

PERPINDAHAN PANAS

DAFTAR ISI

BAB I. PENDAHULUAN	2
A. Latar Belakang	2
B. Tujuan Pelatihan Perpindahan Panas	2
C. Indikator Keberhasilan	3
D. Batasan Pembahasan	3
BAB II DASAR-DASAR PERPINDAHAN PANAS	4
A. Pengantar	4
B. Perpindahan Panas Secara Konduksi	5
C. Perpindahan Panas Secara Konveksi	7
D. Perpindahan Panas Secara Radiasi	8
E. Perpindahan Panas Gabungan	11
BAB III. PERPINDAHAN PANAS PADA REAKTOR TIPE TRIGA	13
A. Konsep Energi	13
B. Pembangkitan Panas pada Bahan Bakar	16
C. Suhu Dinding Luar Kelongsong Bahan Bakar	16
D. Suhu Dinding Dalam Kelongsong Bahan Bakar	17
E. Suhu Dinding Luar Pelet U-Zr-H	17
F. Suhu Pusat Bahan Bakar	18
G. Perpindahan Panas pada Alat Penukar Panas	18
H. Perpindahan Panas pada Menara Pendingin	22
BAB IV. KECELAKAAN YANG MENGANGGU SISTEM PEMBUANGAN PANAS DAN MENIMBULKAN BAHAYA	25
A. Kehilangan Daya Listrik	25
B. Kehilangan Aliran Pendingin Reaktor	25
C. Kehilangan Air Pendingin Reaktor	29
DAFTAR PUSTAKA	31

KATA PENGANTAR

Modul Perpindahan Panas ini sebagai materi bahasan pada Pelatihan Operator dan Supervisor reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini tahun 2020.

Bab I sebagai bab pedahuluan modul ini membahas tentang tujuan instruksional umum (TIU) pelatihan perpindahan panas, tujuan instruksional khusus pelatihan perpindahan panas, indikator keberhasilan dan batasan pembahasan perpindahan panas

Bab II dibahas tentang dasar-dasar perpindahan panas secara konduksi, konveksi, radiasi, serta perpindahan panas gabungan konduksi dan konveksi.

Bab III dibahas tentang perpindahan panas yang terjadi pada reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini.

Akhirnya pada bab IV dibahas tentang kecelakaan yang mengganggu sistem pembuangan panas dan menimbulkan bahaya.

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pada umumnya reaktor nuklir adalah perangkat pembangkit uap yang menggunakan bahan bakar nuklir misalnya uranium dan thorium. Reaktor TRIGA 2000 di PSTNT dan reaktor Kartini di PSTA merupakan jenis reaktor nuklir tipe TRIGA yang tidak digunakan untuk membangkitkan uap melainkan reaktor untuk penelitian dengan memanfaatkan fluks neutron yang dihasilkan. Pada reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini, bahan bakar dimasukan ke dalam kelongsong bahan bakar yang selanjutnya dimasukkan ke dalam teras reaktor yang diisi dengan air demineralisasi sebagai air pendingin primer. Saat reaktor TRIGA 2000 dan 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 primer dan air pendingin sekunder.. Panas yang dihasilkan oleh bahan bakar di dalam teras reaktor diserap oleh air pendingin primer, kemudian dipindahkan ke pendingin sekunder oleh penukar panas, dan selanjutnya dibuang ke lingkungan melalui *cooling tower*.

B. Tujuan Pelatihan Perpindahan Panas

B.1. Tujuan Instruksional Umum (TIU)/Kompetensi Dasar

Peserta mampu menjelaskan prinsip dasar perpindahan panas dari elemen bakar nuklir di teras reaktor TRIGA 2000 atau teras reaktor Kartini ke pendingin dan ke lingkungan

B.2. Tujuan Instruksional Khusus (TIK)

1. Peserta mampu menjelaskan komponen dasar elemen bakar nuklir dan sistem pembangkitan panasnya.
2. Peserta mampu menjelaskan prinsip aliran panas dari pusat pembangkitan panas di elemen bakar, teras reaktor sampai ke pendingin dan ke lingkungan.
3. Peserta mampu menjelaskan hal-hal yang dapat mengganggu sistem pembuangan panas dan menimbulkan bahaya.

C. Indikator Keberhasilan

1. Peserta dapat mengerti dasar-dasar perpindahan panas konduksi, konveksi, radiasi, dan gabungan
2. Peserta dapat memahami perpindahan panas di dalam teras reaktor

D. Batasan Pembahasan

1. Pembahasan perpindahan panas pada pelatihan ini ditekankan pada teori dasar perpindahan panas konduksi, konveksi, radiasi, dan gabungan.
2. Aplikasi pengetahuan perpindahan panas pada pelatihan ini, ditunjukkan pada perpindahan panas dari pusat bahan bakar reaktor ke air pendingin reaktor, perpindahan panas yang terjadi pada air pendingin primer di dalam tangki reaktor, perpindahan panas yang terjadi pada alat penukar panas, dan perpindahan panas yang terjadi pada menara pendingin.

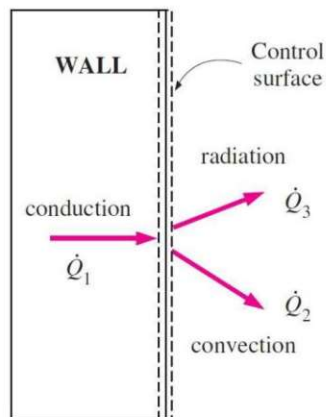
DASAR-DASAR PERPINDAHAN PANAS

A. Pengantar

Bila pada sebuah benda terdapat perbedaan suhu maka secara alamiah akan terjadi perpindahan energi dalam bentuk panas dari daerah yang suhunya lebih tinggi ke daerah yang suhunya lebih rendah. Demikian pula jika suhu sebuah benda lebih tinggi dari pada suhu lingkungannya, maka benda tersebut akan melepaskan energi panas sampai suhu benda tersebut sama dengan suhu lingkungannya. Proses perpindahan panas akan berhenti bila tercapai kondisi keseimbangan, yaitu jika suhu benda tersebut sudah sama dengan suhu lingkungannya

Dengan demikian pengertian perpindahan panas adalah mengalirnya energi dalam bentuk panas dari media yang bersuhu lebih tinggi ke media yang bersuhu lebih rendah melalui media padat, cair dan gas.

Ada tiga jenis mekanisme perpindahan panas, yaitu perpindahan panas konduksi, perpindahan panas konveksi, dan perpindahan panas radiasi.



Gambar 2.1. Proses perpindahan panas secara umum

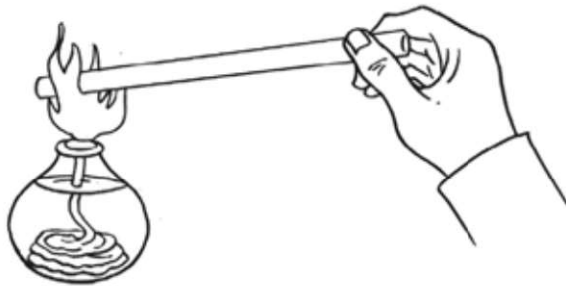
Berdasarkan Gambar 2.1, kesetimbangan perpindahan panas yang terjadi sesuai dengan persamaan

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

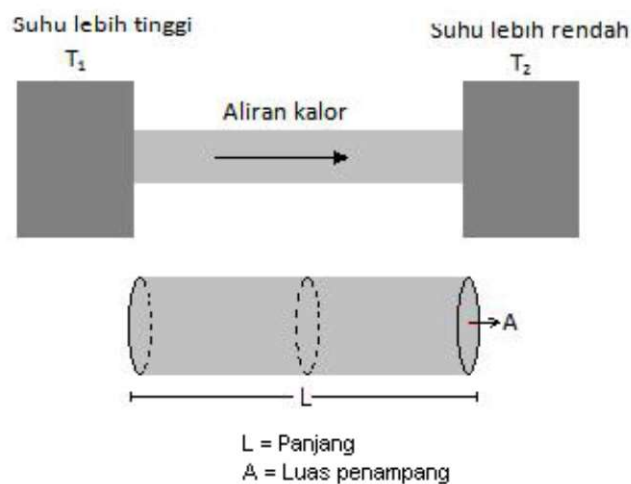
dengan $\dot{Q}_1$ adalah laju perpindahan panas konduksi, $\dot{Q}_2$ laju perpindahan panas konveksi dan $\dot{Q}_3$ laju perpindahan panas radiasi

B. Perpindahan Panas Konduksi (Hantaran)

Bila salah satu ujung sebatang logam dipanaskan, maka ujung yang lain juga akan meningkat suhunya meskipun ujung tersebut tidak ikut dipanaskan. Hal demikian dapat terjadi, karena adanya interaksi (tumbukan elastik) molekul yang berdekatan dalam logam tersebut. Interaksi ini diikuti oleh proses perpindahan energi dalam bentuk panas dari ujung yang dipanaskan ke ujung yang lainnya. Proses perpindahan energi dalam bentuk panas dari daerah yang bersuhu lebih tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair dan gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung tanpa diikuti perpindahan massa (molekul) benda disebut dengan perpindahan panas secara konduksi, contoh Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Contoh perpindahan panas secara konduksi



Gambar 2.3. Skema perpindahan panas secara konduksi

Laju perpindahan panas secara konduksi persatuan luas penampang sebanding dengan perbedaan suhu dalam arah perpindahan panas, yang dinyatakan dalam persamaan 2.2 berikut,

$$q \approx A \frac{dT}{dX} \dots\dots\dots (2.2)$$

- q = Laju perpindahan panas, satuannya (*joule/detik*) atau (*watt*)
 A = Luas penampang bahan yang diukur tegak lurus terhadap arah rambatan panas secara konduksi, satuannya (m^2)
 dT/dx = Laju perubahan suhu (T) terhadap jarak (x) dalam arah aliran perpindahan panas, satuan ($^{\circ}C/m$)

Faktor lain yang mempengaruhi laju perpindahan panas secara konduksi adalah konduktivitas panas bahan yang dilewati (k), sehingga persamaan (2.2) dapat dituliskan menjadi :

$$q = k.A \frac{dT}{dX} \dots\dots\dots (2.3)$$

atau
$$q = k.A \frac{T_1 - T_2}{L} \dots\dots\dots (2.4)$$

- dimana, T_1 = ujung batang atau daerah bersuhu lebih tinggi, satuan $^{\circ}C$
 T_2 = ujung batang atau daerah bersuhu lebih rendah, satuan ($^{\circ}C$)
 $(T_1 - T_2) / L$ = Gradien suhu, satuannya ($^{\circ}C/m$))
 L = panjang batang dalam arah perpindahan panas, satuan (m)
 k = konduktivitas termal bahan pemindah panas, satuan ($watt/m^{\circ}C$)

Contoh soal 1

Batang berbentuk silinder mempunyai luas penampang 5 cm^2 , panjang 2 m dan beda suhu antara kedua ujungnya dipertahankan $50^{\circ}C$. Bila konduktivitas panas batang tersebut $10 \text{ watt/m}^{\circ}C$. Tentukanlah jumlah panas yang dirambatkan persatuan luas persatuan waktu.

Penyelesaian:

Besar laju perpindahan panas yang dirambatkan persatuan waktu (q) adalah:

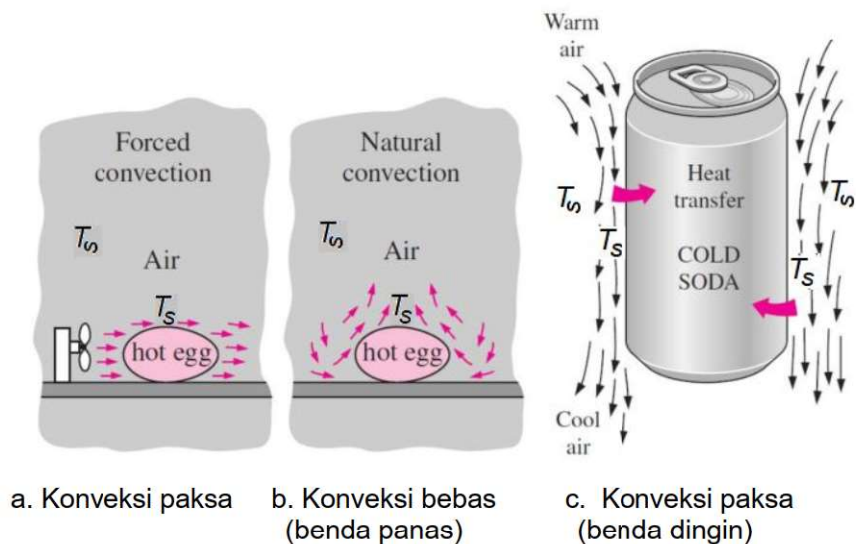
$$q = k.A \left(\frac{T_1 - T_2}{L} \right) \quad q = (10 \text{ watt} / m.^{\circ}C)(0,0005 \text{ m}^2) \left(\frac{50^{\circ}C}{2 \text{ m}} \right) = 0,125 \text{ watt}$$

C. Perpindahan Panas Secara Konveksi (Aliran)

Sudah umum diketahui bila pelat panas cepat dinginnya jika ditempatkan di depan kipas angin dibandingkan terhadap dengan dibiarkan di udara terbuka. Pada peristiwa ini dikatakan bahwa energi dalam bentuk panas dikonveksi secara paksa dari permukaan pelat oleh udara yang ditiupkan, sedangkan pelat panas pada udara terbuka dikonveksi secara alamiah oleh udara disekitar pelat panas tersebut.

Pada kedua peristiwa di atas, terjadi rambatan panas yang disertai gerakan massa atau gerakan partikel-partikel zat perantaranya. Perpindahan panas semacam ini dikenal dengan perpindahan panas secara aliran atau konveksi.

Dengan demikian konveksi alamiah (*free convection*) didefinisikan sebagai proses perpindahan panas konveksi karena perbedaan kerapatan yang disebabkan perbedaan suhu. Sedangkan konveksi paksa (*forced convection*) didefinisikan sebagai proses perpindahan panas konveksi yang disebabkan pengaruh tenaga dari luar, misalnya pompa atau kipas (Gambar 2.4).



Gambar 2.4. Perpindahan panas konveksi

Persamaan dasar untuk menentukan besarnya panas yang merambat tiap satuan waktu, dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 2.5 berikut :

$$q = h.A.(\Delta T) \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan h = koefisien perpindahan panas konveksi, satuan (*joule/dtk.m².°C*)

- A = luas permukaan pemindah panas, satuan (m^2)
 ΔT = beda suhu antara permukaan padat (T_s) dengan fluida disekitarnya (T_∞)($^\circ C$)
 q = jumlah panas yang merambat persatuan waktu, satuan (*watt*)

Pada kasus perpindahan panas antara permukaan pelat dengan udara yang ditiupkan kipas angin (konveksi paksa), harga koefisien perpindahan panas konveksinya dipengaruhi oleh laju atau kecepatan udara yang ditiupkan, tetapi hubungannya tidak linier. Bila laju dilipat duakan maka harga koefisien perpindahan panas konveksi (h) tidak otomatis menjadi lipat dua tetapi mengikuti hubungan tertentu yang biasanya diperoleh melalui eksperimen. Pada kasus pendinginan oleh udara terbuka (konveksi alamiah), besarnya koefisien perpindahan panas konveksi dipengaruhi oleh bentuk dan kedudukan permukaan pemindah panas serta sifat fluida yang berada disekelilingnya.

Penentuan besar koefisien perpindahan panas konveksi ini sangat kompleks karena besarnya ditentukan oleh kondisi perpindahan panas konveksi yang terjadi, kondisi aliran dan sifat-sifat fluidanya.

Contoh soal 2

Panas merambat dari permukaan pelat panas bersuhu $200^\circ C$ ke udara ruangan yang suhu reratanya $30^\circ C$. Bila harga koefisien perpindahan panas konveksi $0,05 \text{ joule/dtk.m}^2.^\circ C$ dan luas permukaan pelat 200 cm^2 . Berapa panas yang dirambatkan dari pelat ke udara ?

Penyelesaian:

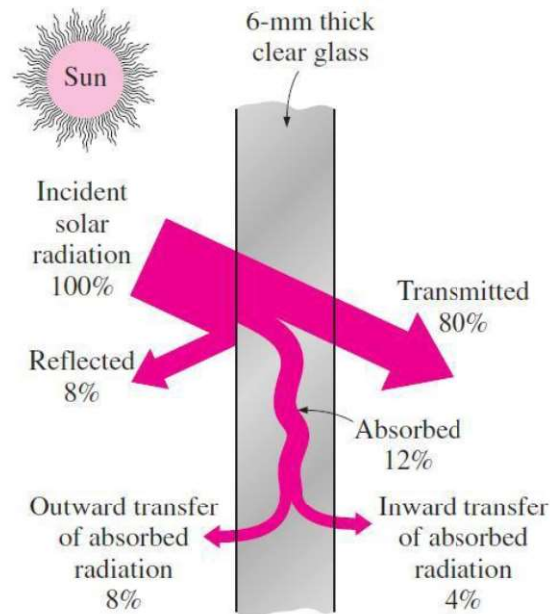
$$q = h.A.\Delta T$$

$$q = (0,05 \text{ joule/dtk.m}^2.^\circ C)(0,02 \text{ m}^2)(200 - 30)^\circ C = 0,17 \text{ joule/dtk} = 0,17 \text{ watt}$$

D. Perpindahan Panas Secara Radiasi (Pancaran)

Perpindahan energi dalam bentuk panas pada proses konduksi dan konveksi membutuhkan media perantara. Pada kasus yang sudah dibahas sebelumnya telah dikemukakan bahwa konduksi membutuhkan batang logam, konveksi membutuhkan pelat panas dan udara. Di samping kedua cara perpindahan panas tersebut, energi dalam bentuk panas juga dapat merambat melalui daerah hampa udara. Contohnya

energi matahari dapat sampai ke bumi setelah melewati ruang yang hampa udara. Cara berpindahnya energi dalam bentuk panas tanpa membutuhkan media disebut radiasi dan energi berpindah melalui pancaran gelombang elektromagnetik (Gambar 2.5).



Gambar 2.5. Ilustrasi perpindahan panas radiasi matahari pada kaca jernih.

Meskipun radiasi dapat terjadi pada daerah hampa udara, tetapi dalam medium yang tidak hampapun radiasi dapat berlangsung. Contohnya bila berdiri dekat tungku pembakaran batu bata yang suhunya relatif tinggi, maka akan merasakan adanya panas yang berpindah dari tungku ke tubuh, padahal aliran udara relatif tidak ada. Keadaan ini dapat terjadi karena adanya radiasi.

Persamaan yang digunakan untuk menentukan besarnya energi panas yang berpindah secara radiasi dari suatu permukaan dituliskan dalam bentuk persamaan berikut,

$$q = \sigma A T^4 \dots\dots\dots (2.6)$$

dimana

σ = konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$)

A = luas permukaan benda yang memancarkan panas (m^2)

T = suhu mutlak benda yang memancarkan panas (K)

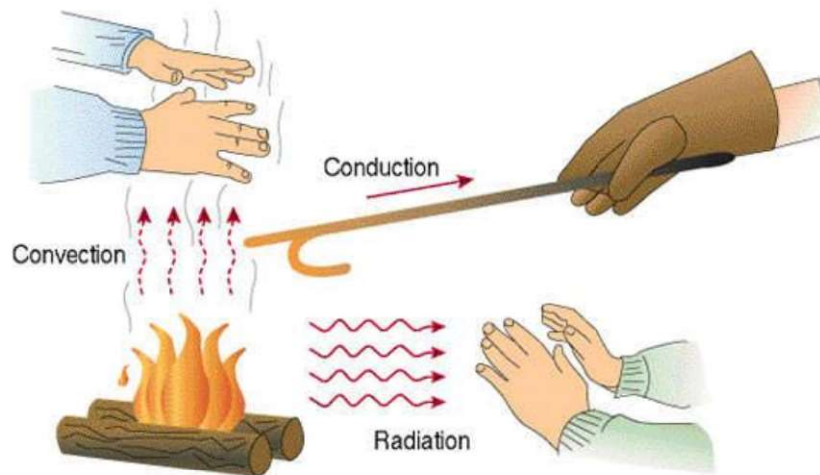
Bila dua permukaan saling memancarkan radiasi maka energi netto dalam bentuk panas yang dipindahkan ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$q = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.7)$$

Perpindahan panas radiasi antara dua permukaan juga dipengaruhi oleh faktor bentuk (F). Faktor bentuk ini menggambarkan jumlah energi yang meninggalkan suatu permukaan dan diterima oleh permukaan yang lain. Akibat faktor bentuk ini, maka persamaan perpindahan panas radiasi ditulis :

$$q = \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (2.8)$$

Perbedaan antara perpindahan panas secara konduksi, perpindahan panas secara konveksi, dan perpindahan panas secara radiasi dapat dilihat pada ilustrasi Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5. Perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi

Contoh soal 3 (perpindahan panas secara radiasi)

Hitunglah perpindahan panas secara radiasi antara lantai tungku dengan ukuran (50 x 50) cm² dan atap tungku bila jarak keduanya terpisah 1 meter. Suhu lantai 1000 °C dan suhu atap 800 °C.

Penyelesaian :

Untuk lantai tungku dengan ukuran $(50 \times 50) \text{ cm}^2$ dan atap tungku terpisah 1 meter dari lantai tungku, maka berdasarkan kurva faktor bentuk diperoleh faktor bentuk tungku = 0,3, sehingga.

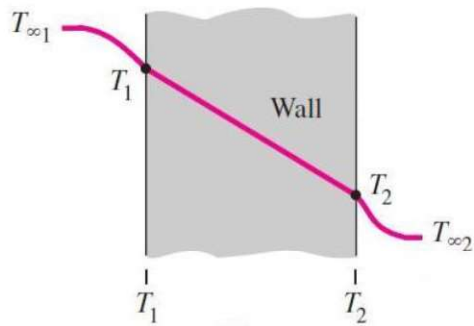
$$\begin{aligned} q &= \sigma A F (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 (0,5 \times 0,5) \text{ m}^2 (0,3) (1273^4 - 1073^4) \text{ K}^4 \\ &= 0,57 \cdot 10^4 \text{ W} = 5700 \text{ watt} \end{aligned}$$

Soal-soal latihan

1. Batang berbentuk silinder dengan luas penampang 10 cm^2 , panjangnya 5 cm suhu ujung panasnya 120°C dan suhu ujungnya 80°C dipertahankan tetap. Bila konduktivitas panas batang tersebut $20 \text{ joule}/(\text{m} \cdot \text{dk} \cdot ^\circ\text{C})$. Tentukanlah jumlah panas yang dirambatkan persatuan luas persatuan waktu.
2. Sebuah ruangan berpendingin menggunakan AC, suhu ruangan dipertahankan tetap 18°C . Rambatan panas terjadi dari sebuah kaca yang berhubungan dengan udara luar bersuhu 28°C . Luas permukaan kaca yang merambatkan panas ke dalam ruangan adalah $(4 \times 5) \text{ m}^2$ dan $(4 \times 3) \text{ m}^2$, tentukan daya yang dibutuhkan untuk mempertahankan suhu ruangan jika koefisien perpindahan panas konveksi $0,1 \text{ joule}/\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$.
3. Hitunglah perpindahan panas secara radiasi dari sebuah permukaan bola logam yang mempunyai diameter 20 cm bersuhu 127°C lingkungan yang bersuhu 27°C . Faktor bentuk antara bola dan lingkungan 0,8.

E. Perpindahan panas gabungan (konduksi dan konveksi)

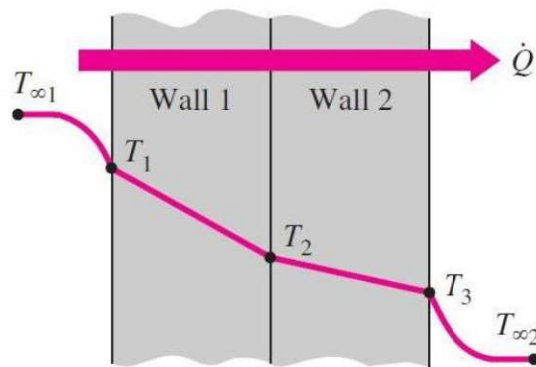
Perpindahan panas gabungan yang sesungguhnya adalah gabungan dari konduksi, konveksi dan radiasi. Perpindahan panas radiasi yang terjadi di dalam teras reaktor Kartini sangat kecil maka perpindahan panas radiasi tidak dibahas dan yang dibahas hanya gabungan antara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas gabungan ini diilustrasikan pada Gambar 2.6, pada gambar tersebut diilustrasikan untuk perpindahan panas dari fluida (konveksi), dinding (konduksi) dan fluida (konveksi).



Gambar 2.6. Perpindahan panas gabungan konduksi dan konveksi

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} \text{ (W)} \dots\dots\dots(2.9)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L}{kA} + \frac{1}{h_2 A} \dots\dots\dots(2.10)$$



Gambar 2.7. Perpindahan panas konduksi pada dinding 2 (dua) lapis dan konveksi

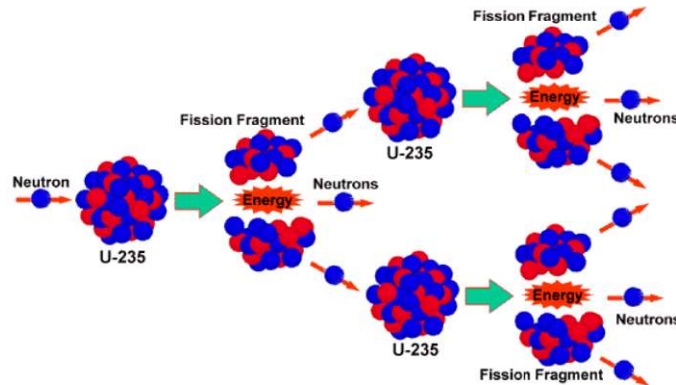
$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{\text{total}}} \text{ (W)} \dots\dots\dots (2.11)$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \dots\dots\dots(2.12)$$

BAB III

PERPINDAHAN PANAS PADA TERAS REAKTOR TIPE TRIGA

A. Konsep Energi



Gambar 3.1. Energi yang dibangkitkan oleh reaksi fisi

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan serta bersifat kekal. Akan tetapi energi itu dapat diubah dari satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya. Sebagai contoh energi yang dibangkitkan oleh reaksi fisi dalam teras reaktor dalam bentuk energi panas diubah menjadi energi listrik (Gambar 3.1).

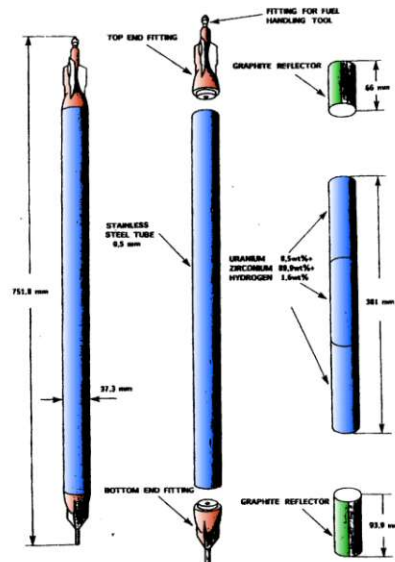
Panas merupakan salah satu bentuk energi. Panas adalah sesuatu yang tidak dapat diukur atau diamati secara langsung, tetapi pengaruhnya dapat diamati dan diukur. Panas dapat berpindah (mengalir/merambat) dari satu tempat ke tempat lainnya jika terdapat perbedaan suhu. Panas mengalir dengan sendirinya dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah.

Panas yang dihasilkan dari reaksi fisi yang terjadi di dalam bahan bakar (Gambar 3.2) yang terdapat di dalam teras reaktor nuklir akan merambat ke permukaan bahan bakar secara konduksi, kemudian panas pada permukaan bahan bakar ini akan mengalir melalui fluida pendingin secara konveksi. Tentunya panas yang dihasilkan dari bahan bakar juga dapat merambat secara radiasi ke lingkungan.

Pada sistem reaktor TRIGA 2000 atau reaktor Kartini, proses perpindahan panas dimulai dari panas yang dihasilkan di pusat bahan bakar sebagai hasil reaksi fisi yang terkendali. Kemudian panas di pusat bahan bakar merambat secara

konduksi ke permukaan dinding luar (kelongsong) bahan bakar. Secara konveksi panas dari kelongsong bahan bakar berpindah ke air pendingin primer. Selanjutnya di dalam air pendingin primer, panas merambat dari suatu posisi ke posisi lainnya secara konveksi. Melalui alat penukar panas, panas pada pendingin primer dipindahkan ke pendingin sekunder secara konveksi dan konduksi. Selanjutnya air pendingin sekunder dialirkan ke menara pendingin untuk dibuang panasnya ke lingkungan secara konveksi.

Dengan demikian, jika suhu pusat sebuah bahan bakar diketahui, maka suhu permukaannya dapat dihitung demikian juga suhu fluida pendinginnya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan perpindahan panas. Pembahasan perpindahan panas pada modul ini hanya ditujukan pada perpindahan panas dari pusat bahan bakar reaktor ke air pendingin primer yaitu air.



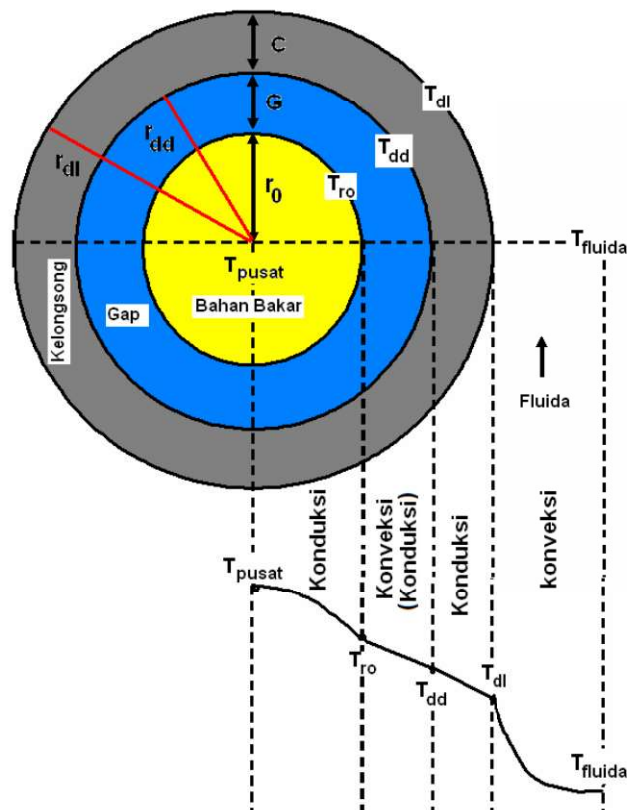
Gambar 3.2. Bahan bakar TRIGA 2000 dan reaktor Kartini

Adanya perbedaan suhu antara air pendingin yang ada dalam tangki reaktor dengan kelongsong elemen bakar akan menyebabkan terjadinya perpindahan panas secara konveksi alamiah dari permukaan kelongsong elemen bakar ke air pendingin.

Panas yang sudah dipindahkan ke air pendingin seterusnya akan dibawa oleh air pendingin dalam sistem pendingin primer dan dipindahkan ke sistem pendingin sekunder pada penukar panas. Perpindahan panas yang terjadi pada penukar panas berlangsung secara konveksi paksa.

Panas yang diambil sistem pendingin sekunder di dalam penukar panas dibuang ke lingkungan melalui menara pendingin (*cooling tower*) dan proses perpindahan panasnya juga berlangsung secara konveksi paksa.

Mekanisme perpindahan panas dari pusat bahan bakar di teras reaktor ke air pendingin primer ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3. Mekanisme perpindahan panas di dalam bahan bakar

B. Pembangkitan Panas pada Bahan Bakar

Reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini adalah reaktor yang digunakan untuk penelitian dan memproduksi isotop. Panas di dalam teras reaktor terjadi akibat adanya reaksi fisi antara bahan bakar uranium dengan neutron yang mengeluarkan energi dalam bentuk panas. Panas ini dibangkitkan dalam elemen bahan bakar berbentuk silinder dan besarnya pembangkitan panas persatuan volume (q''') yang dihasilkan oleh sebuah bahan bakar dapat dituliskan dalam bentuk persamaan 3.1

$$q''' = GN\sigma_f\Phi \quad \text{watt/cm}^3 \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$q = q''' \cdot V \quad \text{watt} \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

G = energi tiap reaksi fisi ($190 \text{ MeV} = 3,04 \times 10^{-11} \text{ joule}$)

N = rapat atom bahan bakar (atom/cm^3)

σ_f = tampang lintang mikroskopis pembelahan bahan bakar (cm^2)

ϕ = fluks neutron ($\text{neutron/cm}^2 \text{ dtk}$)

q = daya atau panas yang dibangkitkan pada sebuah bahan bakar (watt)

V = volume bagian bahan bakar aktif (cm^3)

C. Suhu Dinding Luar Kelongsong Bahan Bakar (T_{dl})

Pada reaktor TRIGA 2000 suhu curah (*bulk*) air tangki haruslah lebih kecil dari 50°C karena suhu operasi demeneralizer di bawah 50°C , suhu air masuk tangki reaktor $32,2^\circ\text{C}$ sedangkan suhu keluar teras $79,6^\circ\text{C}$ (hasil eksperimen). Berdasarkan data-data ini dapat ditentukan besarnya suhu rerata air pendingi primer di dalam teras (T_{rerata}) yaitu :

$$T_{rerata} = (T_{keluar} + T_{masuk}) / 2 \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

Dengan demikian $T_{rerata} = (79,6 + 32,2) / (2)^\circ\text{C} = 55,9^\circ\text{C} \approx 56^\circ\text{C}$.

Diasumsikan reaktor TRIGA 2000 pada daya 2000 kW menggunakan konfigurasi 116 bahan bakar diteras, dan besarnya pembangkitan daya untuk setiap bahan bakar adalah sama. Dengan demikian daya rata-rata yang dibangkitkan masing-masing bahan bakar adalah $(2000 \text{ kW} / 116) = 17,241 \text{ kW}$. Pada hasil perhitungan diketahui harga koefisien perpindahan panas konveksi rata-rata elemen

bakar ($h_{rata-rata}$) adalah $4870,8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, maka dengan menggunakan persamaan (2.4) dapat ditentukan suhu dinding luar kelongsong (T_{dl})

$$q = h_{rata-rata} \cdot A (T_{dl} - T_{rerata}) = h_{rata-rata} \cdot (2\pi \cdot r_{dl} \cdot L) (T_{dl} - T_{rerata})$$

T_{dl} = suhu dinding luar kelongsong

r_{dl} = jari-jari dinding luar kelongsong = 1,875 cm

$$17241 = (4870,8)(2)(3,14)(0,01875)(0,381)(T_{dl} - 56)$$

$$T_{dl} = 134,90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

D. Suhu Dinding Dalam Kelongsong Bahan Bakar (T_{dd})

Suhu dinding dalam kelongsong elemen bakar dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (3.3).

$$T_{dd} - T_{dl} = \frac{q}{2\pi \cdot k_c \cdot L} \ln \frac{r_{dl}}{r_{dd}} \dots\dots\dots (3.4)$$

T_{dd} = suhu dinding dalam kelongsong T_{dl} = suhu dinding luar kelongsong

r_{dd} = jari-jari dinding dalam kelongsong = 1,825 cm

r_{dl} = jari-jari dinding luar kelongsong = 1,875 cm

L = panjang bagian elemen bakar aktif = 38,1 cm,

k_c = konduktivitas panas bahan kelongsong = $18 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$,

$$T_{dd} - 134,90 = (17241)(0,0276) / (2)(3,14)(18)(0,381)$$

$$T_{dd} - 134,90 = 11,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_{dd} = 145,95 \text{ } ^\circ\text{C}$$

E. Suhu Dinding Luar Pelet U-Zr-H (T_{ro})

Untuk bahan bakar yang sudah diiradiasi, celah yang ada antara bahan bakar dengan kelongsong akan terisi oleh gas helium dan gas produk fisi. Disamping itu, terjadinya pengembangan dan rengkahan bahan bakar membuat adanya permukaan singgung antara bahan bakar dan kelongsong. Akibatnya mekanisme perpindahan panas pada celah tidak dapat didekati dengan model analitis dengan menganggap terjadi konduksi murni pada lapisan film gas helium. Dalam kajian sistem keselamatan reaktor, konduktansi pada celah harus diperhitungkan dan untuk kasus

pelet berbentuk oksida dengan kelongsong logam telah diperoleh harga koefisien perpindahan panas antara pelet dengan kelongsong sebesar $6000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

Untuk bahan bakar U-Zr-H dengan kelongsong logam (SS) diasumsikan harga koefisien perpindahan panas pada celah sama dengan kasus uranium oksida dengan kelongsong logam. Menggunakan harga ini dapat ditentukan besarnya suhu dinding pelet U-Zr-H.

$$T_{ro} - T_{dd} = \frac{q}{2\pi \cdot r_o \cdot L \cdot h} \dots\dots\dots (3.5)$$

T_{ro} = suhu dinding luar pelet U-Zr-H

h = koefisien perpindahan panas, r_o = jari-jari pelet uranium

jika $r_o = 1,816 \text{ cm}$, dan $L = 38,1 \text{ cm}$, maka :

$$T_{ro} = 145,95 + (17241)/\{(2)(3,14)(0,01816)(0,381)(6000)\}$$

$$T_{ro} = 212,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

F. Suhu Pusat Bahan Bakar (T_{pusat})

Untuk menentukan suhu pusat bahan bakar diterapkan berbagai asumsi antara lain panas berpindah secara konduksi dalam arah radial, harga konduktivitas panas pelet tidak tergantung pada suhu dan besarnya $13 \text{ BTU/hr.ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$ atau $22,5 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$ pada daerah suhu ($93 - 650$) $^\circ\text{C}$. Persamaan perpindahan panas konduksi untuk silinder dengan sumber pencetus panas dapat ditulis :

$$T_{pusat} = \left(\frac{q''' \cdot r_o^2}{4k_p} \right) + T_{ro} \dots\dots\dots (3.6)$$

$q''' = q/(\pi(r_o)^2 L) = \text{Daya per satuan volume}$,

r_o = jari-jari pelet uranium = $1,816 \text{ cm}$,

L = panjang bagian elemen bakar aktif = $38,1 \text{ cm}$

k_p = konduktivitas panas bahan pelet uranium = $22,5 \text{ W/m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$

Volume bahan bakar untuk setiap elemen bakar (V) adalah

$$V = \pi(r_o)^2 \cdot L = 394,78 \text{ cm}^3 = 0,00039478 \text{ m}^3,$$

maka suhu pusat elemen bahan bakar adalah :

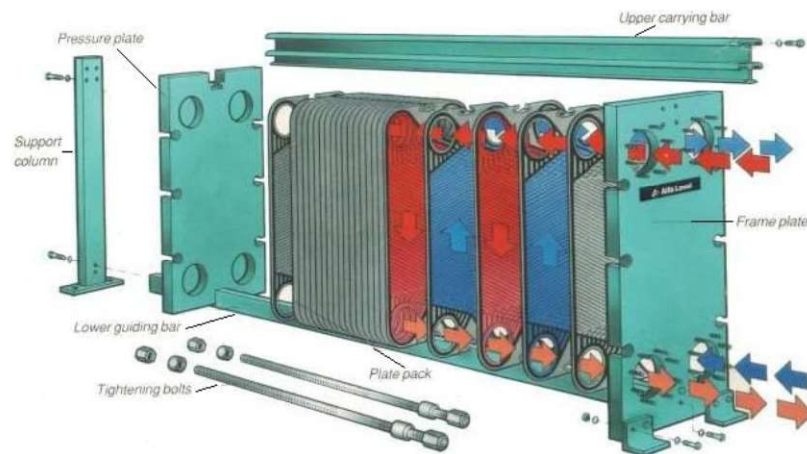
$$T_{pusat} = \{(17241/0,00039478)(0,01816)^2/(4)(22,5)\} + 212,08$$

$$T_{pusat} = 372,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

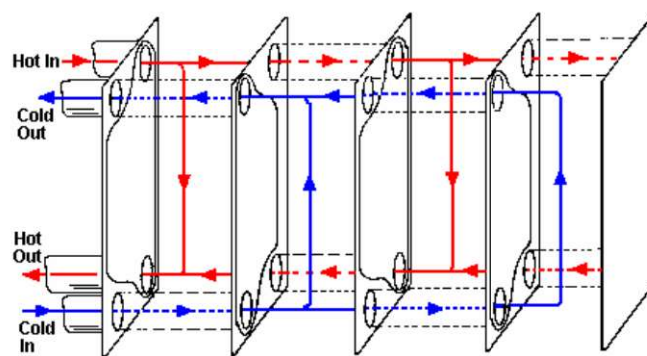
Metoda perhitungan yang telah dijelaskan ini adalah cara menghitung suhu dimulai dengan data suhu air pendingin yang diperoleh dari hasil eksperimen, kemudian dihitung suhu dinding luar kelongsong, suhu dinding dalam kelongsong, suhu dinding (permukaan luar) pelet, dan suhu pusat bahan bakar.

Disamping itu dapat juga dilakukan menghitung suhu dimulai dengan data suhu pusat bahan bakar yang ditunjukkan oleh suhu *IFE*, kemudian dihitung suhu dinding (permukaan luar) pelet, suhu dinding dalam kelongsong, suhu dinding luar kelongsong, dan suhu pendingin primer yang dipermukaan kelongsong. Silakan dicoba sendiri sebagai latihan, dan selamat mencoba.

G. Perpindahan panas pada Alat Penukar Panas



Gambar 3.4. Sistem penukar panas tipe pelat reaktor TRIGA 2000

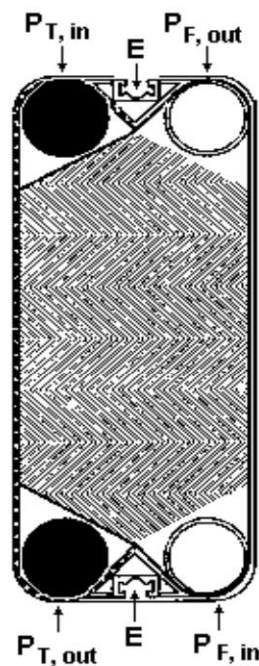


Gambar 3.5. Diagram aliran pendingin di dalam penukar panas tipe pelat

Penyukut panas reaktor TRIGA 2000 yang terpasang saat ini adalah tipe pelat dengan konfigurasi *single pass* (*One-pass/one-pass plate-and-frame heat exchanger*), yaitu aliran lawan arah laluan tunggal (*single-pass counterflow*). Diproduksi oleh *Baltimore Air Coil* dengan model pelat EC7. Gambar penyukut panas dan diagram aliran di dalam penyukut panas tipe pelat reaktor TRIGA 2000 dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan Gambar 3.5.

Konstruksi penyukut panas reaktor TRIGA 2000 terdiri dari susunan pelat logam bergelombang (Gambar 3.6) yang dilengkapi dengan lubang pemasukan dan pengeluaran pada bagian atas dan bawah (*port hole*). Lubang ini berfungsi sebagai saluran fluida untuk mengalir di atas permukaan pelat. Susunan pelat-pelat ini ditempatkan antara dua pelat penekan (*pressure plate*), kemudian dikencangkan menggunakan baut pengencang. Antara dua pelat dipisahkan oleh gasket yang berfungsi sebagai penahan bocor dan mengarahkan fluida agar mengalir dalam arah berlawanan. Permukaan pelat dibuat bergelombang dimaksudkan untuk meningkatkan arus turbulensi dan menyangga pelat terhadap perbedaan tekanan.

Bahan pelat penyukut panas yang digunakan adalah SS 304, sedangkan untuk gasket digunakan *Neoprene* dan *Nitrile Rubber*. Adapun data teknis pelat dapat dilihat pada tabel 1.



Gambar 3.6. Pelat penyukut panas reaktor TRIGA 2000

Tabel 3.1. Data teknis penukar panas reaktor TRIGA 2000

NO.	PARAMETER	UKURAN
1.	Jumlah pelat	144 lembar
2.	Panjang pelat	177 cm
3.	Lebar pelat	61 cm
4.	Tebal pelat	0,06 cm
5.	Jarak antar pelat	0,35 cm
6.	Diameter port	19,05 cm
7.	Diameter pipa primer	15 cm
8.	Diameter pipa sekunder	20 cm
9.	Pitch	0,41 cm
10.	Laju alir pendingin primer	950 gpm
11.	Laju alir pendingin sekunder	1200 gpm (4541 l/mnt)

Proses perpindahan panas pada penukar panas dimulai dengan pompa primer memompakan air panas dari teras reaktor melalui pipa primer ke sisi primer penukar panas. Pada saat yang bersamaan pompa sekunder memompakan air pendingin sekunder melalui pipa sekunder ke sisi sekunder penukar panas. Di dalam penukar panas terjadi perpindahan panas secara konveksi paksa dari air pendingin primer ke air pendingin sekunder melalui aliran lawan arah laluan tunggal (*single-pass counterflow*), sehingga suhu air pendingin primer menjadi turun dan suhu air pendingin sekunder naik.

Air pendingin primer yang telah mengalami penurunan suhu di penukar panas dipompakan ke teras reaktor melalui pipa primer untuk kembali mengambil panas dari teras reaktor melalui konveksi alamiah. Air pendingin sekunder yang telah mengalami kenaikan suhu di penukar panas dipompakan ke menara pendingin melalui pipa sekunder untuk dibuang panasnya ke lingkungan melalui konveksi paksa.

Pada penukar panas reaktor TRIGA 2000 digunakan laju aliran pendingin sekunder haruslah lebih besar dari laju aliran pendingin primer, seperti yang dicantumkan pada Tabel 3.1. Hal ini dimaksudkan ketika terjadi kebocoran pada alat penukar panas, maka air pendingin dari sisi primer penukar panas tidak mengalir ke sisi sekunder penukar panas, sehingga zat radioaktif yang berada di sisi primer tidak berpindah ke ke sisi sekunder dan akhirnya tidak juga mencemari lingkungan.

Untuk mengevaluasi kinerja penukar panas reaktor TRIGA 2000 dilakukan dengan menghitung harga efektifitas (E) penukar panas berdasarkan persamaan matematika di bawah ini.

$$E = \frac{T_{primer,masuk} - T_{primer,keluar}}{T_{primer,masuk} - T_{sekunder,masuk}} \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan, $T_{primer,masuk}$ = suhu air pendingin primer masuk ke penukar panas,

$T_{primer,keluar}$ = suhu air pendingin primer keluar dari penukar panas,

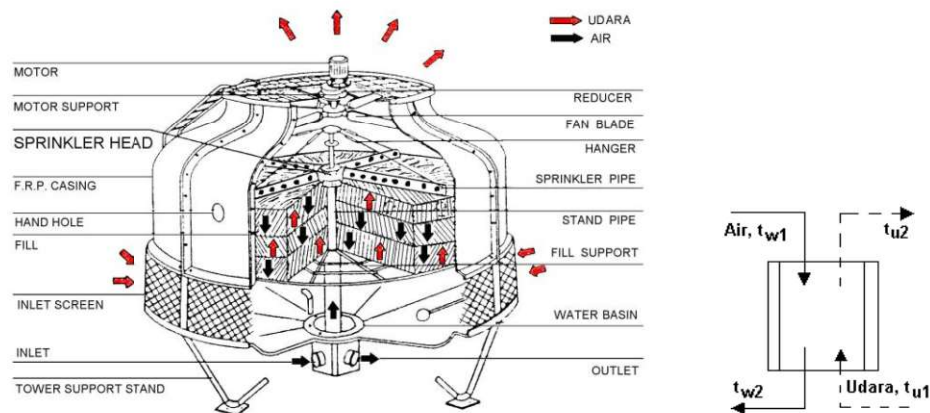
$T_{sekunder,masuk}$ = suhu air pendingin sekunder masuk ke penukar panas.

Adapun suhu masuk air pendingin primer dan sekunder ke penukar panas dan suhu keluar air pendingin primer dan sekunder dari penukar panas dapat dilihat pada alat ukur suhu terpasang.

H. Perpindahan panas pada Menara Pendingin

Menara pendingin sebagai sistem pendingin sekunder yang menunjang pengoperasian reaktor TRIGA 2000, harus mampu menurunkan temperatur air yang berasal dari sistem penukar panas hingga mencapai batas ambang keselamatan. Menara pendingin reaktor TRIGA 2000 yang diproduksi *Liang Hoo Cooling Tower* model *LCT-350* adalah peralatan yang terpasang dalam kondisi baru.

Diagram proses perpindahan panas pada menara pendingin reaktor TRIGA 2000 dinyatakan pada diagram gambar 2.5.



Gambar 2.5. Diagram perpindahan panas pada menara pendingin

Proses perpindahan panas pada menara pendingin dimulai dengan pompa sekunder memompakan air sekunder panas dari penukar kalor melalui pipa sekunder ke inlet menara pendingin yang berada pada bagian bawah. Kemudian air pendingin sekunder diteruskan bagian atas menara pendingin melalui stand pipe untuk dijatuhkan ke seluruh *fill* (sarang tawon) di dalam menara pendingin melalui *springkler pipe* yang berputar berdasarkan kaedah hukum kesimbangan gaya sentripetal dan gaya sentrifugal. Pada saat yang bersamaan *fan blade* menghisap udara dari bagian bawah dan lingkungan menara pendingin naik menuju bagian atas menara pendingin melalui *fill* (sarang tawon). Di dalam *fill* terjadi perpindahan panas secara konveksi paksa dari air pendingin sekunder yang dijatuhkan dari *spinkler pipe* dengan udara yang dihisap oleh *fan blade* dari bagian bawah dan lingkungan menara pendingin. Kemudian panas yang ada di udara dibuang ke lingkungan, sedangkan air pendingin sekunder yang telah mengalami penurunan suhu di *fill* (sarang tawon) menara pendingin dipompakan ke penukar panas melalui pipa sekunder untuk kembali mengambil panas dari air pendingin primer melalui konveksi paksa.

Untuk mengevaluasi kinerja menara pendingin reaktor TRIGA 2000 dilakukan dengan menghitung harga efektifitas (E) menara pendingin berdasarkan persamaan matematika di bawah ini

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\{-NTU(1-C)\}}{1 - C \exp\{-NTU(1-C)\}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

$$NTU = \frac{h_c A / C_{pm}}{m_{udara}} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\frac{h_c A}{C_{pm}} = m_{air} (4,19) \cdot (\Delta T) \cdot \left(\sum \frac{1}{h_s - h_a} \right) \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

h_c = koefisien perpindahan kalor konveksi (watt/m².K)

ΔT = selisih temperatur antar bidang

C_{pm} = kalor jenis udara lembab (kJ/kg.K)

h_s = entalpi udara jenuh (kJ/kg)

h_a = entalpi udara rata-rata (kJ/kg)

$$m_{udara} = \rho_{udara} \cdot A \cdot v$$

m_{udara} = laju massa udara (kg/s)

ρ_{udara} = densitas udara pada temperatur t (kg/m³)

A = luas penampang bidang pendingin (m²)

$C_{air} = m_{air} \cdot c_{p,air}$ = kapasitas kalor air pendingin

$C_{udara} = m_{udara} \cdot c_{p,udara}$ = kapasitas kalor udara

$c_{p,udara}$ = kalor spesifik udara (J/kg °C)

$c_{p,air}$ = kalor spesifik air (J/kg °C)

$C = \frac{C_{udara}}{C_{air}}$ = rasio kapasitas kalor antara udara dan air adalah

Soal Latihan

1. Pada tekanan 1 atmosfer, air akan mendidih pada suhu 100°C. Suhu ini disebut suhu saturasi pada tekanan 1 atmosfer. Dapatkah Anda memperkirakan berapa suhu saturasi di dalam teras reaktor.
2. Termokopel dalam *IFE (Instrumented Fuel Element)* digunakan untuk mengukur:
 - a. Temperatur satu titik di tengah bahan bakar
 - b. Temperatur tiga titik di tengah bahan bakar
 - c. Temperatur di kedua ujung di tengah bahan bakar
 - d. Temperatur tiga titik di kelongsong bahan bakar
3. Di dalam LAK reaktor TRIGA 2000, berapakah nilai suhu pusat bahan bakar yang ditunjukkan oleh IFE untuk kondisi berikut:
 - a. peringatan dini, bahwa suhu bahan bakar sudah tinggi
 - b. reaktor scram
4. Di dalam laporan analisis keselamatan (LAK) reaktor TRIGA 2000 Bandung, dinyatakan bahwa batas terjadinya *scram* untuk suhu bahan bakar adalah 750 °C. Hal ini berarti bahwa:
 - a. Jika suhu pusat bahan bakar yang ditunjukkan oleh IFE adalah 750 °C, maka reaktor *scram*.
 - b. Jika suhu pusat bahan bakar yang ditunjukkan oleh IFE telah melewati angka 750 °C, maka reaktor *scram*.
 - c. Jika suhu kelongsong (*cladding*) bahan bakar yang ditunjukkan oleh IFE adalah 750 °C, maka reaktor *scram*
 - d. Jika suhu kelongsong (*cladding*) bahan bakar yang ditunjukkan oleh IFE telah melewati angka 750 °C, maka reaktor *scram*

BAB IV

KECELAKAAN YANG MENGANGGU SISTEM PEMBUANGAN PANAS DAN MENIMBUL BAHAYA

Kecelakaan yang dikemukakan pada bagian ini adalah semua jenis kecelakaan termohidrolik yang dapat terjadi pada reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini. Tujuannya adalah agar masalah keselamatan mendapatkan perhatian utama dalam merencanakan sistem keselamatan reaktor dan juga untuk membuktikan bahwa ketepatan dan persyaratan sistem keselamatan yang direncanakan dapat mencegah kecelakaan yang dipostulasikan atau dapat membatasi akibat kecelakaan tersebut terhadap lingkungan sehingga tidak membahayakan personal maupun masyarakat di sekitar lokasi reaktor.

Adapun kecelakaan termohidrolik yang dapat terjadi pada reaktor TRIGA 2000 dan reaktor Kartini, antara lain :

- a. Kehilangan daya listrik
- b. Kehilangan aliran pendingin (LOFA)
- c. Kehilangan air pendingin (LOCA)

A. Kehilangan Daya Listrik

Pada saat reaktor beroperasi dengan daya maksimal, terjadi pemadaman listrik akibat pemadam PLN atau turunnya tegangan jala-jala atau akibat kesalahan manusia, maka akan terjadi pemadaman reaktor secara mendadak (*scram*). Seluruh batang kendali akan jatuh ke dalam teras reaktor dan pompa siklus pendinginan primer dan sekunder berhenti. Panas sisa yang ada pada bahan bakar akan dipindahkan ke air tangki reaktor melalui proses konveksi alamiah. Berdasarkan perhitungan termohidrolik reaktor, proses konveksi alamiah dapat menjaga integritas teras reaktor.

B. Kehilangan Aliran Pendingin Reaktor (LOFA)

Kehilangan aliran fluida pendingin pada reaktor dapat terjadi pada siklus primer maupun siklus sekunder. Namun akibat yang ditimbulkannya sama, yaitu naiknya suhu fluida pada tangki reaktor.

Pada kondisi *LOFA*, hilang atau berkurangnya aliran fluida pendingin akan menghilangkan atau mengurangi jumlah panas yang dipindahkan *heat exchanger* ke sistem sekunder, sehingga suhu curah air tangki reaktor. Ketika suhu curah air tangki mencapai 49 °C (untuk reaktor TRIGA 2000), maka reaktor mengalami *scram*. Panas sisa peluruhan akan berpindah ke air tangki reaktor secara konveksi alamiah.

Dalam analisis keselamatan diambil batasan bahwa panas sisa peluruhan tidak boleh menyebabkan teras reaktor kehilangan air pendingin. Berdasarkan batasan ini berarti panas sisa peluruhan harus lebih kecil dari pada panas yang dibutuhkan untuk menaikkan suhu air teras dan menguapkan air yang berada di atas teras reaktor.

B.1. *LOFA* Pada Siklus Primer

LOFA pada siklus primer terjadi sebagai akibat gagalnya pompa sistem primer atau tereduksinya aliran pendingin akibat gagalnya katup, terjadi penyumbatan pada pipa atau *heat exchanger*.

B.1.1. Gagalnya Pompa Sistem Primer

Bila pompa sistem primer gagal, panas yang terkandung dalam air tangki reaktor tidak dapat dipindahkan ke sistem sekunder. Akibatnya suhu air tangki reaktor akan melewati batas yang diizinkan. Pada kondisi gagalnya pompa sistem primer, ada dua kasus yang perlu dianalisis yaitu :

1. reaktor *shut down*
2. reaktor tidak dapat *shut down*

Bila reaktor dapat di-*shut down*-kan, maka panas peluruhan (*decay heat*) akan dipindahkan ke air tangki reaktor melalui konveksi alamiah. Panas yang berasal dari peluruhan belum cukup untuk mendidihkan air tangki sampai berubah jadi uap seluruhnya. Akibatnya integritas teras dapat terjamin dan produk fisi tidak keluar dari elemen bakar.

Bila reaktor tidak dapat di-*shut down*-kan, pendinginan oleh konveksi alamiah masih tetap dapat menjaga integritas teras reaktor. Keadaan ini telah diteliti oleh *General Atomics* pada reaktor PRR-1 dengan mengoperasikan reaktor pada daya 2400 kW, kemudian pompa primer dimatikan dan terjadi fluktuasi daya (*power chugging*) pada kisaran daya antara 1500 kW sampai 1700 kW. Pada hasil penelitian

yang telah dilakukan *General Atomics* ini, ternyata tidak terjadi kerusakan pada teras, kelongsong maupun komponen lainnya.

B.1.2. Berkurangnya Laju Alir

Laju alir pada sistem primer dapat berkurang bila terjadi kegagalan pada katup, pipa tersumbat atau terjadi penyumbatan pada *heat exchanger*. Akibat yang ditimbulkan oleh kejadian ini adalah naiknya suhu fluida yang masuk ke teras reaktor dan seterusnya suhu curah air tangki reaktor akan melewati margin keselamatan sehingga reaktor *scram* dan panas peluruhan akan berpindah ke air pendingin melalui konveksi alamiah.

B.1.3. Sistem Pendingin Primer Pecah

Untuk Reaktor TRIGA 2000 dengan daya 2000 kW, pecahnya sistem primer dapat terjadi pada sistem pemipaan maupun sekat pemisah pada *heat exchanger*. Bila pecahnya pipa primer terjadi pada bagian sebelum *heat exchanger*, maka keadaan ini akan mengurangi laju alir pada *heat exchanger*. Keadaan ini akan diikuti dengan turunnya level air tangki reaktor dan naiknya suhu air masuk ke reaktor, sehingga suhu curah air tangki juga akan melewati margin keselamatan atau level air tangki turun. Selanjutnya monitor level air (*reactor protection system*) memberikan tanda bahaya dan reaktor *scram*. Bila pecahnya pipa terjadi pada bagian setelah *heat exchanger*, maka suhu air masuk ke reaktor akan tetap, tetapi akibatnya laju alir berkurang, sehingga level air tangki reaktor akan turun dan melewati level margin keselamatan dan selanjutnya reaktor *scram*.

B.1.4. Penyumbatan Kanal Pendingin

Penyumbatan kanal pendingin Reaktor TRIGA 2000 hanya mungkin terjadi pada bagian celah antara elemen bakar dengan *top grid* dan tidak akan terjadi pada bagian bahan bakar yang aktif karena lebar celah di antara elemen bakar relatif lebih besar bila dibandingkan dengan celah antara *top grid* dengan ujung elemen bakar (tutup kelongsong). Tersumbatnya celah antara ujung elemen bakar dengan *top grid* (material penyumbat yang relatif berat) hanya akan menyebabkan ujung kelongsong elemen bakar tidak mendapat pendinginan yang cukup, sehingga suhunya meningkat.

Peningkatan suhu ujung kelongsong tidak akan berlangsung terus menerus

karena bagian ini tidak termasuk bagian aktif (tutup kelongsong). Disamping itu, adanya panas yang berpindah secara konduksi (kelongsong elemen bakar mempunyai konduktivitas panas yang baik) pada kelongsong ke daerah yang tidak ada pendinginnya dapat mengurangi terakumulasinya panas pada daerah yang tidak mendapat pendinginan tersebut. Selain itu, untuk material penyumbat yang ringan, aliran konveksi alamiah dari teras reaktor juga dapat membantu mengatasi terjadinya penyumbatan pada celah antara elemen bakar dengan *top grid* karena aliran konveksi alamiah ini bergerak ke atas dan akan menghalangi masuknya material penyumbat ke dalam celah.

B.1.5. Distribusi Daya Tidak Merata

Distribusi daya yang tidak merata dapat terjadi bila posisi batang kendali tidak seimbang, adanya eksperimen dalam teras reaktor, atau akibat pemuatan bahan bakar sehingga ada kanal yang mempunyai suhu lebih tinggi dari kanal lainnya. Untuk Reaktor TRIGA 2000, program penelitian atau eksperimen dalam teras umumnya dilakukan dengan memasukkan bahan dapat belah atau bahan yang menyerap neutron ke dalam teras. Sejauh ini metode penelitian seperti di atas ternyata tidak mengganggu unjuk kerja reaktor, karena adanya jaminan keselamatan dari elemen bakar TRIGA dengan koefisien suhu negatifnya. Perbedaan suhu pada suatu kanal juga tidak menyebabkan kanal tersebut tidak terdinginkan, karena adanya pendingin yang mengalir secara alamiah dan terus menerus sehingga keutuhan kelongsong dapat terjamin.

B.2. LOFA Pada Siklus Sekunder

B.2.1. Gagalnya Pompa Sekunder

Selama beroperasi normal, panas pada sistem sekunder berasal dari panas sistem primer yang dipindahkan melalui alat penukar panas (*heat exchanger*). Kehilangan aliran pada pompa sekunder akan menyebabkan level suhu keluar *heat exchanger* pada bagian sistem primer naik dan seterusnya suhu teras reaktor akan meningkat pula. Bila margin keselamatan terlewati (bila suhu curah air tangki reaktor mencapai 49 °C untuk reaktor TRIGA 2000), maka reaktor akan *scram*, panas peluruhan (*decay heat*) akan dipindahkan ke air pendingin melalui proses konveksi alamiah di antara susunan elemen bakar reaktor. Kondisi pendinginan secara konveksi alamiah setelah reaktor *scram* dapat menjamin integritas kelongsong

elemen bakar, sehingga kerusakan kelongsong akibat adanya *decay heat* maupun akibat kenaikan tekanan internal dapat dihindari.

B.2.2. Hilangnya Aliran Sekunder

Bila aliran fluida pada sistem sekunder berkurang akibat adanya kebocoran, maka akan terjadi kenaikan suhu keluar *heat exchanger* pada siklus primer. Keadaan ini akan menyebabkan pula suhu curah air tangki reaktor akan naik melewati margin keselamatan, sehingga reaktor *scram* dan akibat yang ditimbulkannya sama seperti bagian B.2.2.1

B.2.3. Gagalnya “Main Heat Sink”

Reaktor TRIGA 2000 mempunyai satu buah *heat exchanger* dan dua unit *cooling tower* sebagai *main heat sink*. Gagalnya sistem ini akan mengakibatkan air sistem primer yang kembali ke reaktor tidak terdinginkan. Pada keadaan ini suhu curah air tangki reaktor akan melewati margin keselamatan dan reaktor akan *scram* dan selanjutnya proses pendinginan akan terjadi seperti bagian B.2.2.1 dan B.2.2.2.

C. Kehilangan Pendingin Reaktor (*Lost of cooling accident - LOCA*)

Kehilangan pendingin pada Reaktor TRIGA 2000 dapat terjadi bila pipa sistem primer pecah, pipa *beam tube* putus atau pecahnya tangki reaktor. Peristiwa ini dapat menyebabkan naiknya suhu fluida pada tangki reaktor atau hilangnya air pendingin secara total.

C.1. Pipa Sistem Primer Pecah

Kejadian pecahnya pipa sistem primer pada Reaktor TRIGA 2000 dapat terjadi akibat adanya gaya eksternal yang bekerja pada pipa. Keadaan ini akan diiringi dengan tumpahnya air tangki reaktor ke dalam gedung reaktor. Bila pompa tetap bekerja saat pipa primer pecah, maka air tangki reaktor akan dipompakan keluar sampai ketinggian permukaan air tangki mencapai ujung pipa keluar. Tetapi sebelum air mencapai ketinggian tersebut, tanda bahaya sudah berbunyi (*reactor protection system*) dan reaktor *scram*. Akibat LOCA dengan kasus pipa primer pecah membuat reaktor tetap aman, karena panas peluruhan masih dapat berpindah ke air pendingin secara konveksi alamiah seperti pada kondisi LOFA.

C.2. Pipa “*beam tube*” Pecah

LOCA juga dapat terjadi bila pipa *beam tube* putus, sehingga air tangki reaktor keluar melalui pipa tersebut. Bila pipa *beam tube* dengan diameter 16 cm putus dan tinggi air tangki reaktor di atas teras sekitar 5 m, sementara diameter teras 2 m, maka air pendingin akan mencapai permukaan teras dalam jangka waktu 3 menit. Bila keadaan ini berlangsung terus, maka air pada tangki dapat mencapai posisi setengah ketinggian teras reaktor karena posisi *beam tube* pada ketinggian tersebut. Akibatnya suhu bahan bakar dan tekanan gas di dalam kelongsong elemen bakar akan naik, sehingga teras reaktor TRIGA 2000 perlu didinginkan dengan sistem pendingin darurat (*ECCS*).

DAFTAR PUSTAKA

1. Anonymous, Proposal for 2000 kW Upgrading of Bandung Triga Mark II Reactor, CNTR BIS Document, Bandung, 1994.
2. Anonymous, Agreement between BATAN and General Atomic for Upgrading of Bandung TRIGA Mark II Reactor, General Atomic, San Diego, 1995.
3. Anonymous, Safety Analysis Report TRIGA Malaysia, 1982.
4. J.P. Holman, Heat Transfer, MC.Graw Hill, Singapore, 1992.
5. Anonymous, Safety Guide on The Assessment of Research Reactors and Preparation of The Safety Analysis Report", IAEA Safety Series 35-G1, Vienna, April 1993.
6. Anonymous, Bid Invitation Specification for The Upgrading of Bandung TRIGA Mark II Reactor, CNTR, Document, September, 1994.
7. Anonymous, Safety Analysis Report for Upgrade of TRIGA Mark II Reactor, General Atomics, San Diego, 1996
8. Anonymous, Cooling System Bandung 2 MW Upgrade, General Atomic, San Diego, 1996.
9. Anonim, Laporan Analisis Keselamatan Reaktor TRIGA 2000, Rev. 3, PTNBR-BATAN, 20016.
10. Anonymous, Ener-Changer Plate and Frame Heat Exchanger, Baltimore Air Coil, Maryland.
11. Reinaldy Nazar, Efek Kegagalan Pompa Pendingin Primer Terhadap Karakteristik Termohidrolik Reaktor TRIGA 2000. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah LITDAS dan IPTEK Nuklir 2009, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN, Yogyakarta, 14 Juli 2009
12. Reinaldy Nazar, Pengaruh kehilangan air pendingin sekunder terhadap parameter termohidrolik teras reaktor TRIGA 2000 Bandung. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2009, Bandung, 3 Juni 2009.
13. Reinaldy Nazar, Efek Kebocoran Beamtube dan Pipa Primer Penukar Panas pada Suatu Model reaktor riset 1 MW berbahan bakar tipe silinder, Jurnal Iptek Nuklir Ganendra, Vol. 16, No. 2, Juli 2013
14. Reinaldy Nazar, Dudu AR, Masri Z. Karakteristik dan Efektifitas Menara Pendingin Reaktor TRIGA 2000. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah LITDAS dan IPTEK Nuklir 2004, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan – BATAN, Yogyakarta, 2004.
15. Reinaldy Nazar. Evaluasi karakteristik Temperatur Penukar Panas Reaktor TRIGA 2000 Bandung Untuk Berbagai Variasi Jumlah Pelat dengan Program

Komputer CFD. Proseding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir 2007, PTNBR BATAN, Bandung, 2007

16. Efrizon Umar, R Suryawinata. Perancangan dan Pemasangan Sistem Pendingin Sekunder Reaktor TRIGA MARK II 2000 kW, Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknik Nuklir; 2000

