

## **ANALISIS LAJU PENGUAPAN AIR PENDINGIN PRIMER DARI TANGKI REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG**

**REINALDY NAZAR**

*Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri-BATAN  
Jl. Taman Sari No. 71, Bandung 40132 Jawa Barat  
Telp. 022.2504898, Faks 2504081*

### **Abstrak**

**ANALISIS LAJU PENGUAPAN AIR PENDINGIN PRIMER DARI TANGKI REAKTOR TRIGA 2000 BANDUNG.** Kandungan uap air di ruangan reaktor TRIGA 2000 Bandung diantaranya berasal dari penguapan air pendingin primer di tangki reaktor. Penguapan ini akan mengurangi jumlah air pendingin primer di dalam tangki reaktor, sehingga akan mempengaruhi keselamatan operasi reaktor. Mengetahui laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor ke ruangan reaktor adalah salah satu langkah penting dalam mengoperasikan reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan aman, selamat dan berkesinambungan. Pada penelitian ini telah dihitung besarnya laju penguapan air tangki reaktor TRIGA 2000 Bandung ke ruangan reaktor dan mengetahui pengaruh suhu tangki reaktor terhadap laju penguapan air tangki. Berdasarkan hasil penelitian ini diketahui bahwa, laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor; adalah 0,772 kg/jam jika daya reaktor 250 kW dan suhu air permukaan tangki 23,8 °C; 0,884 kg/jam jika daya reaktor 500 kW dan suhu air permukaan tangki 28,70 °C; 0,914 kg/jam jika daya reaktor 750 kW dan suhu air permukaan tangki 32,62 °C; 0,976 kg/jam jika daya reaktor 1000 kW dan suhu air permukaan tangki 35,58 °C; 1,033 kg/jam jika daya reaktor 1250 kW dan suhu air permukaan tangki 38,40 °C; 1,152 kg/jam jika daya reaktor 1500 kW dan suhu air permukaan tangki 42,70 °C.

*Kata kunci: Uap air, laju penguapan, air pendingin primer, reaktor TRIGA 2000 Bandung*

### **Abstract**

**VAPORIZATION RATE ANALYSIS OF PRIMARY COOLING WATER FROM TANKI OF BANDUNG TRIGA 2000 REACTOR.** Vapor content in Bandung TRIGA 2000 reactor hall comes from vaporization of primary cooling water in reactor tank. This vaporization will lessen primary cooling waters in reactor tank, so that will influence safety of operation of reactor. To knows vaporization rate of primary cooling water from reactor tank to reactor hall is one of important to operate Bandung TRIGA 2000 reactor by safely and continually. At this research has been calculated vaporization rate of tank water of Bandung TRIGA 2000 reactor to reactor hall and influence temperature of reactor tank to vaporization rate of tank water. Based on result of this research known that, vaporization rate of primary cooling water from reactor tank; it is 0,772 kg/hour if reactor power is 250 kW and tank surface water temperature is 23,8 °C; 0,884 kg/hour if reactor power is 500 kW and tank surface water temperature is 28,70 °C; 0,914 kg/hour if reactor power is 750 kW and tank surface water temperature is 32,62 °C; 0,976 kg/hour if reactor power is 1000 kW and tank surface water temperature is 35,58 °C; 1,033 kg/hour if reactor power is 1250 kW and tank surface water temperature is 38,40 °C; 1,152 kg/hour if reactor power is 1500 kW and tank surface water temperature is 42,70 °C.

*Keywords: Vapor, evaporation rate, primary cooling water, Bandung TRIGA 2000 reactor*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Kandungan uap air yang tinggi di ruang reaktor TRIGA 2000 Bandung akan mengganggu keselamatan dan kesinambungan operasi reaktor, karena uap air akan meningkatkan laju korosi pada komponen-komponen instrumentasi pengendali reaktor yang terdapat di ruangan tersebut, yang selanjutnya dapat mengakibatkan terganggunya operasi reaktor. Disamping itu, masa pakai komponen instrumentasi pengendali reaktor akan berkurang, karena komponen elektronik tersebut mempunyai sensitivitas yang tinggi terhadap uap air.

Kandungan uap air di ruang reaktor TRIGA 2000 Bandung diantaranya berasal dari uap air yang dibawa oleh udara luar ke ruang reaktor dan penguapan air tangki reaktor. Penguapan air tangki reaktor terjadi karena adanya proses transfer massa uap air dari tangki reaktor ke udara di ruang reaktor, ketika udara tidak jenuh (*unsaturated*) yang berada di atas permukaan air tangki reaktor mengalami proses transfer kalor yang disebabkan perbedaan suhu antara udara dengan permukaan air tangki tersebut.

Penguapan air tangki reaktor akan mengurangi jumlah air pendingin primer yang terdapat di dalam tangki reaktor, sehingga mempengaruhi keselamatan operasi reaktor.

Mengetahui laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor ke ruang reaktor, merupakan salah satu langkah penting dalam mengoperasikan reaktor TRIGA 2000 Bandung dengan selamat dan berkesinambungan.

### Tujuan

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menghitung besarnya laju penguapan air pendingin primer di tangki reaktor TRIGA 2000 Bandung ke ruang reaktor,
2. Mengetahui pengaruh suhu tangki reaktor terhadap laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor
3. Memprediksi waktu tercapainya batas tinggi minimum air pendingin primer di tangki reaktor untuk dilakukan penggantian air pendingin yang menguap dari tangki reaktor, sehingga secara aspek termohidrolik reaktor

TRIGA 2000 Bandung dapat beroperasi dengan selamat dan berkesinambungan.

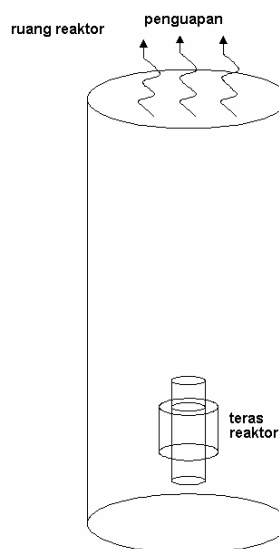
### Batasan Penelitian dan Asumsi

Berkaitan dengan kondisi reaktor TRIGA 2000 Bandung saat ini, maka penelitian dan perhitungan yang dilakukan dibatasi pada daya operasi reaktor 250 kW, 500 kW, 750 kW, 1000 kW, 1250 kW dan 1500 kW. Untuk mempermudah masalah dalam penelitian ini perlu digunakan beberapa asumsi berikut :

1. Koefisien difusi uap air ke udara relatif tetap
2. Penguapan berlangsung melalui difusi ketebalan lapisan (*superimpose*) dan transfer massa konveksi antar fasa (dari air ke udara)
3. Sistem penambah air pendingin primer (*make-up water system*) tidak beroperasi.
4. Gerakan udara di ruang reaktor diabaikan

### TEORI

Sistem tangki reaktor TRIGA 2000 Bandung seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1 memiliki ketebalan air pendingin primer 7,35 m dari permukaan air tangki. Suhu udara ruang reaktor dipengaruhi oleh suhu air tangki reaktor dan lampu penerangan ruang reaktor.



Gambar 1. Ilustrasi Penguapan Air Tangki Reaktor TRIGA 2000 Bandung

Ilustrasi terjadinya penguapan air dari permukaan tangki reaktor ke udara ruang reaktor dinyatakan pada Gambar 1. Apabila terdapat udara tidak jenuh (*unsaturated*) di atas permukaan air tangki dan adanya perbedaan suhu antara udara ruang reaktor dengan

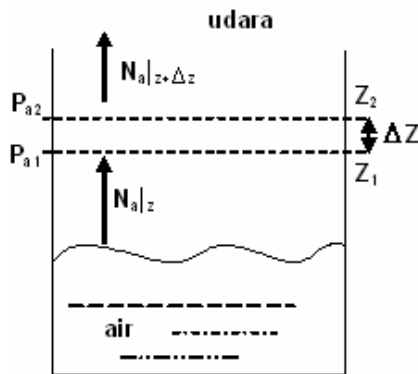
permukaan air tangki, maka akan terjadi penguapan air ke udara ruang reaktor.

Perbedaan suhu antara udara ruang reaktor dengan permukaan air tangki mengakibatkan transfer kalor. Pada keadaan setimbang, kalor yang ditransfer merupakan energi yang terbawa ketika proses penguapan terjadi. Jadi laju penguapan merupakan proses laju transfer massa antara air dengan udara, dan diantaranya dapat dihitung dengan menggunakan hukum *Fick*.

Dalam hukum *Fick* dinyatakan bahwa, jumlah fluks massa molar penguapan air merupakan proses transfer massa antar fasa secara difusi molekuler dan transfer massa secara konveksi. Hal ini dinyatakan dalam bentuk persamaan kontinuitas<sup>[1]</sup>.

$$N_a = -cD_{au} \nabla \chi_a + \chi_a (N_a - N_u) \quad (1)$$

Jika Persamaan 1 digunakan pada Gambar 2 dengan arah z positif (tegak lurus) sebagai arah tinggi tangki reaktor, maka Persamaan 1 menjadi:



Gambar 2. Proses Transfer Massa Arah ( z )

$$N_a z = -cD_{au} \frac{\partial \chi_a}{\partial z} + \chi_a (N_a z - N_u z) \quad (2)$$

$$cD_{au} \frac{\partial \chi_a}{\partial z} = \text{Faktor difusi}$$

$$\chi_a (N_a z - N_u z) = \text{Faktor bulk flow}$$

Karena laju transfer massa udara ke air ( $N_{uz}$ ) sangat kecil dibandingkan laju transfer massa air ke udara ( $N_{az}$ ) atau ( $N_{az} \gg N_{uz}$ ) maka laju transfer massa air ke udara menjadi,

$$N_a z = -\frac{cD_{au}}{1-\chi_a} \frac{\partial \chi_a}{\partial z} \quad (3)$$

$$N_a z|_{z=z_1} = -\frac{cD_{au}}{(z_2 - z_1)} \ln \frac{\chi_{a2}}{\chi_{a1}} \quad (4)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa transfer massa berhubungan dengan fraksi molar ( $\chi$ ). Persamaan 4 dapat juga dinyatakan dalam tekanan total (P) dan tekanan parsial ( $P_{a1}$  dan  $P_{a2}$ ) berikut,

$$N_a z|_{z=z_1} = -\frac{pD_{au}}{RT(z_2 - z_1)} \ln \frac{P_{a2}}{P_{a1}} \quad (5)$$

$$\text{Laju penguapan} = (N_a z) (A_{\text{tangki}}) (BM_{H_2O}) \quad (6)$$

dengan:

$N_{az}$  = fluks penguapan (gmol/detik.cm<sup>2</sup>)

$D_{au}$  = koefisien difusi air-udara  
= 0,28 cm<sup>2</sup>/detik<sup>[2]</sup>

R = konstanta gas  
= 84784 gr.cm/gmol.K)

T = suhu udara = (°C + 273)K

P = tekanan (gr/cm<sup>2</sup>)

$A_{\text{tangki}}$  = luas penampang tangki reaktor

$BM_{H_2O}$  = berat mol H<sub>2</sub>O

## TATA KERJA DAN METODE

Data deskripsi tangki reaktor TRIGA 2000 Bandung yang dinyatakan pada Tabel 1<sup>[3]</sup>, serta data-data pengukuran suhu air permukaan tangki reaktor ketika reaktor beroperasi pada daya 250 kW, 500 kW, 750 kW, 1000 kW, 1250 kW dan 1500 kW digunakan untuk menghitung besarnya laju penguapan, menentukan pengaruh suhu terhadap laju penguapan dan menghitung perubahan ketinggian air tangki reaktor dengan menggunakan korelasi empirik yang dinyatakan pada Persamaan 3, 4, 5, dan 6.

Tabel 1. Data Tangki Reaktor Triga 2000 Bandung

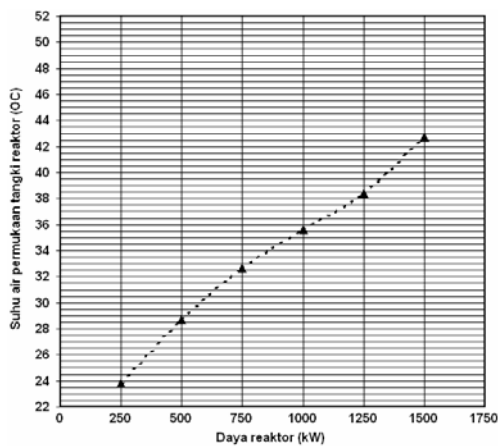
Diameter tangki reaktor	1,981 m
Tinggi tangki reaktor	7,55 m
Tinggi normal air dalam tangki reaktor	7,35 m
Tinggi minimum air dalam tangki reaktor	6,85 m

## HASIL DAN PEMBAHASAN

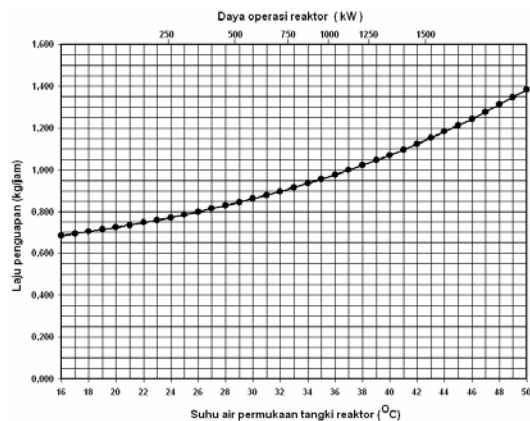
Pada Tabel 2 berikut ditampilkan data-data pengukuran suhu air pendingin pada permukaan tangki reaktor. Variasi data suhu air pendingin pada permukaan tangki reaktor TRIGA 2000 terhadap daya operasi reaktor yang dinyatakan pada Tabel 2, dapat ditampilkan dalam bentuk grafik seperti Gambar 3.

Tabel 2. Data Pengukuran Suhu Air Permukaan Tangki Reaktor

DAYA (kW)	SUHU AIR PERMUKAAN (°C)
250	23,80
500	28,70
750	32,62
1000	35,58
1250	38,40
1500	42,70



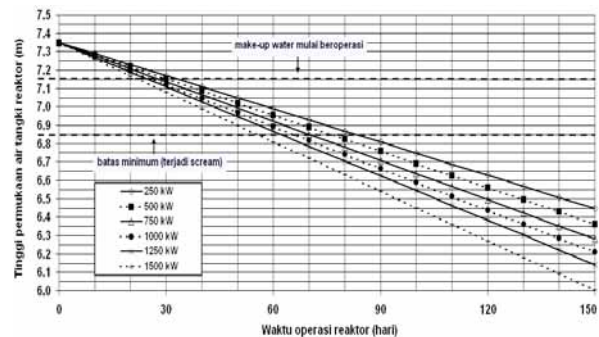
Gambar 3. Suhu Air Permukaan Tangki Terhadap Daya Operasi Reaktor



Gambar 4. Kurva Laju Penguapan Terhadap Suhu Air Permukaan Tangki

Gambar 4 memperlihatkan hubungan antara suhu air pendingin primer pada permukaan tangki reaktor dalam kaitannya dengan daya operasi reaktor dengan laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor. Naiknya suhu air permukaan tangki reaktor dalam kaitannya dengan kenaikan daya operasi reaktor, secara signifikan akan menaikkan laju penguapan air tangki reaktor. Setiap kenaikan suhu air permukaan tangki reaktor sebesar 1°C akan menaikkan laju penguapan air tangki reaktor antara 1,4% - 2,7%.

Pada Gambar 4 memperlihatkan besarnya laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor, yaitu 0,772 kg/jam jika daya reaktor 250 kW dan suhu air permukaan tangki 23,8 °C; 0,884 kg/jam jika daya reaktor 500 kW dan suhu air permukaan tangki 28,70 °C; 0,914 kg/jam jika daya reaktor 750 kW dan suhu air permukaan tangki 32,62 °C; 0,976 kg/jam jika daya reaktor 1000 kW dan suhu air permukaan tangki 35,58 °C; 1,033 kg/jam jika daya reaktor 1250 kW dan suhu air permukaan tangki 38,40°C; 1,152 kg/jam jika daya reaktor 1500 kW dan suhu air permukaan tangki 42,70 °C.



Gambar 5. Grafik Ketinggian Air Tangki Reaktor Terhadap Waktu Operasi

Gambar 5 memperlihatkan bahwa, penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor secara terus menerus karena pengoperasian reaktor dalam jangka beberapa waktu, akan mengurangi ketinggian air tangki. Jika terjadi penurunan tinggi air pendingin primer di dalam tangki hingga 20 cm atau tinggi air tangki reaktor 7,15 m, maka sistem penambah air pendingin primer (*make-up water system*) mulai beroperasi. Pada gambar ini terlihat bahwa; pada daya reaktor 250 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 33,17 hari, pada daya reaktor

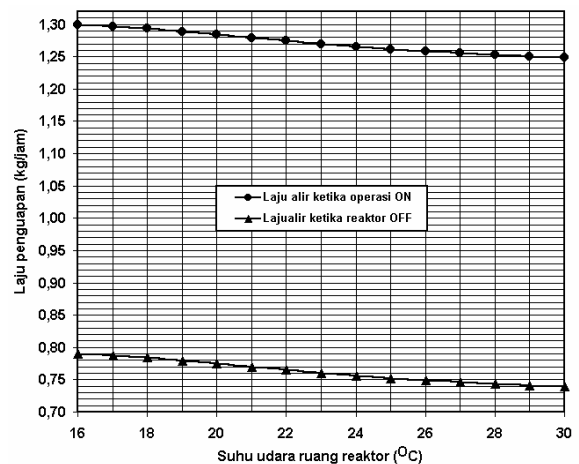
500 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 30,46 hari, pada daya reaktor 750 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 28,03 hari, pada daya reaktor 1000 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 26,32 hari, pada daya reaktor 1250 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 24,82 hari, dan pada daya reaktor 1500 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 22,22 hari.

Adapun tinggi minimum air pendingin primer di dalam tangki reaktor adalah 6,85 m, yaitu menyatakan batas dimana air pendingin primer masih dapat dialirkan ke luar tangki reaktor (penukar panas) melalui pipa primer. Jika tinggi air pendingin primer di dalam tangki reaktor < 6,85 m, maka akan terjadi *LOFA* (*lost of flow accident*).

Gambar 5 memperlihatkan juga waktu pencapaian tinggi minimum air pendingin primer di dalam tangki reaktor dengan asumsi sistem penambah air pendingin primer tidak beroperasi. Pada daya reaktor 250 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 83 hari. Pada daya reaktor 500 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 75,91 hari. Pada daya reaktor 750 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 70,14 hari. Pada daya reaktor 1000 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 65,66 hari. Pada daya reaktor 1250 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 62,10 hari. Pada daya reaktor 1500 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 55,67 hari.

Gambar 6 memperlihatkan hubungan laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor ke ruang reaktor terhadap suhu udara ruang reaktor. Pada suhu air pendingin primer dengan harga tertentu, laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor berkurang dengan naiknya suhu udara ruang reaktor. Setiap kenaikan suhu udara ruang reaktor sebesar 1 °C akan mengurangi laju penguapan air tangki reaktor antara 0,2% - 0,4%. Dalam kondisi reaktor shut down (tidak dioperasikan), jumlah penguapan air pendingin primer dari tangki relatif lebih rendah (39% - 41%) dibandingkan terhadap kondisi reaktor beroperasi. Hal ini disebabkan beda temperatur

antara ruang reaktor dengan air pendingin primer di dalam tangki lebih rendah dibandingkan terhadap beda temperatur tersebut ketika reaktor beroperasi. Meskipun demikian, kondisi reaktor tidak beroperasi memberikan kontribusi yang cukup berarti terhadap jumlah kandungan uap air di ruang reaktor.



Gambar 6. Kurva Laju Penguapan Terhadap Suhu Ruang Reaktor

Penguapan air tangki reaktor secara terus menerus akan menaikkan kelembaban udara ruang reaktor. Berdasarkan data grafik psikrometri, pada suhu udara ruang reaktor 28°C dan kelembaban udara ruang reaktor pada kisaran 75% - 80%, diketahui titik embunnya adalah 17 °C, sehingga dalam hal ini dapat dipahami bahwa kondensasi dapat terjadi jika suhu udara berada dibawah titik embunnya.

## KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan berikut :

1. Pada daya operasi reaktor 250 kW, 500 kW, 750 kW, 1000 kW, 1250 kW, dan 1500 kW diperoleh suhu air pendingin pada permukaan tangki reaktor berturut-turut 23,80 °C; 28,70 °C; 32,62 °C; 35,58 °C; 38,40 °C; dan 42,70 °C,
2. Menaikkan daya operasi reaktor, akan menaikkan suhu air permukaan tangki reaktor dan cukup signifikan pula menaikkan laju penguapan air tangki reaktor. Setiap kenaikan suhu air permukaan tangki reaktor sebesar 1°C akan menaikkan laju penguapan air tangki reaktor antara 1,4% - 2,7%.
3. Laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor adalah;

- a. 0,772 kg/jam jika daya reaktor 250 kW dan suhu air permukaan tangki 23,8 °C
  - b. 0,884 kg/jam jika daya reaktor 500 kW dan suhu air permukaan tangki 28,70 °C
  - c. 0,914 kg/jam jika daya reaktor 750 kW dan suhu air permukaan tangki 32,62 °C
  - d. 0,976 kg/jam jika daya reaktor 1000 kW dan suhu air permukaan tangki 35,58 °C
  - e. 1,033 kg/jam jika daya reaktor 1250 kW dan suhu air permukaan tangki 38,40 °C
  - f. 1,152 kg/jam jika daya reaktor 1500 kW dan suhu air permukaan tangki 42,70 °C
4. Pada suhu air pendingin primer dengan harga tertentu, laju penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor berkurang dengan naiknya suhu udara ruang reaktor. Setiap kenaikan suhu udara ruang reaktor sebesar 1°C akan mengurangi laju penguapan air tangki reaktor antara 0,2% - 0,4%.
  5. Dalam kondisi ketika reaktor *shutdown* jumlah penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor relatif lebih rendah (39% - 41%) dibandingkan ketika reaktor beroperasi. Tetapi tetap memberikan kontribusi yang cukup berarti terhadap jumlah kandungan uap air di ruang reaktor.
  6. Penguapan air pendingin primer dari tangki reaktor secara terus menerus karena pengoperasian reaktor dalam jangka beberapa waktu, akan mengurangi ketinggian air tangki.
  7. Pada daya reaktor 250 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 33,17 hari, pada daya reaktor 500 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 30,46 hari, pada daya reaktor 750 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 28,03 hari, pada daya reaktor 1000 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 26,32 hari, pada daya reaktor 1250 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 24,82 hari, dan pada daya reaktor 1500 kW tinggi air tangki reaktor 7,15 m tercapai setelah reaktor beroperasi 22,22 hari.
  8. Dengan asumsi sistem penambah air pendingin primer tidak beroperasi, maka pada daya reaktor 250 kW tinggi minimum

air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 83 hari. Pada daya reaktor 500 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 75,91 hari. Pada daya reaktor 750 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 70,14 hari. Pada daya reaktor 1000 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 65,66 hari. Pada daya reaktor 1250 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 62,10 hari. Pada daya reaktor 1500 kW tinggi minimum air tangki tercapai setelah reaktor beroperasi 55,67 hari.

#### UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih disampaikan kepada staf dan teknisi Fisika dan Termohidrolik Reaktor serta Operator dan Supervisor Sub. Bidang Operasi dan Perawatan Reaktor - Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri-BATAN atas bantuannya.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. BIRTH R.B, 2003, *Interphase Transport in Isothermal System, Transport Phenomena*, Chapter 6, New York: Dept. Of Chem. Eng. Univ. of Wisconsin, J. Wiley & Sons.
2. CUSSLER EL, 2001, *Mass Transfer in Fluid System, Part II Diffusion*. Cambridge University Press.
3. ANONYMOUS, 2001, "Safety Analysis Report TRIGA 2000 Reaktor", Revision 2, 2001. Bandung; Centre for Research and Development Nuclear Techniques – BATAN.