

## MODEL PERHITUNGAN LAJU DOSIS SERAP RADIASI AIR PENDINGIN DI ATAS TANGKI REAKTOR

Putranto Ilham Yazid

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

MODEL PERHITUNGAN LAJU DOSIS SERAP RADIASI AIR PENDINGIN DI ATAS TANGKI REAKTOR. Sampai saat ini reaktor TRIGA Mark II Bandung dapat dioperasikan pada daya maksimum 1000 kW. Laju dosis radiasi rata-rata di atas permukaan air tangki reaktor adalah berkisar antara 60 sampai 120 mR/jam, pada saat reaktor beroperasi dengan daya maksimum 1000 kW. Dengan adanya rencana kenaikan daya reaktor menjadi 2000 kW, laju dosis radiasi di atas permukaan tangki, secara konservatif dapat diperkirakan akan meningkatkan menjadi dua kali lipat, yakni 120 sampai 240 mR/jam. Tingkat radiasi setinggi itu tentu akan membuat para pekerja radiasi, terutama para operator dan peneliti yang menjalankan percobaan di daerah disekitar permukaan tangki reaktor, terpaksa bekerja dalam waktu yang singkat dan amat terbatas, agar radiasi yang diterima mereka dapat ditekan sesedikit mungkin. Ini berarti bahwa keamanan kerja dan pelaksanaan penelitian akan semakin terbatas pula. Untuk mengatasi hal tersebut dirancang sebuah perangkat yang disebut In-Pool Decay Tank (IPDT), yakni tangki silinder konsentrik yang ditempatkan di atas reflektor, sedemikian sehingga air pendingin yang melewati teras akan tersedot ke dalamnya, sehingga inti radioaktif yang terbentuk akibat aktivasi neutron terhadap air pendingin akan meluruh (seluruhnya/sebagian besar) di dalam tangki tersebut. Karena IPDT berada di dalam kolam reaktor pada kedalaman yang cukup di bawah permukaan air tangki reaktor, maka air pendingin akan sangat efektif bertindak sebagai pelindung radiasi. Dengan demikian laju dosis radiasi di atas permukaan air tangki reaktor akan mengecil. Dalam makalah ini akan dibahas suatu model perhitungan yang dapat digunakan untuk memprakirakan laju dosis di atas tangki reaktor sebelum dan sesudah IPDT di tetapkan di dalam tangki. Persamaan-persamaan matematik yang dikembangkan ini akan dapat pula digunakan untuk merancang dimensi IPDT, sehingga dapat diperoleh ukuran yang optimum yang dibutuhkan agar perangkat tersebut dapat menekan radiasi di atas permukaan air tangki reaktor serendah mungkin.

### ABSTRACT

A CALCULATIONAL MODEL FOR RADIATION DOSE RATE OF COOLANT WATER ABOVE THE REACTOR TANK. To date, the TRIGA Mark II Bandung reactor can be operated at the maximum power level of 1000 kW. The average radiation dose rate above the reactor tank varied between 60 mR/h and 120 mR/h. This could be doubled when the reactor power is upgraded to 2000 kW. In this paper would be described a mathematical analyses for designing an In-Pool Decay Tank (IPDT), that could lower the radiation dose rate above the reactor reflector assembly. A water pump will suck the coolant into the IPDT and therefore let the coolant water decays the neutron-activated coolant in it for longer time. As the pool water above the IPDT has enough thickness (about 3.5 meters), it provides an effective shielding for reactor operators as well as experimenters who are working on the reactor deck. The analyses stresses on determination of dimensions of IPDT's geometry, the flowrate of coolant sucked into the IPDT as well as radiation dose rate on the surface of the pool water. It is assumed that the coolant water enters the reactor uniformly, meaning that it flows in a parallel pattern and has the same flowrate. In the reactor core, the coolant water is activated by neutron. Further, the coolant water will flow in the IPDT also uniformly, however, it flows downward and upward in a regular time interval through the concentric sections of IPDT. In the IPDT, the coolant is assumed to flow without being activated by neutron, The results of the analyses show that IPDT promises an effective solution in lowering the radiation dose rate above the reactor deck.

### PENDAHULUAN

Sampai saat ini reaktor TRIGA Mark II Bandung dapat dioperasikan pada daya maksimum 1000 KW. Laju dosis radiasi rata-rata di atas permukaan air tangki reaktor adalah ber-

kisar antara 60 sampai 120 mR/jam, pada saat reaktor beroperasi dengan daya maksimum 1000 KW.

Dengan adanya rencana kenaikan daya reaktor menjadi 2000 KW, laju dosis radiasi di atas permukaan tangki, secara konservatif dapat diperkirakan akan meningkat menjadi dua kali lipat. Tingkat radiasi setinggi itu tentu akan membuat para pekerja radiasi, terutama para operator reaktor dan peneliti yang menjalankan percobaan di daerah di sekitar permukaan tangki reaktor, terpaksa bekerja dalam waktu yang singkat dan amat terbatas, agar radiasi yang diterima mereka dapat ditekan sedikit mungkin. Ini berarti bahwa keamanan kerja dan pelaksanaan penelitian akan semakin terbatas pula.

Untuk mengatasi hal tersebut dirancang sebuah perangkat yang disebut *In-Pool Decay Tank* (IPDT), yakni tangki silinder konsentrik yang ditempatkan di atas reflektor, sedemikian sehingga air pendingin yang melewati teras akan tersedot ke dalamnya, sehingga inti radioaktif yang terbentuk akibat aktivasi neutron terhadap air pendingin akan meluruh (seluruhnya/sebagian besar) di dalam tangki tersebut. Karena IPDT berada di dalam kolam reaktor pada kedalaman yang cukup di bawah permukaan air tangki reaktor, maka air pendingin akan sangat efektif bertindak sebagai pelindung radiasi. Dengan demikian laju dosis radiasi di atas permukaan air tangki reaktor akan mengecil.

Dalam makalah ini akan dibahas suatu model perhitungan yang dapat digunakan untuk memprakirakan laju dosis di atas tangki reaktor sebelum dan sesudah IPDT di terapkan di dalam tangki. Persamaan-persamaan matematik yang dikembangkan ini akan dapat pula digunakan untuk merancang dimensi IPDT, sehingga dapat diperoleh ukuran yang optimum yang dibutuhkan agar perangkat tersebut dapat menekan radiasi di atas permukaan air tangki reaktor serendah mungkin.

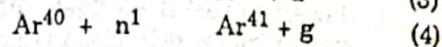
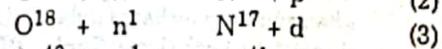
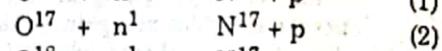
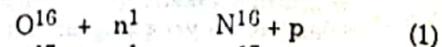
## TEORI

### Peristiwa aktivasi neutron

Radiasi di atas tangki reaktor berasal dari dua sumber utama, yakni teras reaktor dan air pendingin reaktor. Keberadaan IPDT sama sekali tidak ada atau amat kecil pengaruhnya terhadap radiasi yang berasal dari reaksi fisi maupun hasil fisi yang terjadi di dalam elemen bakar di dalam teras reaktor. Ketinggian air pendingin yang berada di atas teras reaktor adalah sekitar 5 meter. Hal ini menjadikannya

sebagai pelindung radiasi yang amat efektif. Karena itulah sumbangan teras reaktor terhadap laju dosis radiasi di atas tangki reaktor tidak diperhitungkan dalam makalah ini. Sebaliknya, air pendingin reaktor yang memasuki daerah teras reaktor dari bagian bawah akan mengalir ke permukaan tangki reaktor, baik akibat aliran alamiah ataupun sedotan pompa primer yang memompakan air pendingin dari atas tangki reaktor ke penukar panas. Dengan demikian inti radioaktif hasil aktivasi neutron terhadap air pendingin akan mencapai permukaan tangki, sehingga ia merupakan penyumbang utama radiasi di atas permukaan air tangki reaktor.

Reaksi inti yang mungkin terjadi di dalam peristiwa aktivasi neutron terhadap air pendingin antara lain:



Reaksi (1), (2) dan (3) selain berasal dari air pendingin juga berasal dari udara yang terlarut di dalamnya, sedangkan reaksi (4) adalah berasal dari udara yang terlarut di dalam air saja. Pada umumnya reaksi (1) yang biasa diperhitungkan, karena baik kelimpahan (yield) isotop, penampang reaksi mikroskopik maupun energi yang dihasilkan jauh lebih besar dibandingkan dengan reaksi-reaksi lainnya. Akan tetapi prinsip-prinsip perhitungan yang akan diterangkan berikut ini adalah sama untuk semua reaksi inti yang tersebut di atas.

Bila terdapat suatu elemen volume yang berisi inti stabil berkepadatan  $N_1$  (inti/cm<sup>3</sup>) ditembaki oleh neutron dengan fluks  $f$  (neutron/cm<sup>2</sup>/detik) sehingga berubah menjadi inti gabungan (compound nucleus)  $N_2$  (inti/cm<sup>3</sup>), maka berlakulah persamaan diferensial berikut ini:

$$\frac{dN_1}{dt} = \sigma_{ab}^1 \Phi N_1 \quad (5) = \text{kecepatan perubahan}$$

inti  $N_1$  menjadi  $N_2$ , di mana;  $\sigma_{ab}^1$  adalah penampang serap neutron total (cm<sup>2</sup>) yang merupakan gabungan dari penampang semua reaksi inti antara neutron dengan  $N_1$  yang menghasilkan inti gabungan  $N_2$ .

Jika kemudian sebagian dari  $N_2$  ternyata berubah seketika menjadi inti  $N_3$  yang radioaktif maka kecepatan pembentukan inti  $N_3$  dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{dN_3}{dt} = \sigma_{act}^1 \Phi N_1 - \sigma_{ab}^3 \Phi N_3 - \lambda N_3 \quad (6)$$

$\sigma_{act}^1$  adalah penampang reaksi aktivasi neutron terhadap inti  $N_1$ ,  $\sigma_{ab}^3$  adalah penampang serap neutron total dari inti  $N_3$ , sedangkan  $\lambda$  adalah konstanta peluruhan inti  $N_3$ .

Dengan mengambil syarat awal  $N_1(0) = N_1^0$  maka persamaan (5) akan mempunyai penyelesaian:

$$N_1(t) = N_1^0 e^{-\sigma_{ab}^1 \Phi t} \quad (7)$$

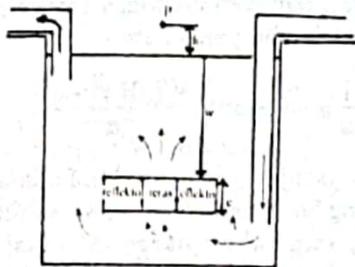
sehingga apabila  $N_3(0) = 0$  maka persamaan (6) akan dapat diselesaikan sebagai:

$$N_3(t) = \frac{\sigma_{act}^1 \Phi N_1^0}{\lambda + (\sigma_{ab}^3 - \sigma_{ab}^1) \Phi} \left( e^{-\sigma_{ab}^1 \Phi t} - e^{-(\lambda + \sigma_{ab}^3 \Phi) t} \right) \quad (8)$$

yang menyatakan kerapatan inti radioaktif (inti/cm<sup>3</sup>) yang dihasilkan oleh aktivasi neutron terhadap inti stabil  $N_1$  dengan fluks sebesar  $\Phi$  selama  $t$  detik.

*Perhitungan fluks dan laju dosis serap untuk keadaan reaktor saat ini*

Berikut ini akan dihitung fluks radiasi yang berasal dari air pendingin reaktor pada titik P yang terletak di ketinggian  $h$  dari permukaan air tangki reaktor (lihat Gambar 1).



Gambar 1. Pola aliran pendingin di dalam tangki reaktor TRIGA Mark II

Gambar 1 menunjukkan secara skematis pola aliran pendingin reaktor dengan mengabaikan pengaruh *diffuser*, yang sebenarnya akan lebih memperumit pola aliran air pendingin.

Karena letak reflektor dan teras reaktor yang sedemikian, air pendingin reaktor tidak hanya mengalir melalui teras melainkan sebagian besar justru mengalir di sekitar reflektor bagian luar. Selama berada di dalam teras reaktor, air mengalir ke atas dengan pola aliran yang dapat dianggap teratur dan searah. Sebaliknya, pada saat ia keluar dari teras maka air cenderung berbelok ke arah dinding tangki ka-

rena penampang alir tiba-tiba meluas akibat tiadanya dinding reflektor.

Untuk mengatasi kerumitan perhitungan akibat adanya pola aliran seperti di atas maka diambil suatu model aliran seperti nampak dalam Gambar 2.



Gambar 2. Model aliran untuk sistem pendingin reaktor tanpa IPDT

Pola aliran tersebut mewakili daerah air pendingin yang memberikan sumbangan radiasi yang berarti ke titik P. Air pendingin yang mengalir di sekitar reflektor bagian luar dianggap tidak ada sama sekali. Hal ini diakibatkan oleh sangat kecilnya fluks neutron di daerah tersebut dibandingkan dengan di daerah teras reaktor, sehingga aktivasi neutron terhadap air pendinginpun dapat diabaikan.

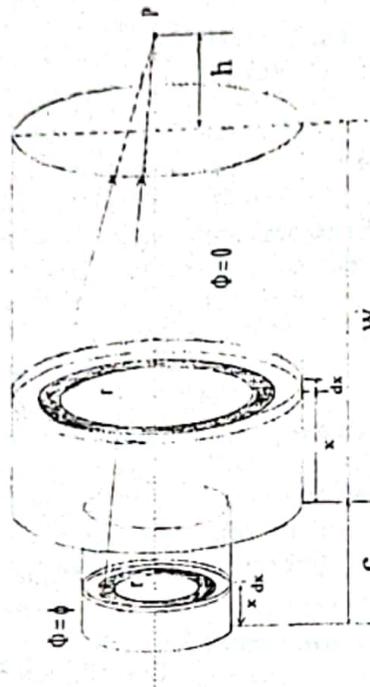
Di dalam daerah teras reaktor pola aliran adalah searah dan di sini air akan teriradiasi oleh neutron dengan fluks seragam sebesar  $\Phi$ . Pada model ini geometri teras reaktor tetap berbentuk silinder. Akan tetapi, diameter teras  $d$  tidak lagi sama dengan diameter teras yang sebenarnya (yaitu menjadi lebih kecil), karena air hanya mengalir di sela-sela batang elemen bakar.

Pada saat air meninggalkan teras reaktor, penampang aliran berubah secara tiba-tiba yakni melebar sehingga luasnya menjadi  $k \cdot A_c$  ( $k > 1$ ), walaupun pola aliran tetap teratur dan searah. Bila diterapkan dengan cermat maka harga  $k$  dapat pula digunakan untuk memperhitungkan pengaruh aliran *diffuser*. Selain pelebaran/peluasan penampang alir tersebut di atas, di daerah ini neutron dianggap sama sekali tidak ada.

Selanjutnya, perhitungan fluks radiasi total di titik P dapat dimulai dengan mengandaikan adanya elemen-elemen sumber radiasi berbentuk gelang berjari-jari dalam  $r$ , berjari-jari

luar  $r+dr$  dan tebal  $dx$  seperti nampak dalam Gambar 3.

Integrasi terhadap  $r$  dari ruas kanan persamaan di atas akan menghasilkan fluks radiasi



Gambar 3. Elemen-elemen sumber berbentuk gelang yang digunakan untuk menghitung fluks.

Jika  $S_v$  menyatakan kuat sumber persamaan volume (partikel/cm<sup>3</sup>/detik) maka setiap elemen sumber gelang akan menyumbangkan fluks radiasi sebesar:

$$d\Phi = \frac{S_v e^{-\mu b \frac{1}{a}}}{4\pi l^2} dV =$$

$$\frac{S_v e^{-\mu b \frac{\sqrt{r^2 + a^2}}{a}}}{4\pi (r^2 + a^2)} 2\pi r dr dx \quad (9)$$

- $dV$  = elemen volume (cm<sup>3</sup>);
- $\mu$  = koefisien serap linier air (cm<sup>-1</sup>);
- $b$  = tebal air yang berada di atas gelang (cm);
- $l$  = jarak dari lingkaran gelang ke titik P (cm);
- $a$  = jarak dari titik pusat gelang ke titik P (cm)

Sehingga dapat dituliskan :

$$\Phi = \int \frac{S_v e^{-\mu b \frac{1}{a}}}{4\pi l^2} dV =$$

$$\int_x \int_r \frac{S_v e^{-\mu b \frac{\sqrt{r^2 + a^2}}{a}}}{2(r^2 + a^2)} r dr dx$$

total di titik P yang berasal dari sebuah sumber berbentuk piringan. Akan tetapi integrasi tersebut tidak dapat dinyatakan secara analitik. Untuk itu diambil pendekatan :

$$\frac{1}{a} = \text{konstan} = \frac{\sqrt{(fR)^2 + a^2}}{a} \quad (10)$$

$R$  adalah jari-jari piringan dan  $f$  adalah konstanta yang berharga sedemikian sehingga dapat menjamin bahwa harga integrasi dengan menggunakan pendekatan (10) tidak lebih kecil dari harga integrasi analitik.

Dengan demikian dapatlah dinyatakan bahwa fluks radiasi total di titik P adalah merupakan integrasi dari elemen-elemen sumber yang berbentuk piringan sebesar:

$$\Phi = \int_x \frac{S_v}{2} e^{-\mu b \frac{\sqrt{(fR)^2 + a^2}}{a}} dx \int_0^R \frac{(rdr)}{r^2 + a^2} =$$

$$\int_x \frac{S_v}{4} e^{-\mu b \frac{\sqrt{(fR)^2 + a^2}}{a}} \ln \left( \frac{R^2 + a^2}{a^2} \right) dx \quad (11)$$

Persamaan di atas selanjutnya harus diselesaikan dengan memperhatikan dua daerah yang berbeda, yaitu daerah teras reaktor dan daerah di atas teras reaktor.

**Daerah teras reaktor**

Di daerah ini akan berlaku hubungan-hubungan berikut :

$$S_v = \lambda N_3 (t)$$

$t = \frac{x}{v} = \frac{A_c}{Q} x$ , dimana  $v$  adalah laju alir,  $Q$  adalah debit air pendingin ( $\text{cm}^3/\text{detik}$ ) dan  $A_c$  adalah luas penampang aliran di daerah teras ( $\text{cm}^2$ );

$a = c + w + h - x$  dan  $b = c + w - x$ ; jika pada saat memasuki teras reaktor air pendingin selalu dianggap segar, seakan-akan tidak pernah diiradiasi sebelumnya walaupun air pendingin disirkulasikan, maka untuk peristiwa aktifasi terhadap inti oksigen berlaku

$$N_1^0 = \frac{\rho}{A_{\text{water}}} N_0$$

dimana  $\rho$  adalah kerapatan massa air pendingin ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ ),  $A_{\text{water}}$  berat atom air dan  $N_0$  adalah bilangan Avogadro.

Dengan demikian fluks radiasi total di titik P yang disumbangkan oleh air pendingin yang masih berada di dalam teras reaktor adalah:

$$\Phi_c = F \int_0^c \left( e^{-\sigma_{ab}^1 \Phi \frac{A_c x}{Q}} - e^{-(\lambda + \sigma_{ab}^3 \Phi) \frac{A_c x}{Q}} \right)$$

$$e^{-\mu (c+w-x) \frac{\sqrt{(fR_c)^2 + (c+w+h-x)^2}}{(c+w+h-x)}}$$

$$\ln \left( \frac{R_c^2 + (c+w+h-x)^2}{(c+w+h-x)^2} \right) dx \quad (12)$$

dimana :

$$F = \frac{\lambda \sigma_{act}^1 \Phi \frac{\rho}{A_{\text{water}}} N_0}{4 \left[ \lambda + (\sigma_{ab}^3 - \sigma_{ab}^1) \Phi \right]}$$

$R_c$  = jari-jari penampang aliran air di daerah teras.

**Daerah di atas teras reaktor**

Di dalam daerah ini berlaku hubungan-hubungan :

$$S_v = \lambda N_3 (t_c) e^{-\lambda t} = \lambda N_3 \left( \frac{A_c}{Q} c \right) e^{-\lambda t}$$

karena di dalam daerah ini hanya terjadi peristiwa peluruhan dari inti radioaktif yang terbentuk selama air pendingin melewati teras reaktor, tanpa ada pembentukan inti radioaktif yang baru,

$t = \frac{A_w}{Q} x$ , dimana  $A_w$  adalah luas penampang aliran daerah di atas teras ( $\text{cm}^2$ );

$$a = w + h - x \text{ dan } b = w - x;$$

$N_1^0 = \frac{\rho}{A_{\text{water}}} N_0 \frac{A_c}{A_w}$ , karena luas penampang alir tiba-tiba berubah dari  $A_c$  menjadi  $A_w$ .

Dengan analogi perhitungan seperti yang diterapkan di dalam persamaan (12) di atas, akan dapat diperoleh fluks radiasi total yang disumbangkan oleh air pendingin yang berada di atas teras reaktor.

$$\Phi_w = G \int_0^w e^{-\lambda \frac{A_w}{Q} x}$$

$$e^{-\mu (w-x) \frac{\sqrt{(fR_w)^2 + (w+h-x)^2}}{(w+h-x)}}$$

$$\ln \left( \frac{R_w^2 + (w+h-x)^2}{(w+h-x)^2} \right) dx \quad (13)$$

dimana :

$$G = \frac{\lambda \sigma_{act}^1 \Phi \frac{\rho}{A_{\text{water}}} N_0 A_c}{4 \left[ \lambda + (\sigma_{ab}^3 - \sigma_{ab}^1) \Phi \right] A_w}$$

$$\left( e^{-\sigma_{ab}^1 \Phi \frac{A_c}{Q} c} - e^{-(\lambda + \sigma_{ab}^3 \Phi) \frac{A_c}{Q} c} \right)$$

$R_w$  = jari-jari penampang aliran air di atas teras reaktor.

Dengan demikian fluks radiasi total yang diterima oleh titik P yang berasal dari seluruh massa air pendingin adalah:

$$\Phi_p = \Phi_c + \Phi_w \quad (14)$$

Sedangkan laju dosis serap di titik P dapat diperoleh dari hubungan :

$$D_p = 0,05767 \frac{I_a}{\rho} E \Phi_p (\text{mrad}/\text{jam}) \quad (15)$$

$\mu_a$  = koefisien deposisi energi ( $\text{cm}^{-1}$ ),

$\rho$  = kerapatan massa ( $\text{gram}/\text{cm}^3$ );

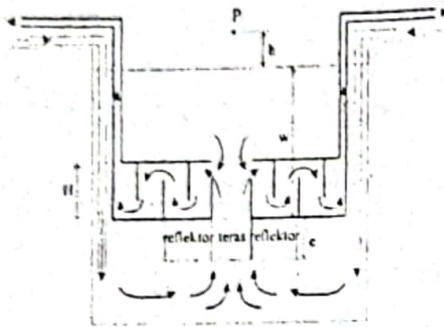
$E$  = energi photon yang dipancarkan oleh inti radioaktif (MeV)

*Perhitungan fluks dan laju dosis serap dengan adanya IPDT*

*In-Pool Decay Tank (IPDT)* adalah tangki berbentuk silinder-silinder kosentrik yang ditempatkan tepat di atas reflektor, yang berfungsi memaksa air pendingin mengalir di dalamnya sehingga tidak lagi mengalir ke atas permukaan tangki. Dengan adanya perangkat

ini maka inti-inti radioaktif yang terbentuk di dalam air pendingin akan meluruh (hampir seluruhnya) di dalam IPDT sehingga aktivitas radiasi di atas permukaan air tangki akan mengecil, karena IPDT berada jauh di bawah permukaan air tangki reaktor. Dengan demikian air pendingin benar-benar efektif berfungsi sebagai pelindung radiasi.

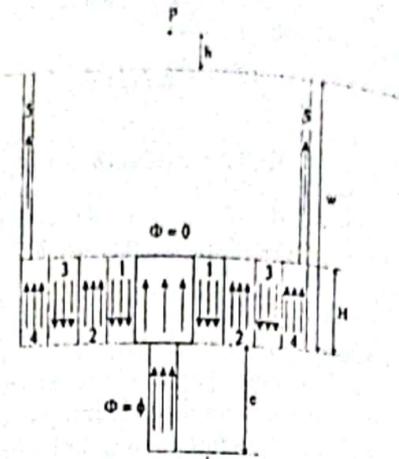
Pola aliran air pendingin reaktor dengan adanya IPDT tersebut dapat dilukiskan secara skematis pada Gambar 4.



Gambar 4. Pola aliran air pendingin reaktor yang dilengkapi dengan IPDT

Karena IPDT dirancang sedemikian sehingga menutupi seluruh permukaan reflektor bagian atas sampai ke pinggir dinding tangki, maka (hampir) seluruh air pendingin akan mengalir melewati tangki reaktor. Aliran air pendingin ke arah permukaan air tangki (akibat konveksi alamiah) akan terhalang akibat sedotan pipa primer yang dihubungkan dengan silinder konsentrik bagian terluar. Rancangan IPDT akan menyebabkan air pendingin dipaksa mengalir ke dalamnya, meliuk-liuk sesuai dengan jumlah silinder konsentrik tersebut.

Dengan kenyataan tersebut di atas maka pola aliran air dalam sistem tersebut dimodelkan seperti tampak dalam Gambar 5. Air mengalir dari bagian bawah melewati teras dengan pola aliran yang seragam. Di sini ia diaktifasi dengan fluks neutron sebesar  $\Phi$ . Karena air pendingin mengalir disela-sela batang elemen bakar maka luas penampang alir pada model ini akan lebih kecil dari ukuran luas teras reaktor yang sebenarnya. Tepat setelah keluar dari teras, penampang air tiba-tiba melebar, yakni sebesar luasan dinding IPDT yang terdalam.



Gambar 5. Model aliran air yang digunakan untuk sistem aliran pendingin dengan IPDT.

Walaupun demikian, di dalam daerah ini pola aliran tetap dianggap seragam dan teratur. Selain anggapan di atas, di daerah ini dan juga di daerah di dalam IPDT fluks neutron dianggap tidak ada sama sekali.

Selanjutnya aliran air pendingin dianggap berbalik mengarah ke bawah, yakni pada saat ia mengalir di dalam silinder konsentrik 1 di dalam IPDT, dengan pola alir yang teratur. Pola alir kembali mengarah ke atas pada saat air pendingin mengalir di dalam daerah silinder konsentrik 2. Demikian seterusnya, pola aliran akan berubah-ubah arah, yakni ke atas dan ke bawah, selama berada di dalam IPDT. Setelah melewati, daerah silinder konsentrik yang terluar, air pendingin disedot keluar melalui pipa primer. Di dalam daerah ini pola alir juga teratur dan mengarah ke atas tetapi dengan penampang alir yang jauh lebih kecil.

Untuk menghitung fluks dan laju dosis di titik P maka perhitungan dibagi atas beberapa daerah yakni :

#### Daerah di dalam teras reaktor

Persamaan (12) dapat digunakan secara langsung untuk menghitung besar fluks radiasi total,  $\Phi_c$ , yang disumbangkan oleh air pendingin yang berada daerah di dalam teras reaktor.

#### Daerah tepat di atas teras reaktor

Besar fluks radiasi yang berasal dari daerah ini,  $\Phi_w$ , dapat dihitung dengan mempergunakan persamaan (13) dengan sedikit modifikasi, yakni batas integrasi bukan lagi dari 0

sampai  $w$  melainkan hanya dari 0 sampai  $H$  saja, yaitu tinggi tabung IPDT.

Daerah silinder konsentrik 1

Untuk dapat menghitung besar fluks radiasi yang berasal dari daerah ini persamaan (10) perlu dimodifikasi sebagai berikut:

$$\frac{1}{a} = \text{konstan} = \frac{\sqrt{(R_w + f(R_1 - R_w))^2 + a^2}}{a} \quad (10a)$$

$R_w$  = jari-jari daerah tepat di atas teras reaktor  
= jari-jari dalam silinder konsentrik 1.

$R_1$  = jari-jari luar silinder konsentrik 1.

Sedangkan integritas terhadap  $r$  di dalam persamaan (11) hanya akan dilakukan mulai dari  $r = R_w$  sampai  $r = R_1$ , sehingga diperoleh :

$$\Phi = \int_x \frac{S_v}{4} e^{-\mu b \frac{\sqrt{(R_w + f(R_1 - R_w))^2 + a^2}}{a}} \ln \left( \frac{R_1^2 + a^2}{R_w^2 + a^2} \right) dx \quad (11a)$$

Dengan memperhatikan arah gerakan aliran pendingin di daerah ini, yakni ke bawah, persamaan (13) dapat dimodifikasi untuk menghitung fluks radiasi yang berasal dari air pendingin yang berada di dalam daerah silinder konsentrik 1, yaitu

$$\Phi_1 = G_1 \int_0^H e^{-\lambda \frac{A_1}{Q} x} e^{-\mu (w - H + x) \frac{\sqrt{(R_w + f(R_1 - R_w))^2 + (w - H + h + x)^2}}{(w - H + x)}} \ln \left( \frac{R_1^2 + (w - H + h + x)^2}{R_w^2 + (w - H + h + x)^2} \right) dx \quad (13a)$$

dimana :

$$G_1 = \frac{\lambda \sigma_{act}^1 \Phi \frac{\rho}{A_{water}} N_0 A_w}{4 \left[ \lambda + \left( \sigma_{ab}^3 - \sigma_{ab}^1 \right) \Phi \right] A_1} \left( e^{-\sigma_{ab}^1 \Phi \frac{A_c}{Q} c} - e^{-(\lambda + \sigma_{ab}^3 \Phi) \frac{A_c}{Q} c} \right) e^{-\lambda \frac{A_w}{Q} H} e^{-\mu_1 t_1}$$

$A_1$  = luas penampang alir di daerah silinder konsentrik 1 =  $\pi (R_1^2 - R_w^2)$

Faktor  $e^{\mu_1 t_1}$  di dalam faktor  $G_1$  digunakan untuk memperhitungkan serapan radiasi pada

dinding silinder konsentrik, di mana  $\mu_1$  adalah koefisien serap linier ( $\text{cm}^{-1}$ ) dan  $t_1$  ( $\text{cm}$ ) adalah tebal dinding silinder konsentrik.

Daerah silinder konsentrik 2

Perhitungan fluks yang di akibatkan oleh air pendingin yang berada di dalam daerah ini dihitung mirip dengan persamaan (13a). Dengan memperhatikan bahwa arah gerakan aliran di daerah ini adalah ke atas, maka dapat dinyatakan :

$$\Phi_2 = G_2 \int_0^H e^{-\lambda \frac{A_2}{Q} x} e^{-\mu (w - x) \frac{\sqrt{(R_1 + f(R_2 - R_1))^2 + (w + h - x)^2}}{(w + h - x)}} \ln \left( \frac{R_2^2 + (w + h - x)^2}{R_1^2 + (w + h - x)^2} \right) dx \quad (13b)$$

dimana :  $G_2 = G_1 \frac{A_1}{A_2} e^{-\lambda \frac{A_1}{Q} H}$

$A_2$  = luas penampang alir di daerah silinder konsentrik 2 =  $\pi (R_2^2 + R_1^2)$

$R_2$  = jari-jari silinder konsentrik 2.

Daerah silinder konsentrik 3

Karena pola aliran air di dalam daerah ini adalah sama dengan yang ada di dalam daerah silinder konsentrik 1, maka fluks radiasi yang di pancarkan dari daerah ini dapat dinyatakan sebagai :

$$\Phi_3 = G_3 \int_0^H e^{-\lambda \frac{A_3}{Q} x} e^{-\mu (w - H + x) \frac{\sqrt{(R_2 + f(R_3 - R_2))^2 + (w - H + h + x)^2}}{(w - H + h + x)}} \ln \left( \frac{R_3^2 + (w - H + h + x)^2}{R_2^2 + (w - H + h + x)^2} \right) dx \quad (13c)$$

dimana:  $G_3 = G_2 \frac{A_2}{A_3} e^{-\lambda \frac{A_2}{Q} H}$

$A_3$  = luas penampang alir di daerah silinder konsentrik 3 =  $\pi (R_3^2 + R_2^2)$

$R_3$  = jari-jari luar silinder konsentrik 3

Daerah silinder konsentrik 4

Mengingat bahwa daerah ini memiliki pola aliran yang sama dengan pola aliran dalam daerah 2, maka fluks radiasi yang berasal dari

daerah silinder konsentrik 4 dapat dinyatakan sebagai :

$$\Phi_4 = G_4 \int_0^H e^{-\lambda \frac{A_4}{Q} x} e^{-\mu \left( w-x \right) \frac{\sqrt{R_3^2 + f(R_4 - R_3)^2 + (w+h-x)^2}}{(w+h-x)}} \ln \left( \frac{R_4^2 + (w+h-x)^2}{R_3^2 + (w+h-x)^2} \right) dx \quad (13d)$$

dimana :  $G_4 = G_3 \frac{A_3}{A_2} e^{-\lambda \frac{A_3}{Q} H}$

$A_4$  = luas penampang alir di daerah silinder konsentrik 4 =  $\pi (R_4^2 + R_3^2)$

$R_4$  = jari-jari luar silinder konsentrik 4.

Sekarang, untuk suatu sistem pendingin reaktor yang dilengkapi dengan IPDT, dapatlah dihitung fluks radiasi total di titik P, yang disumbangkan oleh seluruh air pendingin reaktor yakni sebesar:

$$\Phi_P = \Phi_c + \Phi_w + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4 \quad (15)$$

Hubungan terakhir ini diperoleh apabila sumbangan radiasi yang berasal dari air pendingin yang berada di dalam daerah 5 diabaikan. Hal ini cukup dapat diterima mengingat bahwa inti radioaktif yang terkandung di dalamnya sudah cukup lama meluruh. Demikian pula dinding pipa primer di daerah 5 yang tebal, berfungsi sebagai pelindung radiasi yang baik.

Selanjutnya, persamaan (15) dapat langsung digunakan untuk menghitung laju dosis di titik P.

### PEMBAHASAN

Dari pembahasan yang dilakukan di atas terlihat beberapa hal yang perlu diperhatikan, agar persamaan-persamaan yang diturunkan tersebut dapat digunakan untuk memprakirakan laju dosis serap radiasi di atas tangki reaktor secara tepat.

Pertama adalah penentuan luas penampang alir  $A_c$  dan  $A_w$ . Hal ini akan sangat menentukan ketepatan pemilihan dan keberhasilan model yang dipakai dalam penjabaran rumus-rumus di atas.

Luasan  $A_c$ , yaitu luas penampang alir air pendingin di dalam teras reaktor, dapat ditentukan berdasarkan pengurangan antara luas penampang teras reaktor dan luasan yang ditempati oleh elemen bakar yang berada di dalam teras. Akan tetapi, dengan mengingat bah-

wa besaran ini muncul dari hubungan antara laju massa aliran pendingin Q (yang dihasilkan oleh pompa primer) dengan waktu t, maka perlu diberikan faktor koreksi yang dapat memperhitungkan pengaruh aliran alamiah di dalam teras. Aliran alamiah yang timbul akibat perbedaan suhu tersebut akan menyebabkan air pendingin menempuh waktu yang lebih singkat. Dengan demikian, sebuah faktor konstanta  $f_a$  yang berharga positif lebih kecil dari satu dapat disisipkan dalam penentuan luas  $A_c$ , yakni  $A_{cc} = f_a A_c$ , di mana  $A_{cc}$  adalah luasan  $A_c$  yang terkoreksi. Besaran inilah yang selanjutnya dipakai di dalam perhitungan fluks maupun laju dosis.

Penentuan harga luasan  $A_w$ , yakni luas penampang aliran pendingin di daerah di atas teras reaktor, dapat secara mudah dilakukan dengan tepat untuk sistem pendingin reaktor yang memiliki IPDT, karena batas pola aliran sudah jelas yaitu dinding silinder konsentrik bagian terdalam. Sebaliknya, untuk sistem aliran pendingin reaktor tanpa IPDT, harga  $A_w$  dapat dinyatakan sebagai  $k A_c$ . Harga k harus lebih besar dari satu dan maksimum dapat diambil sedemikian sehingga  $A_w$  sama dengan luasan tangki reaktor. Dalam menentukan konstanta k harus diperhatikan efek dari aliran alamiah maupun penggunaan *diffuser*. Aliran alamiah akan cenderung membuat harga k mengecil, sedangkan *diffuser* akan membuat harga k membesar. Penentuan harga k harus dilakukan dengan cermat karena besaran tersebutlah yang akan menjadi sumber utama ketidaktelitian dan kesalahan perhitungan. Karena rumitnya pola aliran air pendingin, maka cara terbaik dalam menentukan harga k tersebut adalah melalui percobaan.

Hal kedua yang patut diperhitungkan dalam penggunaan rumus yang dikembangkan di atas adalah dalam menentukan nilai konstanta f, yang berkisar antara 0 dan 1. Bila harga f diambil terlalu kecil maka perhitungan fluks dan laju dosis akan menghasilkan angka yang terlampaui besar. Sebaliknya, penetapan harga f yang mendekati satu akan terlampaui berbahaya, karena perhitungan akan menghasilkan angka yang terlampaui kecil bagi fluks dan laju dosis serap. Nilai  $f \leq 0,71$  dapatlah diambil sebagai patokan harga yang cukup konservatif.

### KESIMPULAN

Telah ditunjukkan bahwa dengan menganggap pola aliran air pendingin yang rumit dapat dimodelkan sebagai aliran yang teratur, maka perhitungan laju dosis serap di atas tang-

ki yang berasal dari air pendingin akan dengan mudah dilakukan. walaupun penyelesaian rumus perhitungan laju dosis yang diperoleh dalam makalah ini masih tidak dapat diselesaikan secara analitik, akan tetapi penyelesaian secara numerik amat mudah dilakukan. Dengan membandingkan besar laju dosis di atas tangki reaktor

pada keadaan standar dan dalam keadaan IPDT terpasang di dalam tangki, maka akan dapat ditentukan efektivitas IPDT. Dengan bantuan rumus-rumus yang telah dikembangkan di atas dapat dirancang suatu sistem IPDT yang dapat menekan laju dosis serap serendah mungkin.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Glasstone, Samuel and Milton C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, New York: D. Van Nostrand Company, Inc. (1952).
2. Amiel, Saadi and Jacob Gilat, Reaction  $O^{17}(n,p)N^{17}$  and  $O^{18}(n,d)N^{17}$  with reactor neutron, Nuclear Science and Engineering, 18 (1964) 105 - 109.
3. Lamarsh, John R., Introduction to Nuclear Theory, Massachusetts: Addison Wesley Publishing Inc. (1972).

#### DISKUSI

**K. Pringgoatmodjo:**

Kontribusi fluks di luar reflektor mohon diperhitungkan!

**P. Ilham Yazid:**

Kontribusi neutron di luar teras sangat kecil, sehingga diabaikan dalam perhitungan ini. Akan tetapi bila diperlukan, kontribusi ini dapat dihitung dengan mudah.

**Dedi Sunaryadi:**

1. Apakah pemasangan IPDT tidak mengganggu pemindahan elemen teras/elemen bakar?
2. Apakah pengaruh neutron epitermal sudah diperhitungkan?

**P. Ilham Yazid :**

1. Konstruksi IPDT tidak mengganggu pemasukan/pengeluaran elemen bakar ke/dari teras karena terletak di atas reflektor tanpa menutup lubang teras.
2. Pengaruh neutron ephitermal dapat dimasukkan ke dalam penentuan besar  $\Phi$ .