

TRANSFER PANAS BAHAN BAKAR BEKAS DALAM SISTEM PENYIMPANAN SEMENTARA TIPE BASAH PPTA-SERPONG

Zainus Salimin

Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif - BATAN

ABSTRAK

TRANSFER PANAS BAHAN BAKAR BEKAS DALAM SISTEM PENYIMPANAN SEMENTARA TIPE BASAH PPTA - SERPONG. Fasilitas Penyimpanan Sementara - Bahan Bakar Bekas (FPS-BBB) tipe basah PPTA - Serpong dirancang menampung bahan bakar dari 25 tahun operasi Reaktor G.A. Siwabessy ditambah satu "core-unload", kapasitas maksimumnya 1.448 buah bahan bakar (ada penggantian 8 bahan bakar per siklus dan 1 tahun ada 7 siklus). Bahan bakar yang saat keluar reaktor memancarkan panas 47.590 Watt per elemen, disimpan dulu 100 hari dalam kolam reaktor sehingga panasnya menjadi 377,2 Watt per elemen, kemudian dipindah ke FPS-BBB untuk disimpan di dalam air dengan kedalaman 4 meter. Panas bahan bakar pada kapasitas maksimum FPS-BBB berharga 35 kW dan panas dari penerangan dan sumber panas yang lain adalah 5 kW, air kolam menerima panas sebesar 40 kW. Fasilitas Penyimpanan Sementara -Bahan Bakar Bekas dirancang dengan dilengkapi sistem-sistem VAC, pemurnian air, dan pendingin air sehingga suhu air kolam konstan pada 35 °C. Telah dianalisis kenaikan suhu air kolam dan ruangan pada kondisi pendingin air dan atau VAC mati melalui perhitungan transfer panas bahan bakar bekas dalam FPS. Pada kondisi air pendingin mati, VAC berjalan (suhu ruangan 25 °C), suhu air kolam akan naik 2 °C per hari, dan pada kondisi pendingin air dan sistem VAC tidak berfungsi suhu air naik 3 °C per hari dan suhu ruangan menjadi 35 °C dalam waktu ± 2 jam.

ABSTRACT

THE SPENT FUEL HEAT TRANSFER IN WET INTERIM STORAGE OF SERPONG NUCLEAR RESEARCH CENTER. The Wet Interim Storage For Spent Fuel (ISFSF) of Serpong Nuclear Research Center is designed to store the spent fuel over 25 years operation and 1 core unload of G.A. Siwabessy Reactor, the maximum capacity is 1.448 fuels in which 8 fuels exchanges per cycle for 7 cycles per year on the reactor operation. Spent fuel from reactor contain at of 47.590 Watts per fuel element which is stored in temporary reactor pool for about 100 days to decay heat into 377,2 Watts per element, and than transfered to the reactor pool in 4 m water depth. Spent fuel heat on the maximum capacity of the ISFSF is 35 kW, heat generating by light system and other heat sources are 5 kW and water pool will be received 40 kW of heat totally. The ISFSF are designed by using VAC, water purification and water cooling to maintain the constant temperature of water about 35 °C. The failure of water cooling system, the failure of water cooling system and VAC will be increased the temperature of water pool about 2 °C per day and 3 °C per day respectively. The room temperature in ISFSF will be increased into 35 °C in about 2 hours.

PENDAHULUAN

Dalam reaktor nuklir, bahan bakar menghasilkan neutron dan panas selama periode operasi. Bahan bakar dikeluarkan dari reaktor bila umur ekonomisnya telah dicapai (berdasarkan disain), bahan bakar tersebut menjadi bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas mengandung unsur-unsur

radioaktif hasil fisi, elemen transurium dan hasil aktivasi, bahan bakar tersebut mengeluarkan panas dan radiasi yang ditimbulkan oleh peluruhan unsur-unsur radioaktif.

Sasaran utama pengelolaan bahan bakar bekas adalah bahwa bahan bakar tersebut harus disimpan secara aman, ekonomis dan memenuhi ketentuan keselamatan terhadap manusia dan lingkungan sampai

bahan bakar bekas dipindah ke repository untuk penyimpanan akhir atau ke fasilitas pemrosesan ulang untuk pengambilan kembali.

Ada 2 metoda dasar dalam penyimpanan sementara bahan bakar bekas, yaitu metoda penyimpanan dalam kolam air dan metoda penyimpanan kering. Metoda penyimpanan dalam kolam air banyak dipakai, dapat menerima langsung bahan bakar yang baru saja dikeluarkan dari reaktor yang masih mempunyai kandungan panas yang cukup tinggi. Dalam kedua metoda penyimpanan tersebut, fungsi dasar fasilitas yang harus dipenuhi adalah :

1. Pengambilan panas dari bahan bakar bekas.
2. Perisai radiasi untuk mempertahankan batas tingkat radiasi yang diizinkan diterima di dalam daerah kerja.
3. Penahanan dan pengurangan unsur radioaktif guna mencegah pelepasan radionuklida ke dalam daerah kerja.

Pengambilan panas diselesaikan dengan penggunaan media pendingin seperti air atau udara. Perisai melawan radiasi diperoleh melalui penyimpanan bahan bakar secara baik dalam air pada kedalaman yang cukup atau melalui penyimpanan bahan bakar dalam ruang tertutup berperisai radiasi. Persyaratan perisai minimum adalah kurang lebih 3 meter untuk "burn-up" yang tinggi (> 30.000 MWd/ton U). Penahanan dan pengurangan unsur radioaktif diselesaikan melalui penyimpanan bahan bakar dalam air atau ruang tertutup berperisai atau di dalam kontainer, untuk menghindari pelepasan sejumlah unsur radioaktif bila terjadi kondisi kecelakaan. Yang dimaksud kondisi kecelakaan adalah rusaknya kelongsong bahan bakar. Ada 3 penyebab utama rusaknya kelongsong yaitu kerusakan fisik selama transfer, kerusakan karena bahan kimia dan temperatur maksimum kelongsong terlalu tinggi.

Bahan kelongsong logam paduan zirkonium biasa digunakan dalam pembuatan elemen bakar reaktor air berat dan reaktor air

ringan karena "cross-section" untuk neutron baik, tahan irradiasi, dan mempunyai ketahanan yang baik terhadap chemical dan benturan mekanik (properties kimia dan mekanik baik). Logam paduan zirkonium tetap stabil pada suhu kamar, meskipun begitu pada beberapa ratus derajat celcius dia dapat bereaksi sangat cepat dengan oksigen, hidrogen atau nitrogen⁽¹⁾. Pada suhu 50°C dan dalam milieu oksidasi zirkaloy, paduan zirkonium mengalami oksidasi membentuk lapisan pelindung oksidasi dan proses oksidasi berhenti. Jika temperatur terus naik lapisan pelindung akan mengelupas. Bahan plat logam paduan aluminium (98% Al, 2% Mg) digunakan dalam pembuatan elemen bakar standar MTR, logam tersebut mempunyai suhu kritis 193°C dan titik leleh 650°C. Pada suhu 100°C logam tersebut mengalami oksidasi membentuk lapisan pelindung, lapisan tersebut akan mengelupas pada suhu lebih besar 150°C. Pengelupasan lapisan pelindung tersebut menyebabkan menurunnya kualitas penahanan bahan radioaktif yang ada di dalamnya. Pengaruh temperatur penyimpanan elemen bakar yang tinggi untuk elemen bakar bekas dalam gas inert kering (misal helium atau argon) telah diselidiki yang menunjukkan bahwa tidak ada kerusakan kelongsong pada suhu 400 - 500°C⁽¹⁾.

Dalam penyimpanan sementara bahan bakar bekas baik pada penyimpanan tipe basah atau tipe kering, dilakukan kontrol kemurnian dan temperatur media pendingin, pengaruh kimia dan fisika terhadap kelongsong bahan bakar. Suhu bagian luar kelongsong harus dipertahankan di bawah 100°C dengan meng-usahakan bahan bakar tetap terendam dalam air untuk penyimpanan tipe basah. Biasanya sistem dirancang untuk operasi normal pada suhu kurang dari 40 °C dan untuk operasi abnormal pada temperatur 67 °C, sehingga kerusakan kelongsong karena pengaruh suhu dapat dihindari, penahanan material radioaktif dalam bahan bakar bekas terjamin.

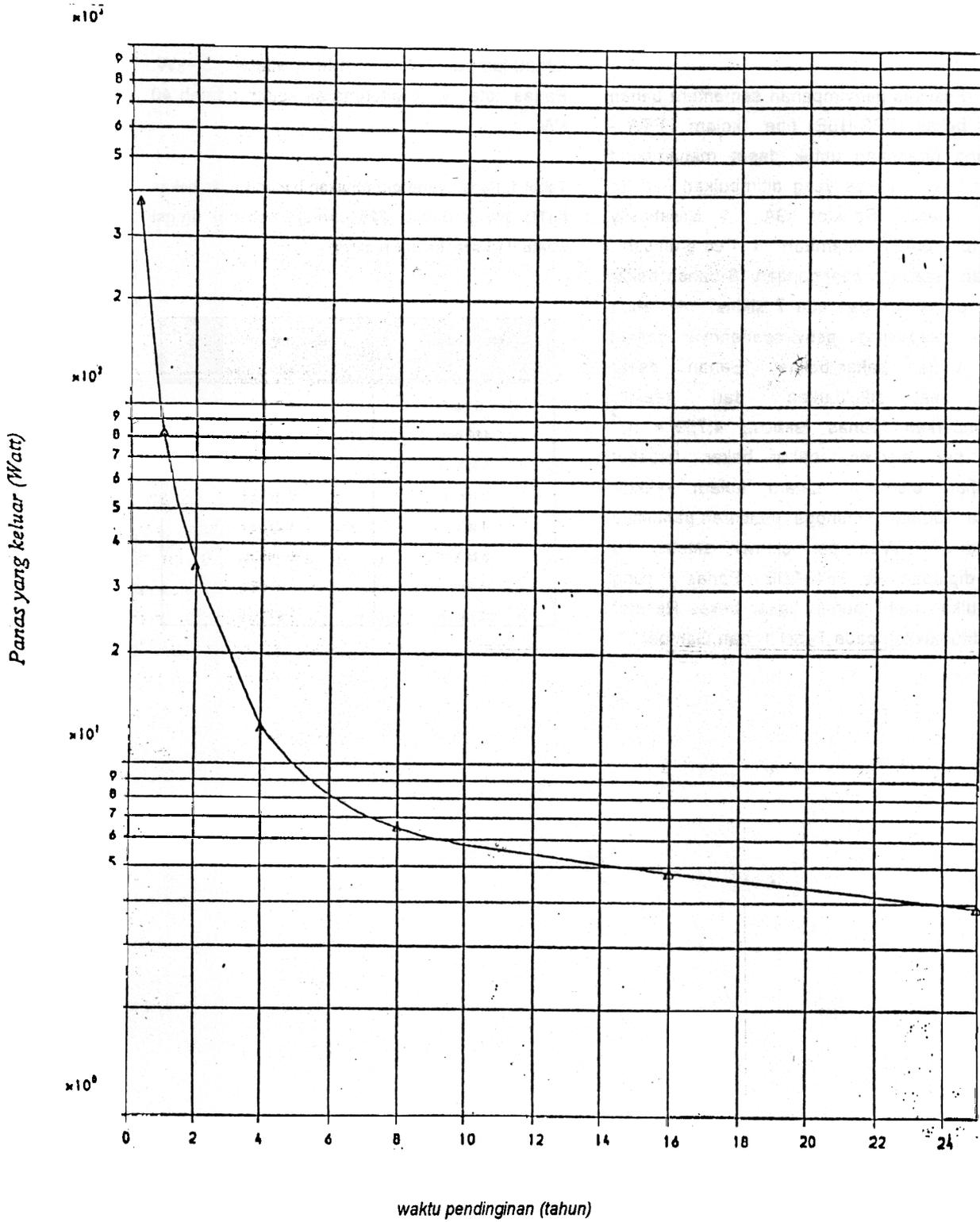
FASILITAS PENYIMPANAN SEMENTARA BAHAN BAKAR TIPE BASAH PPTA - SERPONG

Fasilitas penyimpanan sementara bahan bakar bekas (FPS-BBB) tipe kolam PPTA - Serpong dirancang untuk dapat menampung bahan bakar bekas yang ditimbulkan dari 25 tahun operasi Reaktor GA - Siwabessy (Reaktor GAS) ditambah 1 "core-unload". Dengan keadaan penggantian 8 bahan bakar bekas per siklus dan ada 7 siklus per tahun maka kapasitas penyimpanannya adalah 1.448 bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas saat dikeluarkan dari reaktor memancarkan panas sebesar $4,759 \times 10^4$ Watt per elemen, bahan bakar tersebut kemudian disimpan dalam kolam reaktor selama 100 hari sehingga pancaran panasnya menjadi 377 Watt per elemen, setelah itu baru dipindah ke FPS-BBB. Panas yang ditimbulkan oleh bahan bakar bekas Reaktor GAS ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Panas yang ditimbulkan oleh seluruh bahan bakar (pada kapasitas FPS-BBB maksimum) adalah 35 kW. Panas yang ditimbulkan oleh lampu-lampu, dan lain-lain adalah 5 kW. Panas total yang diterima air kolam adalah 40 kW.

Tabel 1. Panas yang ditimbulkan bahan bakar bekas (MTR 300 g U 235, 72%burn-up) sebagai fungsi waktu dari saat keluar reaktor

Waktu Pendinginan	Panas yang ditimbulkan (Watt/elemen)
0 hari	4,759E4
100 hari	3,772E2
1 tahun	8,262E1
2 tahun	3,475E1
4 tahun	1,273E1
8 tahun	6,485E0
16 tahun	4,819E0
25 tahun	3,877E0



Gambar 1. Grafik hubungan panas bahan bakar bekas (MTR 300 g U 235, 72% burn-up) terhadap waktu pendinginan

FPS-BBB dirancang dengan dilengkapi sistem ventilasi dan pengkondisian udara ("VAC") yang berfungsi untuk :

- Pembaharuan udara sekitar kolam penyimpanan bahan bakar bekas dengan 5 kali pembaharuan per jam.
- Mempertahankan suhu ruangan 20 s/d 25 °C.
- Mempertahankan kelembaban relatif udara ruangan 40 - 60 %.
- Mempertahankan tekanan negatif ruangan (100 ± 25 Pa).

Pada kondisi normal, sistem VAC berjalan, air kolam dipertahankan pada temperatur konstan 35 °C melalui pendinginan, air yang bersuhu 35 °C tersebut disirkulasikan dengan kecepatan alir 6 m³/jam ke sistem pendingin sehingga menjadi bersuhu 28 °C dan kemudian dikembalikan ke kolam. Sebagai pendingin digunakan air dengan suhu awal 17 °C dan suhu akhir 23 °C, air pendingin ini didinginkan oleh air dingin dari "Chiller". Skema dari sistem pendingin tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Kolam penyimpanan bahan bakar bekas mempunyai ukuran panjang 14 meter dan lebar 5 meter, bahan bakar bekas diletakkan pada 4 meter di bawah permukaan air. Pada kondisi normal tersebut di atas pengaruh suhu yang menyebabkan kerusakan bahan bakar bekas ditiadakan.

Dalam upaya untuk mengetahui

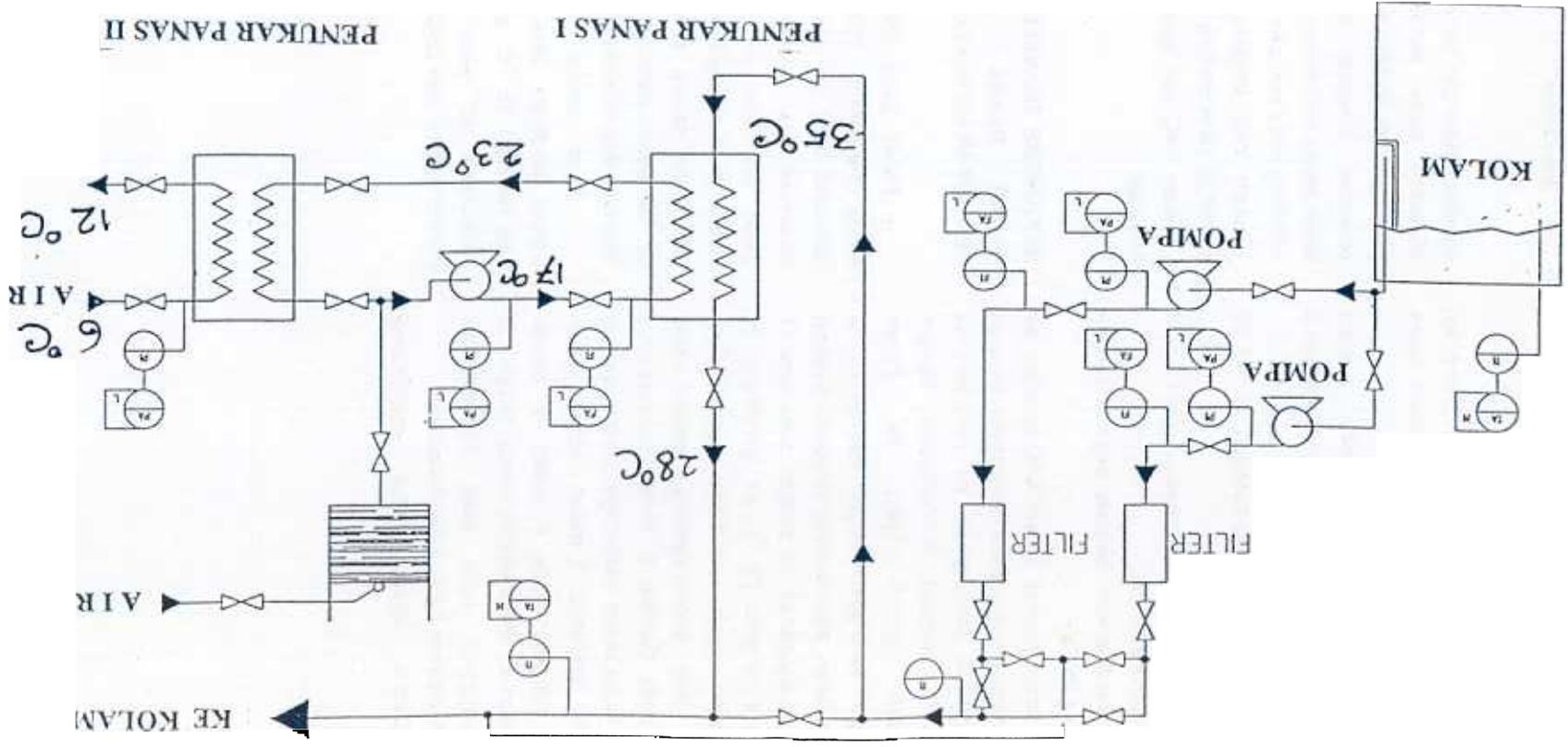
kenaikan suhu dan tindakan apa yang perlu dilakukan pada kondisi abnormal sistem pendingin air kolam dan sistem VAC, akan dilakukan evaluasi transfer panas bahan bakar bekas dari dalam kolam penyimpanan ke sekeliling pada keadaan :

- Sistem VAC berjalan normal tetapi sistem pendingin tidak berfungsi
- Sistem VAC dan sistem pendingin air tidak berfungsi

MEKANISME TRANSFER PANAS BAHAN BAKAR BEKAS DALAM KOLAM PENYIMPAN KE SEKELILING

Panas yang dipancarkan bahan bakar bekas merupakan panas peluruhan material radioaktif hasil fisi dan transurium seperti Plutonium dan Americium. Semua bahan bakar terendam air maka panas tersebut semuanya ditransfer ke air; karena air kolam didinginkan secara kontinyu melalui sirkulasi air ke sistem pendingin maka suhu air dapat dipertahankan konstan 35 °C.

Pada kondisi sistem VAC dan atau sistem pendingin tidak bekerja suhu air akan naik melebihi 35 °C, selanjutnya panas dari permukaan air akan ditransfer ke udara melalui radiasi dan konveksi.



Gambar 2 Skema sistem pendingin air kolam fasilitas penyimpanan sementara bahan bakar bekas PPTA - Serpong

Transfer panas radiasi dari permukaan air ke udara dalam ruangan

Kecepatan transfer panas radiasi mengikuti rumus (1) sebagai berikut :

$$Q_R = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

di mana :

ϵ = emisivitas air = 0,963

σ = tetapan Stefan-Boltzman
 $0,173 \times 10^{-8}$ BTU/jam.ft²(°R)⁴

A = luas permukaan air

T₁ = suhu air (°R)

T₂ = suhu udara (°R)

Transfer panas konveksi dari permukaan air (sebagai bidang permukaan panas) ke udara di atas kolam

Transfer panas konveksi dari bidang permukaan panas ke udara mengikuti rumus (2) sebagai berikut :

$$Q_C = A h_C (T_1 - T_2)$$

di mana

h_C = koefisien transfer panas konveksi

= C' (2,45)($\Delta T/L$)^{1/4}
Watt/m² °K

$\Delta T = T_1 - T_2$ dalam °K

T₁ = suhu air (°K)

T₂ = suhu udara (°K)

L = tebal fluida di mana transfer panas konveksi efektif (m)

A = luas bidang permukaan panas

Jumlah panas yang ditransfer dari permukaan air ke udara (Q_T)

Jumlah panas yang ditransfer dari permukaan air ke udara merupakan jumlahan panas radiasi dan panas konveksi.

$$Q_T = Q_R + Q_C$$

Panas yang terakumulasi dalam air (Q_A)

Panas yang terakumulasi dalam air merupakan hasil pengurangan dari panas yang dikeluarkan bahan bakar bekas (Q) dengan panas yang ditransfer ke udara (Q_T)

$$Q_A = Q - Q_T$$

Kenaikan suhu air karena panas yang terakumulasi

Panas yang terakumulasi dalam air menyebabkan suhu air naik melebihi 35 °C.

$$Q_A = m C_p \Delta T$$

di mana :

Q_A = panas yang terakumulasi dalam air

m = massa air

C_p = panas jenis air

ΔT = kenaikan suhu air (°F)

= T₁ - T₀

T₁ = suhu air awal = 35 °C

T₀ = suhu air akhir (setelah ada kenaikan suhu).

PERHITUNGAN EVALUASI SUHU AIR KOLAM PADA KONDISI SISTEM PENDINGIN DAN ATAU SISTEM VAC TIDAK BEKERJA

1. Perhitungan Evaluasi Suhu Air Kolam Pada Kondisi Sistem Pendingin Air Tidak Berfungsi dan Sistem VAC Berjalan Normal

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{Panas yang diterima air} \\
 &\text{kolam} \\
 &= 40 \text{ kW} \\
 &= 40 \times 10^3 \text{ Watt} \times 3,412 \\
 &\text{(Btu/jam)/Watt} = 136.480 \\
 &\text{Btu/jam}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Luas permukaan air kolam} &= 14 \\
 \text{m} \times 5 \text{ m} &= 70 \text{ m}^2 = 753 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Volume air kolam} \\
 &= 14 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 284 \\
 &\text{m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Massa air dalam kolam} \\
 &= 280.000 \text{ kg} \times 1/0,4536 \\
 &\text{(lb/kg)}
 \end{aligned}$$

$$= 617.284 \text{ lb}$$

Pada saat sistem pendingin air kolam tidak berfungsi, suhu air akan naik melebihi 35 °C. Dianggap sebagian panas dari air diambil oleh udara melalui transfer panas radiasi dan konveksi.

1.1. Transfer Panas Radiasi

Transfer panas radiasi mengikuti rumus

$$Q_R = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

di mana :

$$\epsilon = \text{emisivitas air} = 0,963$$

$$\begin{aligned}
 \text{Dari tabel 4.1. referensi (1) } \epsilon \\
 = 0,963
 \end{aligned}$$

σ = tetapan Stefan - Boltzman

$$= 0,173 \times 10^{-8} \text{ (Btu)/jam.ft}^2 \text{ (}^\circ\text{R)}^4$$

$$\begin{aligned}
 A &= \text{luas permukaan air} \\
 &= 753 \text{ ft}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \text{suhu air} \\
 &= 35^\circ\text{C} = 308^\circ\text{K} = 95^\circ\text{F} = \\
 &555^\circ\text{R}
 \end{aligned}$$

$$T_2 = \text{suhu udara}$$

$$\begin{aligned}
 &= 25^\circ\text{C} = 298^\circ\text{K} = 77^\circ\text{F} \\
 &537^\circ\text{R}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_R &= 0,963 \times 753 \text{ (ft}^2\text{)} \times 0,173 \times 10^{-8} \\
 &\text{(Btu)/jam ft}^2 \text{ (}^\circ\text{R)}^4 \times (555^4 - 537^4)^\circ\text{R}^4 \\
 &= 14.929 \text{ Btu / jam.}
 \end{aligned}$$

1.2. Transfer Panas Konveksi

Transfer panas konveksi dari bidang permukaan panas ke udara mengikuti rumus (2) :

$$Q_C = A h_C (T_1 - T_2)$$

di mana

h_C = koefisien transfer panas konveksi

$$= C' (2,45)(\Delta T/L)^{1/4} \text{ Watt/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$C' = \text{konstante} =$$

$$0,14$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \text{ (dalam }^\circ\text{K)} = 10^\circ\text{K}$$

L = tebal fluida dimana transfer panas konveksi efektif (m) = 1 m

A = luas bidang permukaan panas = 753 ft²

$$\begin{aligned}
 h_C &= 0,14 \times 2,45 \times \\
 &(10/1)^{1/4} = 0,61 \text{ Watt / (m}^2 \\
 &^\circ\text{K)}
 \end{aligned}$$

$$= 2,0832 \text{ Btu / (jam.m}^2 \text{ }^\circ\text{K)}$$

$$= 0,194 \text{ Btu / (jam.ft}^2 \text{ }^\circ\text{K)}$$

$$\begin{aligned}
 Q_C &= 753 \text{ ft}^2 \times 0,194 \\
 &\text{Btu / (jam.ft}^2 \text{ }^\circ\text{K)} \times 10^\circ\text{K}
 \end{aligned}$$

$$= 1.461 \text{ Btu/jam.}$$

1.3. Panas Air Kolam Yang Diambil Udara

Q_T = Panas air kolam yang diambil udara

$$= Q_R + Q_C$$

$$= (14.929 + 1.461) \text{ Btu/jam}$$

$$= 16.390 \text{ Btu/jam}$$

1.4. Panas Yang Terakumulasi Pada Air

Panas yang terakumulasi pada air =
(panas yang diterima air kolam) -
(panas air kolam yang diambil udara)

$$Q_A = Q - Q_T$$

$$= (136.480 - 16.390) \text{ Btu/jam}$$

$$= 120.090 \text{ Btu/jam}$$

1.5. Kenaikan Suhu Air Karena Panas Yang Terakumulasi

Panas yang terakumulasi pada air menyebabkan suhu air naik melebihi 35 °C.

$$Q_A = m C_p \Delta T$$

dimana

m = massa air

C_p = panas jenis air
= 1 Btu / (lb. °F)

ΔT = kenaikan suhu air
(°F)

$$Q_A = m C_p \Delta T$$

$$\Delta T = Q_A / (m \cdot C_p)$$

$$Q_A = 120.090 \text{ Btu/jam}$$

$$m = 617.284 \text{ lb} \quad \Rightarrow \quad \Delta T =$$

$$0,19^\circ \text{ F/jam} = 4,6 \text{ }^\circ \text{F/hari}$$

$$C_p = 1 \text{ Btu} / (\text{lb. } ^\circ \text{F})$$

Suhu setelah 1 hari sistem pendingin mati
= 95 °F + 4,6 °F = 99,2 °F = 37 °C

Kenaikan suhu air kolam = (37
35)°C per hari

2 °C per
hari

1.6. Keadaan "Steady State" Suhu Air Kolam

Suhu air kolam yang semula dipertahankan konstan 35 °C oleh sistem pendingin, setelah sistem pendingin tidak berfungsi temperatur air kolam akan naik 2 °C per hari dari saat matinya sistem pendingin.

Kenaikan tersebut akan berhenti pada saat panas yang diterima air dari bahan bakar hanya untuk menguapkan sejumlah air, tidak ada kenaikan suhu air, agar jumlah air dalam kolam tetap, diperlukan penambahan sejumlah air seperti jumlah yang menguap.

Dalam hal ini berlaku persamaan :

$$Q_A = M_m \times \lambda$$

dimana

Q_A = panas yang

terakumulasi

M_m = massa air yang

menguap

λ = panas penguapan

air

Asumsi diambil temperatur abnormal 67 ° C sebagai suhu kesetimbangan (sesuai dengan yang telah diuraikan dalam pendahuluan).

Suhu abnormal tersebut dicapai dari saat sistem pendingin mati selama :

$$\frac{(67^\circ \text{C} - 35^\circ \text{C})}{2^\circ \text{C} / \text{hari}} = 16 \text{ hari}$$

Dari tabel uap air pada suhu 67° C 9153 ° F) diperoleh ⁽⁷⁾: λ = 1.008 Btu / lb

Dari perhitungan sebelumnya diketahui Q_A = 120.090 Btu/jam

maka :

$$120 \text{ Btu/jam} = m_m \times 1.008$$

Btu/lb

$$m_m = 19,4$$

lb/jam

$$\approx 120 \text{ lb/jam}$$

jadi pada penambahan air sejumlah 120 lb/jam, air kolam volumenya konstan dan suhu berharga konstan 67 °C.

2. Perhitungan Evaluasi Suhu Air Kolam Pada Kondisi Sistem Pendingin Air dan VAC Tidak Berfungsi

Perhitungan waktu yang diperlukan untuk kenaikan udara dari 25 °C menjadi 35 °C.

Diambil keadaan :

- Sistem pendingin air dan VAC tidak berfungsi pada waktu yang bersamaan, pada kondisi ini (sebut t=0) suhu air = 35 °C dan suhu udara 25 °C.
- Pada saat t=0 tersebut transfer panas dari air ke udara berlangsung secara radiasi.

$$Q_R = 0,963 \times 753 \text{ ft}^2 \times 0,173 \times 10^{-8} \text{ (Btu / jam ft}^2 \text{ (}^\circ\text{R)}^4 \text{) (} 555^4 - 537^4 \text{) } ^\circ\text{R}^4$$

$$= 14.929 \text{ Btu/jam.}$$

q_1 = panas yang diperlukan untuk menaikkan suhu udara dari 25 °C menjadi 35 °C.

$$q_1 = m_1 \cdot C_p \cdot \Delta T$$

dimana:

m_1 = massa udara
 C_p = panas jenis udara [Btu/lb.°F]
 ΔT = perbedaan suhu (°F)
 Volume udara = volume ruangan

$$= 2.640 \text{ m}^3$$

$$= 93.192 \text{ ft}^3$$

dari Referensi (3) diperoleh data ρ udara = 0,074 lb/ft³

$$C_p = 0,25 \text{ Btu / (lb. } ^\circ\text{F)}$$

$$m_1 = \rho \cdot V$$

$$= (0,074 \text{ lb/ft}^3) \times (93.192 \text{ ft}^3)$$

$$= 6.896,208 \text{ lb}$$

$$q_1 = m_1 \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$C_p = 0,25 \text{ Btu / (lb. } ^\circ\text{F)}$$

$$\Rightarrow q_1 = 31.033 \text{ Btu}$$

$$\Delta T = (95-77) ^\circ\text{F}$$

Waktu yang diperkirakan untuk menaikkan suhu udara dari 25°C menjadi 35 °C adalah :

$$= \frac{31.033 \text{ Btu}}{14.929 \text{ (Btu/jam)}}$$

$$2,078 \text{ jam.}$$

$$14.929 \text{ (Btu/jam)}$$

Perhitungan kenaikan suhu air

Dalam hal ini tidak ada perpindahan panas ke udara secara radiasi. Pada kondisi sistem pendingin air dan V.A.C. tidak berfungsi, panas dari bahan bakar dalam air akan menaikkan suhu air.

Dianggap panas total yang diterima air berharga konstan = 40kW = 125.800 Btu/jam

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

dimana

Q = panas yang diterima air

m = massa air

C_p = panas jenis air

ΔT = kenaikan suhu air.

$$Q = 136.480 \text{ Btu/jam}$$

$$m = 617.284 \text{ lb}$$

$$C_p = 1 \text{ Btu/(lb. } ^\circ\text{F)}$$

$$\Rightarrow \Delta T = \frac{136.480}{617.284 \text{ lb} \times 1 \text{ Btu/(lb. } ^\circ\text{F)}}$$

$$= 0,221 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$\text{Btu/(lb. } ^\circ\text{F)}$$

$$\begin{aligned} &0,2211 \text{ } ^\circ\text{F/jam} \\ &= 0,4422 \text{ } ^\circ\text{F/2 jam} \\ &= 5,31 \text{ } ^\circ\text{F/hari} \end{aligned}$$

Setelah 2 jam sistem pendingin dan VAC tidak berfungsi, suhu air menjadi = $(95 + 0,4422) \text{ } ^\circ\text{F} = 35,245 \text{ } ^\circ\text{C}$
Setelah 1 hari sistem pendingin dan VAC tidak berfungsi, suhu air menjadi = $95 \text{ } ^\circ\text{F} + 5,31 \text{ } ^\circ\text{F} = 38 \text{ } ^\circ\text{C}$

Kenaikan suhu air kolam
= $(38 - 35) \text{ } ^\circ\text{C per hari} = 3 \text{ } ^\circ\text{C per hari}$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa pada keadaan sistem pendingin air tidak berfungsi dan sistem VAC berjalan normal, suhu air kolam akan naik $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ per hari. Kenaikan suhu tersebut bila dibiarkan akan menimbulkan :

- Kerusakan kelongsong/plat bahan bakar bekas sehingga menyebabkan terlepasnya unsur radioaktif dari bahan bakar sehingga timbul resiko penyebaran kontaminasi.
- Kehilangan air kolam karena penguapan.
- Kelembaban udara dalam ruangan mencapai kondisi kelembaban jenuh, yang menimbulkan kenaikan korosifitas terhadap bahan elektrik dan mekanik.

Pengaruh kenaikan suhu terhadap rusaknya kelongsong/plat bahan bakar bekas dapat dicegah dengan membuat konstan suhu air kolam pada kondisi abnormal $67 \text{ } ^\circ\text{C}$, melalui

penambahan air sejumlah 120 lb/jam . Dengan demikian suhu $67 \text{ } ^\circ\text{C}$ merupakan suhu kesetimbangan yang harganya konstan karena panas yang diberikan bahan bakar hanya digunakan untuk menguapkan air sebanyak 120 lb/jam . Dari perhitungan dapat diketahui setelah 16 hari dari saat sistem pendingin tidak berfungsi suhu air kolam menjadi $67 \text{ } ^\circ\text{C}$, jadi setelah 16 hari perlu dilakukan penambahan air kolam dengan debit 120 lb/jam .

Dari hasil perhitungan diperoleh hasil pada keadaan sistem pendingin air kolam dan VAC tidak berfungsi, suhu air kolam akan naik $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ per hari.

KESIMPULAN

1. Pada kapasitas maksimum penyimpanan sementara bahan bakar bekas, suhu airolam dapat dipertahankan konstan $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ melalui pendinginan dengan mensirkulasi $6 \text{ m}^3/\text{jam}$ air yang bersuhu $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ dari kolam ke sistem pendingin sehingga bersuhu $28 \text{ } ^\circ\text{C}$.
2. Pada kondisi VAC berfungsi (suhu ruangan $25 \text{ } ^\circ\text{C}$) dan sistem pendingin air mati, suhu air kolam akan naik $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ per hari dari saat matinya sistem pendingin. Kenaikan suhu tersebut akan berhenti pada saat panas yang diterima air dari bahan bakar hanya untuk menguapkan sejumlah air, tidak ada kenaikan suhu air. Suhu kesetimbangan $67 \text{ } ^\circ\text{C}$ diperoleh melalui penambahan air kolam 120 lb/jam secara kontinyu, pada suhu operasi abnormal tersebut kerusakan kelongsong karena pengaruh suhu belum ada.
3. Pada kondisi VAC dan sistem pendingin air mati, suhu air kolam akan naik $3 \text{ } ^\circ\text{C}$ per hari dan suhu ruangan menjadi $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ dalam 2 jam.

DAFTAR PUSTAKA

1. Zdenek Dlouhy, "Handling of Irradiated Fuel from Research Reactor", Czechoslovakia Nuclear Research Institute, Czechoslovakia, 1976.
2. Technical Report Series No. 240, "Guidebook on Spent Fuel Storage", IAEA, Vienna, 1984.
3. Safety Series No. 50-SGD10, "Fuel Handling Storage Systems in Nuclear Power Plants", IAEA, Vienna, 1984.
4. BATAN - IAEA Engineering Contract, "Transfer Channel and ISFSF for BATAN, Preliminary Design Package", November, 1992.
5. Donald Q. Kern, "Process Heat Transfer" Mc. GrawHill Book Co-Singapore 1965.
6. Coulson, J.M., "Chemical Engineering", 4th edition, Pergamon Press, Oxford, 1990.
7. Perry, R.H., "Chemical Engineer's Handbook", 6th edition, Mc. GrawHill International Editions, 1984.

DISKUSI

1. Pertanyaan : Irma R. Dandian

Apakah sudah diperhitungkan panas peluruhan dalam perhitungan heat transfer tersebut ?
Meningat bahan bakar selama 25 tahun yang akan disimpan dalam kolam tersebut secara bertahap tidak sekaligus.

Makalah TKRR 10, menghitung kejadian yang sama, tetapi untuk kondisi jumlah bahan bakar setelah 10 tahun, hasilnya ternyata cukup konveksi alam.

Saran : Mohon diperhitungkan jumlah loading bahan bakar berapa, diperlukan VAC dan aliran pendingin.

Jawaban :

- a. Kami sudah memperhitungkan panas peluruhan, asumsi yang diambil adalah di RSG ada 7 siklus penggantian per tahun dan ada 8 elemen bakar yang diganti per siklus, elemen bakar singgah di kolam reaktor selama 100 hari.

Panas yang dikeluarkan = $(8 \times 0,377) + (8 \times 0,377) + (8 \times a) + [(8 \times 0,377) + (8 \times a) + \dots] + \dots$

dimana : 0,377 = panas yang dikeluarkan oleh elemen bakar setelah 100 hari

a = panas yang dikeluarkan 1 elemen setelah 200 hari

- b. Makalah TKRR 10 menghitung jumlah bahan bakar setelah 10 tahun dengan asumsi bahan bakar singgah di kolam reaktor selama 2 tahun, jadi disini panas peluruhannya sudah kecil sekali sehingga wajar kalau cukup konveksi alam.

2. Pertanyaan : Heryudo K.

- a. Apakah sistem pendingin dan VAC sudah diperlukan pada saat awal pengoperasian sistem penyimpanan bahan bakar bekas ?
Kapan kedua sistem tersebut diperlukan ?
- b. Apakah peluruhan zat radioaktif sudah diperhitungkan pada kapasitas penuh penyimpanan bahan bakar bekas ?

- c. Berapa batasan suhu air tempat penyimpanan bbb yang masih dianggap aman, dan berapa batasan suhu yang dianggap membahayakan ?

Jawaban :

- a. Pada saat awal pengoperasian, jumlah bahan bakar dalam kolam sedikit, panas total yang keluar dari bahan bakar masih kecil, jumlah penguapan air kecil. Jadi belum perlu VAC ada sirkulasi alam udara, sistem pendingin belum diperlukan-hanya perlu air make-up (karena penguapan).
- b. Sudah (lihat jawaban untuk Ibu Irma).
- c. Suhu aman di bawah 67°C , suhu membahayakan di atas 100°C

3. Pertanyaan ; Henky

- a. Mengapa untuk pendinginan digunakan 2 HE, padahal suhu air terpanas $< 40^{\circ}\text{C}$.
- b. Mengapa panas radiasi dihitung padahal emisivitas air kecil dan beda temperaturnya rendah.

Jawaban :

- a. Memang digunakan 2 HE dimana HE-1 merupakan chiller yang mendinginkan air pendingin dari suhu 17°C menjadi 23°C , dan HE-2 mendinginkan air kolam dari 35°C menjadi 28°C dengan air pendingin tersebut. Jika digunakan satu HE saja dengan air yang bersuhu kamar, kapasitas mendinginkan air kolam dari 35°C jadi 28°C perlu ukuran HE yang besar dengan debit air yang besar pula.

Karena perbedaan suhu antara permukaan air dengan udara ruangan cukup besar (10°C) maka panas