidakstabilan aliran. Penukar panas *tube and shell* tersedia dalam berbagai ukuran standar dengan banyak ragam kombinasi *tubes* dan *shellnya*. Penukar panas *shell and tube* digambarkan dalam Gambar di bawah ini.



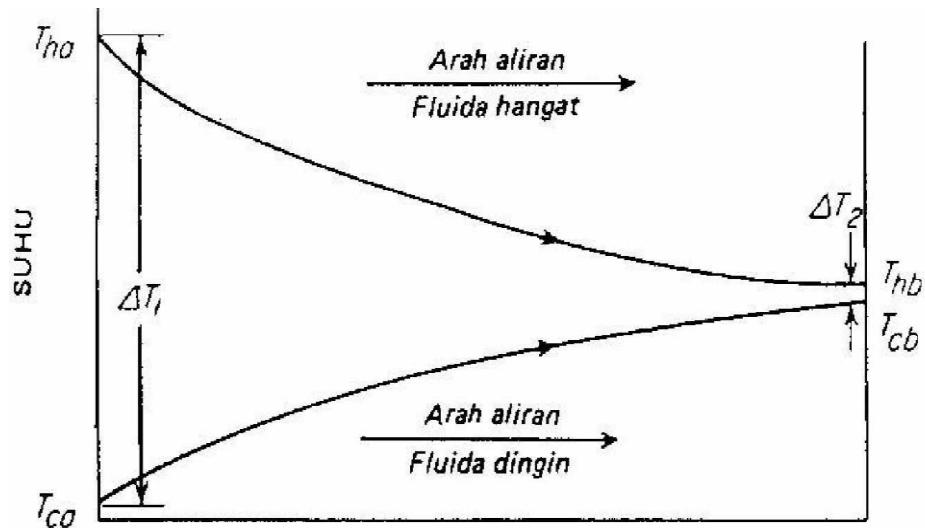
Gambar 9. Penukar Panas jenis *Shell & Tube*  
(Sumber: King Fahad University of Petroleum & Minerals, 2003)

Untuk koefisiensi perpindahan panas secara menyeluruh dapat dikaji dengan cara menentukan perpindahan kalor yang terjadi pada suatu dinding logam antara fluida panas pada satu sisi dan fluida dingin pada sisi lain dengan pengaliran konveksi paksa.

Pertukaran panas yang terjadi adalah pertukaran secara tidak langsung, ini berdasarkan alirannya dapat dibedakan menjadi: (Hartono: 2008: 6)

- 1) Pertukaran panas dengan aliran searah (*co-current/parallel flow*), pertukaran jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk pada sisi yang

sama, mengalir dengan arah yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula.



JARAK DARI LUBANG MASUK FLUIDA DINGIN →

Gambar 10. Aliran temperatur dengan aliran searah

Dengan asumsi nilai kapasitas panas spesifik ( $cp$ ) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas pada lingkungan serta keadaan *steady state*, maka besarnya kalor yang dipindahkan :

$$Q = U.A.T_{LMTD} \quad (6)$$

Dimana

$U$  = koefisien perpindahan panas secara keseluruhan ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$A$  = luas perpindahan panas ( $\text{m}^2$ )

$T_{LMTD} = \log \frac{T_{ha} - T_{ca}}{T_{hb} - T_{cb}}$

Perbedaan suhu antara fluida panas dan dingin bervariasi diantara inlet dan outlet, dan terlebih dahulu harus menentukan nilai rata-rata untuk dapat digunakan pada persamaan (8), panas ditransfer melalui sebuah elemen luas  $dA$ , dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dQ = -m_h c_h dT_h = m_c c_c dT_c \quad (7)$$

Dimana  $h$  dan  $c$  mengidentifikasi pada fluida panas dan fluida dingin secara berurutan. Transfer panas juga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dQ = U(T_h - T_c)dA \quad (8)$$

Berdasarkan persamaan (6) secara aljabar dapat dituliskan sebagai berikut:

$$dT_h = \frac{-dQ}{m_h c_h} \quad (9)$$

dan

$$dT_c = \frac{dQ}{m_c c_c} \quad (10)$$

Dimana  $LMTD$  menunjukkan laju aliran massa dan  $c$  adalah panas jenis fluida.

Berdasarkan selisih persamaan (8) dan (9) maka diperoleh:

$$\begin{aligned} dT_h - dT_c &= d(T_h - T_c) \\ &= -dQ \left( \frac{1}{m_h c_h} - \frac{1}{m_c c_c} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (8) ke dalam persamaan (11) maka diperoleh:

$$\begin{aligned} dT_h - dT_c &= -U(T_h - T_c) \left( \frac{1}{m_h c_h} - \frac{1}{m_c c_c} \right) dA \\ d \frac{(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} &= -U \left( \frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c} \right) dA \end{aligned} \quad (12)$$

Persamaan differnsial ini lalu dapat diintegralkan antara batas 1 dan 2 hasilnya adalah:

$$\ln \frac{(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} = -UA \left( \frac{1}{m_h c_h} + \frac{1}{m_c c_c} \right) \quad (13)$$

Kembali ke persamaan (7), hasil dari  $m_c c_c$  dan  $m_h c_h$  dapat dituliskan dalam bentuk transfer panas total Q dan perbedaan suhu keseluruhan fluida panas dan dingin.

$$m_h c_h = \frac{Q}{T_{h_1} - T_{h_2}} \quad (14)$$

dan

$$m_c c_c = \frac{Q}{T_{c_1} - T_{c_2}} \quad (15)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (14) dan (15) kedalam persamaan (13) maka akan menghasilkan:

$$Q = UA \frac{\cancel{T_{h_2} - T_{c_2}} - \cancel{T_{h_1} - T_{c_1}}}{\ln[(T_{h_2} - T_{c_2})/(T_{h_1} - T_{c_1})]} \quad (16)$$

Dengan membandingkan persamaan (16) dengan persamaan (6) maka akan ditemukan bahwa perbedaan suhu rata-rata adalah kelompok persamaan di dalam *brackets*, kemudian

$$T_{LMTD} = \frac{T_{h_2} - T_{c_2} - T_{h_1} - T_{c_1}}{\ln[(T_{h_2} - T_{c_2})/(T_{h_1} - T_{c_1})]} \quad (17)$$

Dengan perhitungan aljabar, maka diperoleh persamaan (18) sebagai berikut:

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (18)$$

Persamaan tersebut dipengaruhi panas dan dingin dari fluida yang digunakan (Holman.JP, 1981: 449).

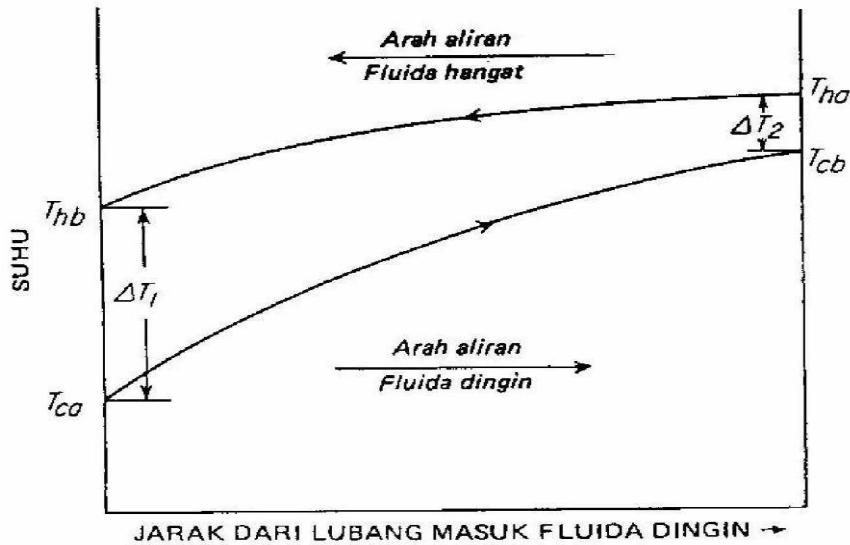
dimana,

$$\Delta T_2 = (T_h \text{ out(panas)} - T_c \text{ out(dingin)})$$

$$\Delta T_1 = (T_h \text{ in(panas)} - T_c \text{ in(dingin)})$$

## 2) Pertukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter flow*)

Pertukaran panas pada sistem ini yaitu kedua fluida (panas dan dingin) masuk penukar panas dengan arah berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan (Hartono, 2008: 8).



Gambar 11. Aliran temperatur pada aliran berlawanan arah

Kalor yang dipindahkan pada aliran berlawanan mempunyai persamaan yang sama seperti pada persamaan aliran searah dengan perbedaan pada nilai  $T_{LMTD}$ , yaitu :

Berdasarkan persamaan (17):

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (19)$$

$$\Delta T_2 = (T_h \text{ out(panas)} - T_c \text{ in(dingin)})$$

$$\Delta T_1 = (T_h \text{ in(panas)} - T_c \text{ out(dingin)})$$

## B. Kerangka Berpikir

### 1. Mengidentifikasi masalah

Masalah yang dihadapi adalah mengenai besarnya efisiensi penukar panas (*Heat exchanger*) pada sistem pendingin Reaktor Kartini yang telah digunakan lebih dari 60 tahun.

### 2. Mengambil data

Pengambilan data dilakukan secara langsung, pada saat proses reaksi nuklir sedang berlangsung dengan daya tertentu (100KW) melalui pengamatan besarnya suhu air pendingin primer dan air pendingin sekunder yang masuk dan keluar melalui penukar panas (*heat exchanger*) tipe tabung pada termometer analog.

### 3. Membuat rumusan penyelesaian masalah

Pemecahan masalah yang dihadapi adalah dengan cara menghitung besarnya koefisien perpindahan panas penukar panas (*Heat exchanger*) tipe tabung dengan menggunakan rumus persamaan (6) pada halaman 32.