

KARAKTERISTIK TERMOHIDROLIK REAKTOR TRIGA 2000 UNTUK KONDISI 110 PERSEN DAYA NORMAL

Rosalina Fiantini dan Efrizon Umar

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri, BATAN, Jl. Tamansari No.71, Bandung 40132
Email: rosalina_fiantini@yahoo.com

ABSTRAK.

KARAKTERISTIK TERMOHIDROLIK REAKTOR TRIGA 2000 UNTUK KONDISI 110 PERSEN DAYA NORMAL. Analisis aspek termohidrolik teras reaktor TRIGA 2000 untuk kondisi 110% daya normal telah dilaksanakan dengan menggunakan program komputer STAT untuk menyempurnakan Laporan Analisis Keselamatan (LAK) reaktor TRIGA 2000 sesuai dengan rekomendasi Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA). Program STAT dibuat oleh General Atomic dan digunakan khusus untuk menganalisis karakteristik reaktor TRIGA 2000. Tujuan analisis termohidrolik ini adalah untuk mengkaji masalah keselamatan secara komprehensif sehingga diperoleh beberapa parameter termohidrolik teras reaktor dalam rangka meyakinkan bahwa reaktor tidak beroperasi melewati batas keselamatannya. Hasil analisis menunjukkan bahwa pendidihan film belum terjadi pada teras reaktor dan DNBR untuk daya reaktor 2200 kW dengan suhu masuk teras reaktor antara 34°C dan 40°C untuk korelasi Mc Adams besarnya berkisar antara 2,5 – 2,8 dan untuk korelasi Bernath antara 1,6 – 1,8.

Kata kunci: Laporan Analisis Keselamatan (LAK), termohidrolik, program STAT, 110 % daya normal

ABSTRACT.

THERMAL HYDRAULIC CHARACTERISTIC OF TRIGA 2000 REACTOR FOR THE 110 PERCENT NORMAL POWER. In order to accomplish the Safety Analysis Report (SAR) of TRIGA 2000 reactor according to International Atomic Energy Agency (IAEA) recommendation, the thermal hydraulic aspect's analysis of TRIGA 2000 reactor for the 110 percent normal power had been carried out by using STAT computer code. STAT code was made by General Atomic and used specifically for analysing the characteristic of TRIGA 2000 reactor. The purpose of the thermal hydraulic analysis is to considerably study the safety problems to achieve thermal hydraulic parameters in the TRIGA 2000 reactor's core in order to convince that the reactor was not operating unless in the safety condition. Result of this analysis indicated that the film boiling does not occur in the reactor core and DNBR for 2200 kW power with the inlet temperature range between 34 °C – 40 °C is about 2.5 – 2.8 for Mc Adams correlation and about 1.6 – 1.8 for Bernath correlation.

Key words: Safety Analysis Report (SAR), thermal hydraulics, STAT code, 110 % normal power

1. PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) – BATAN memiliki fasilitas reaktor riset TRIGA Mark II yang sekarang diberi nama TRIGA 2000. Pada awalnya reaktor ini dapat beroperasi dengan daya maksimum 250 kW, kemudian pada tahun

1971 daya reaktor ditingkatkan dari 250 kW menjadi 1000 kW dan telah dioperasikan dengan keadaan normal dan aman sampai tahun 1996 untuk tujuan produksi radioisotop, penelitian dan pendidikan. Kemudian pada tahun 1996, beberapa struktur, sistem dan komponen reaktor mulai diganti dalam rangka peningkatan daya (*up-grading*) dari 1000 kW menjadi 2000 kW.

Tahun 2001 reaktor TRIGA 2000 mendapat izin operasi dari BAPETEN.

Dalam beberapa tahun terakhir, masalah pendidihan (*boiling*) air pendingin dalam teras reaktor TRIGA 2000 telah menjadi *issue* penting. Kondisi aktual ini cukup berbeda dengan hasil yang dipaparkan dalam Laporan Analisis Keselamatan Reaktor yang diberikan pemasok reaktor [1]. Berkaitan dengan permasalahan tersebut, perlu dilakukan kajian masalah keselamatan secara komprehensif, termasuk kajian dari aspek termohidrolis sehingga reaktor tidak beroperasi melewati batas keselamatannya. Analisis dilakukan menggunakan metode numerik dengan memanfaatkan *computer code* yang dibuat oleh perancang reaktor [2].

Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) telah memberikan rekomendasi kepada Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri (PTNBR) – BATAN sebagai pemegang izin operasi reaktor TRIGA 2000 untuk melakukan berbagai analisis dalam rangka penyempurnaan Laporan Analisis Keselamatan reaktor yang sudah ada sehingga reaktor dapat dioperasikan berdasarkan hasil analisis yang akurat [3]. Analisis yang harus dilakukan adalah analisis karakteristik parameter termohidrolis teras reaktor untuk kondisi 110% daya normal dengan suhu masuk sesuai dengan kondisi aktual.

Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui karakteristik parameter termohidrolis teras reaktor TRIGA 2000 antara lain distribusi suhu fluida di sepanjang kanal pendingin, distribusi fluks panas pada elemen bakar, penurunan tekanan, laju aliran massa, kecepatan aliran dan fraksi uap maksimum dalam kanal pendingin serta DNBR (*Departure from Nucleate Boiling Ratio*) untuk korelasi Bernath dan Mc Adam [4,5].

2. TATA KERJA

Untuk mengetahui karakteristik parameter termohidrolis reaktor TRIGA 2000, analisis dilakukan ketika reaktor berada pada kondisi *steady state*. Reaktor berada pada daya operasi 2200 kW (110% daya normal). Suhu masuk fluida pendingin ke dalam teras reaktor divariasikan besarnya dari 34°C sampai dengan 40°C dengan interval kenaikan sebesar 1°C.

Ada beberapa asumsi yang diperlukan dalam analisis ini, yaitu sistem beroperasi dengan pendinginan konveksi alamiah, tidak ada aliran silang dari sub-buluh yang bersebelahan, reaktor diisi dengan 107 elemen bakar, suhu

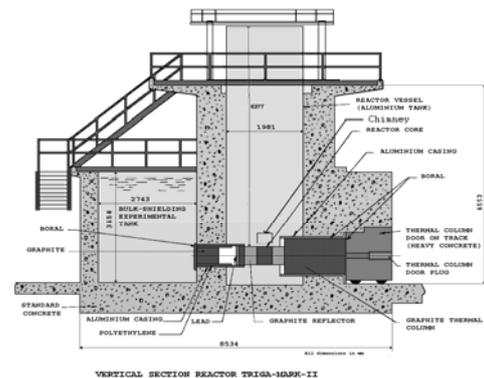
saturasi dalam teras reaktor disesuaikan untuk tekanan udara atmosfer 14,4 psi (99,284 kPa).

2.1. Parameter Input

Dalam analisis ini input data berupa data dimensi dan konstruksi teras reaktor, distribusi fluks panas dalam arah aksial, konstanta setiap korelasi yang digunakan [4,5], tekanan udara atmosfer dalam gedung reaktor, dan koefisien kerugian tekanan pada bagian masukan dan keluaran kanal pendingin [6].

Adapun penyiapan parameter input yang dilakukan dalam beberapa tahap, yaitu:

1. Studi parametrik teras reaktor yang meliputi sub-buluh dan *grid plate* serta komponen reaktor di atas teras reaktor. Pada Gambar 1 ditunjukkan penampang lintang reaktor TRIGA 2000 dan Gambar 2 penempatan elemen bakar pada teras reaktor.



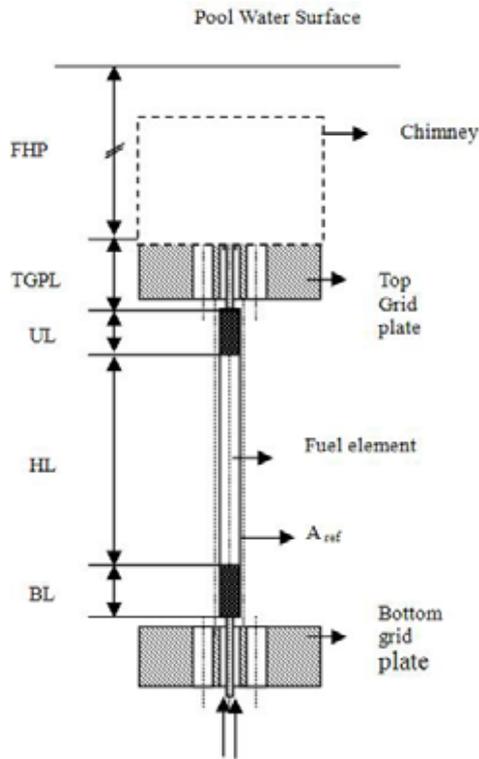
Gambar 1. Penampang vertikal reaktor TRIGA 2000

2. Distribusi fluks panas pada elemen bakar. Dalam kajian ini, persamaan distribusi fluks panas diambil berdasarkan persamaan yang ada dalam Laporan Analisis Keselamatan reaktor TRIGA 2000 [7].

Bentuk persamaan tersebut adalah:

$$Q(z) = APF \cos \left[\pi \frac{(z - \frac{zL}{2})}{Z_{ext}} \right] \left(1 + GE \exp \left[-\frac{AK \cdot z}{L} \right] \right) \quad (1)$$

dimana Z_{ext} , GE , dan AK adalah parameter yang digunakan untuk mendapatkan distribusi fluks panas dalam arah aksial berbentuk cosinus yang terpancung.



Gambar 2. Skema penempatan satu elemen bakar pada teras reaktor.

3. Persamaan perpindahan panas untuk konveksi, pendidihan serta faktor friksi. Persamaan tersebut adalah:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4} \quad (2)$$

$$Q_{boiling} = 0.249 (T_w - T_{sat})^{3.793} \quad (3)$$

$$f = \frac{0.079}{Re^{0.25}} \quad (4)$$

dimana:

T_w = suhu dinding elemen bakar (°C)

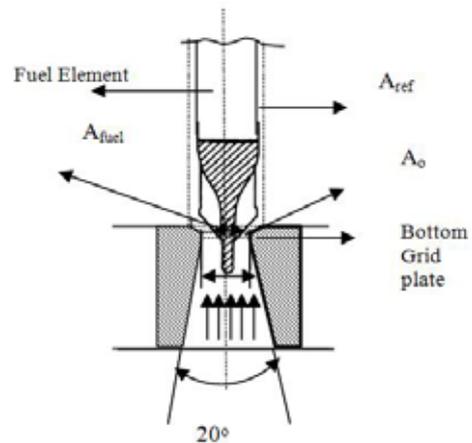
T_{sat} = suhu saturasi pada teras reaktor (°C)

Re = Reynolds number

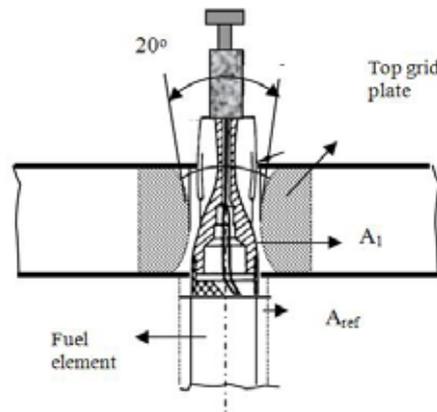
Nu = Nusselt number

Pr = Prandtl number

4. Koefisien kerugian tekanan pada bagian masukan dan keluaran subbuluh. Koefisien kerugian tekanan ini ditentukan berdasarkan data pada Gambar 3 dan 4 serta Pers. 4 s.d. Pers. 8.



Gambar 3. Posisi elemen bakar pada grid plate bawah



Gambar 4. Posisi elemen bakar pada grid plate atas

$$CL_I = CL_o \left(\frac{A_{ref}}{A_o} \right)^2 \quad (5)$$

$$A_o = A_{hole} - A_{fuel} \quad (6)$$

$$CL_E = CL_1 \left(\frac{A_{ref}}{A_1} \right)^2 \quad (7)$$

$$A_1 = A_{hole} - A_{fuel} \quad (8)$$

dimana:

CL_o = koefisien kerugian bagian masukan untuk pemasukan tajam

A_{ref} = penampang lintang referensi (m²)

A_o = luas penampang aliran minimum pada bagian masukan subbuluh (m²)

CL_1 = koefisien kerugian bagian

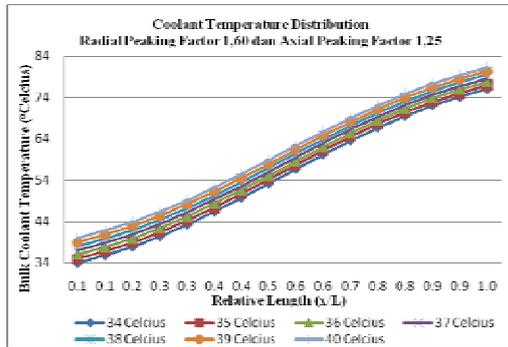
$$A_j = \frac{\text{keluaran}}{\text{luas penampang aliran minimum pada bagian keluaran subbuluh (m}^2\text{)}}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh karakteristik beberapa parameter termohidrolik pada kondisi operasi reaktor 2200 kW (110% daya normal), antara lain:

3.1. Distribusi Suhu Pendingin Arah Aksial dalam Kanal Pendingin

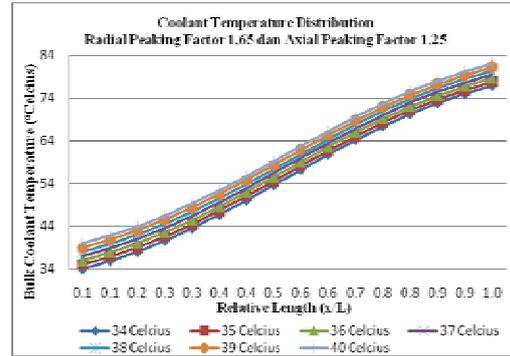
Pada Gambar 5a dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 76°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 81,18°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *radial peaking factor* 1,60 dan *axial peaking factor* 1,25.



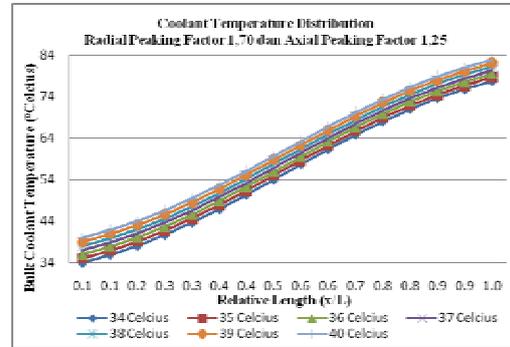
Gambar 5a. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,60 dan *axial peaking factor* 1,25

Pada Gambar 5b dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 76,89°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 82,05°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *radial peaking factor* 1,65 dan *axial peaking factor* 1,25.

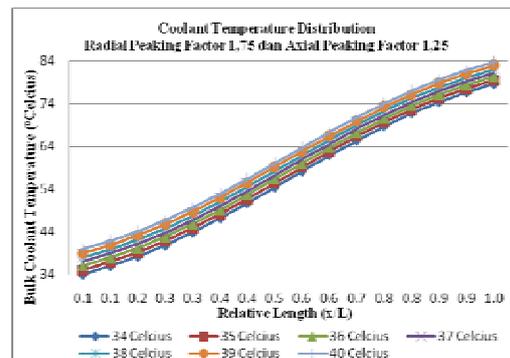
Pada Gambar 5c dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 77,76°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 82,90°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *radial peaking factor* 1,70 dan *axial peaking factor* 1,25.



Gambar 5b. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,65 dan *axial peaking factor* 1,25



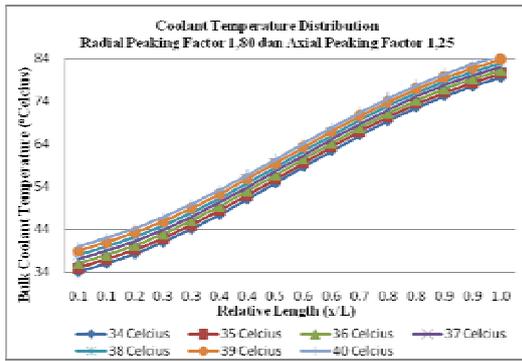
Gambar 5c. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,70 dan *axial peaking factor* 1,25



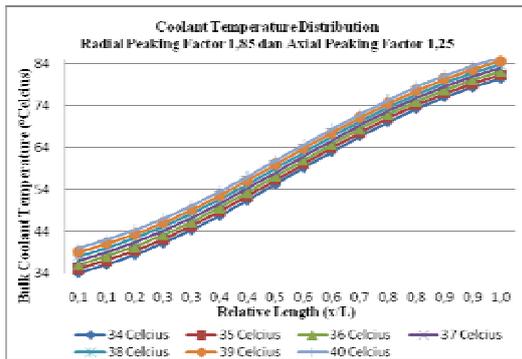
Gambar 5d. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,75 dan *axial peaking factor* 1,25

Pada Gambar 5d dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 78,63°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 83,75°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *radial peaking factor* 1,75 dan *axial peaking factor* 1,25.

Pada Gambar 5e dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 79,50°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 84,58°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *Radial Peaking Factor* 1,80 dan *Axial Peaking Factor* 1,25.



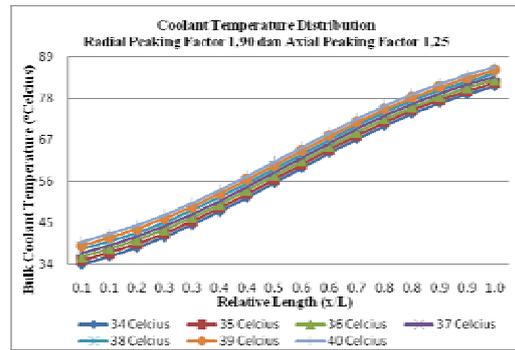
Gambar 5e. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,80 dan *axial peaking factor* 1,25



Gambar 5f. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,85 dan *axial peaking factor* 1,25

Pada Gambar 5f dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 80,39°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 85,45°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *Radial Peaking Factor* 1,85 dan *Axial Peaking Factor* 1,25.

Pada Gambar 5g dapat dilihat bahwa suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin untuk daya reaktor 2200 kW, berkisar antara 81,20°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) sampai 86,24°C (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada *radial peaking factor* 1,90 dan *axial peaking factor* 1,25.

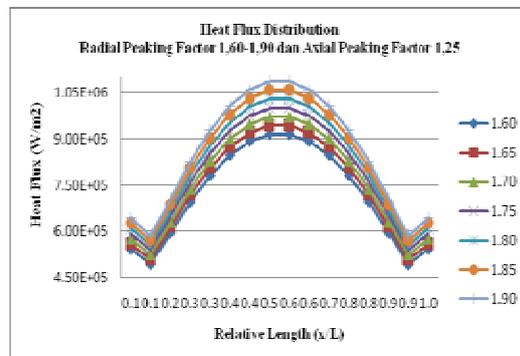


Gambar 5g. Distribusi suhu pendingin untuk *radial peaking factor* 1,90 dan *axial peaking factor* 1,25

Suhu fluida maksimum keluar dari kanal pendingin terjadi pada *Radial Peaking Factor* 1,90 dan *Axial Peaking Factor* 1,25 untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C yaitu sebesar 81,20°C dan untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C yaitu sebesar 86,24°C. Hal ini menunjukkan bahwa dalam teras reaktor belum terjadi pendidihan saturasi (*saturation boiling*) maupun pendidihan film (*film boiling*) tetapi masih dalam regim konveksi alamiah atau dapat memasuki daerah *sub-cooled boiling* karena suhu saturasi dalam teras reaktor sekitar 114 °C untuk tekanan atmosfer sekitar 14,4 psi (99,284 kPa).

3.2. Distribusi Fluks Panas pada Elemen Bakar dalam Arah Aksial

Pada Gambar 6 dapat diketahui bahwa profil distribusi *heat flux* dalam arah aksial ini berbentuk cosinus terpancung dan pada kedua ujung elemen bakar terjadi kenaikan *heat flux* yang disebabkan oleh adanya *reflector* sehingga jumlah populasi neutron meningkat sehingga kebolehdjian terjadi fisi juga meningkat.

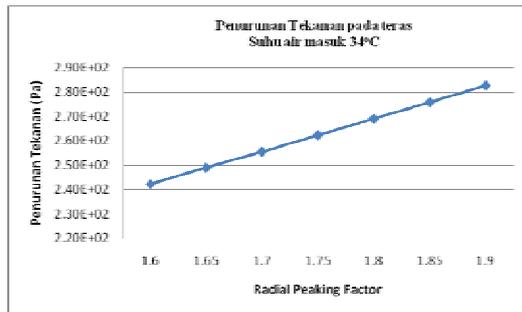


Gambar 6. Distribusi fluks panas untuk *radial peaking factor* 1,60 - 1,90 dan *axial peaking factor* 1,25

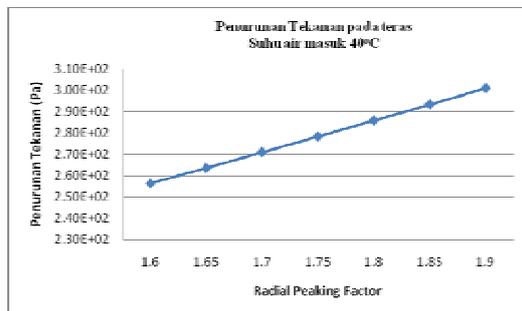
Dalam kasus ini, dalam input data dipilih nilai *power peaking* dalam arah aksial sebesar 1,25 [1].

3.3. Penurunan Tekanan pada Kanal Pendingin

Pada Gambar 7a dan 7b dapat pula dilihat besarnya penurunan tekanan dalam kanal pendingin antara kedua ujung elemen bakar.



Gambar 7a. Penurunan tekanan pada kanal pendingin untuk *radial peaking factor* 1,60 - 1,90 dan *axial peaking factor* 1,25 dengan suhu air masuk teras 34°C



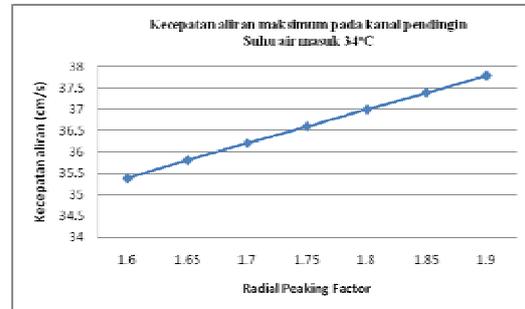
Gambar 7b. Penurunan tekanan pada kanal pendingin untuk *radial peaking factor* 1,60 - 1,90 dan *axial peaking factor* 1,25 dengan suhu air masuk teras 40°C

Penurunan tekanan terbesar diperoleh sebesar 283 Pa pada suhu air masuk 34°C dan 301 Pa pada suhu air masuk 40°C untuk daya reaktor 2200 kW. Penurunan tekanan inilah yang menyebabkan terjadinya aliran konveksi alamiah pada teras reaktor.

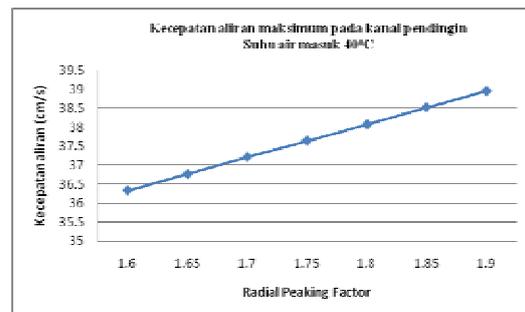
3.4. Kecepatan Aliran Maksimum dan Laju Aliran Massa pada Kanal Pendingin

Pada Gambar 8a dan 8b dapat dilihat harga kecepatan aliran maksimum pada kanal pendingin untuk beberapa nilai *Radial Peaking Factor* pada suhu air masuk 34°C dan 40°C.

Diperoleh nilai maksimum sebesar 37,79 cm/detik (untuk suhu masuk kanal pendingin 34°C) dan 38,95cm/detik (untuk suhu masuk kanal pendingin 40°C) pada saat reaktor dioperasikan pada daya 2200 kW.

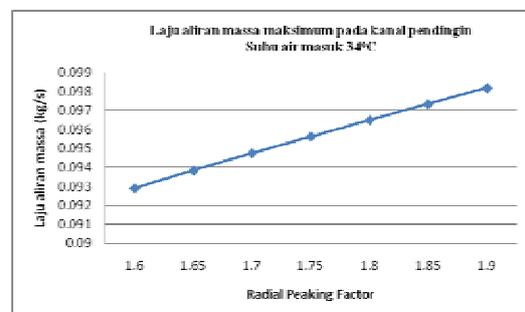


Gambar 8a. Kecepatan maksimum aliran dalam sub-buluh untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 34 °C

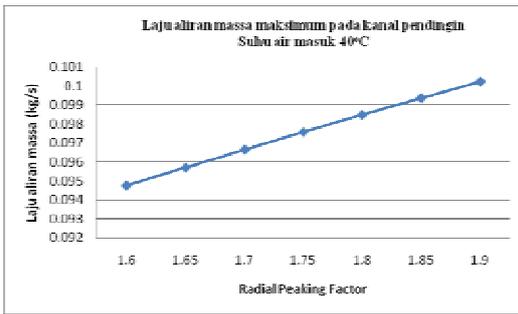


Gambar 8b. Kecepatan maksimum aliran dalam sub-buluh untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 40 °C

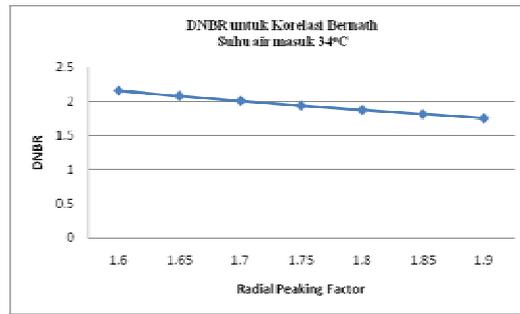
Laju aliran massa maksimum pada kanal pendingin ditampilkan pada Gambar 9a dan Gambar 9b. Dapat diketahui bahwa pada kondisi operasi 2200 kW besarnya adalah 0,098 kg/s untuk suhu air masuk 34°C dan 0,100 kg/s untuk suhu air masuk 40°C.



Gambar 9a. Laju aliran massa dalam sub-buluh terpanas untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 34 °C



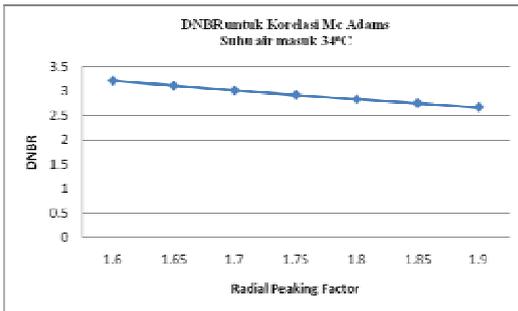
Gambar 9b. Laju aliran massa dalam sub-buluh terpanas untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 40 °C



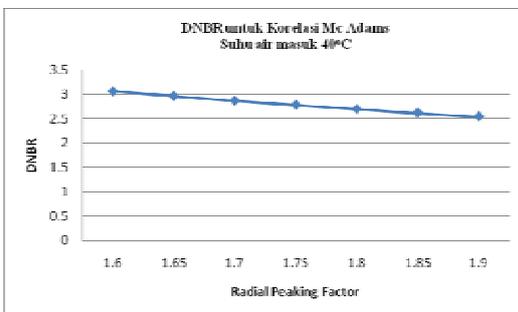
Gambar 11a. DNBR untuk korelasi Bernath untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 34°C

3.5. DNBR untuk Korelasi McAdam dan Korelasi Bernath

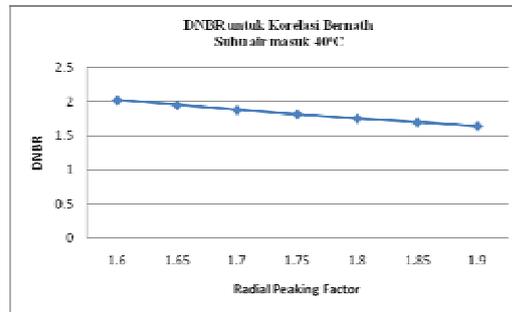
Pada Gambar 10a dan Gambar 10b, DNBR yang ditentukan berdasarkan korelasi Mc Adams besarnya berkisar antara 2,5 – 3,2 untuk reaktor beroperasi pada daya 2200 kW dengan suhu fluida masuk teras reaktor 34°C dan 40°C.



Gambar 10a. DNBR untuk korelasi Mc Adams untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 34°C



Gambar 10b. DNBR untuk korelasi Mc Adams untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 40°C

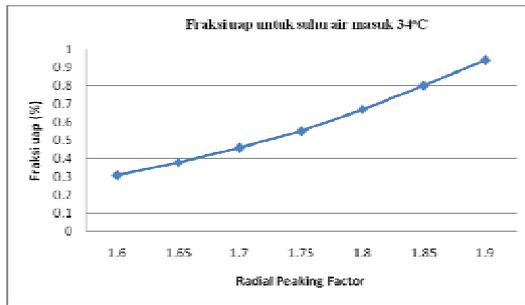


Gambar 11b. DNBR untuk korelasi Bernath untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 40°C

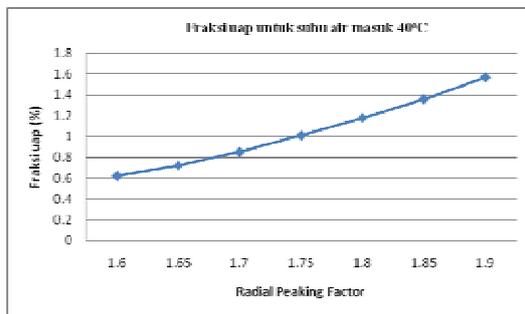
3.6. Fraksi Uap Maksimum dalam Kanal Pendingin

Besarnya fraksi uap pada kanal pendingin untuk berbagai *radial peaking factor* pada kondisi operasi 2200 kW dengan suhu fluida masuk teras reaktor yang bervariasi dapat dilihat pada Gambar 12a dan Gambar 12b. Pada Gambar 12a dapat dilihat bahwa pada kondisi 110% daya normal, untuk suhu fluida masuk 34°C, uap baru akan terbentuk ketika diberi input *radial peaking factor* sebesar 1,9. Sedangkan pada Gambar 12b dapat pula dilihat bahwa uap baru terbentuk dalam kanal pendingin pada saat reaktor diberi input *radial peaking factor* sebesar 1,75 (untuk suhu fluida masuk 40 °C).

Secara umum hasil kajian teoritis ini menunjukkan bahwa reaktor TRIGA 2000 pada kondisi operasi 110% daya normal (2200 kW) dengan suhu pendingin masuk teras reaktor bervariasi antara 34°C sampai 40°C dapat beroperasi dengan aman.



Gambar 12a. Fraksi uap untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 34°C



Gambar 12b. Fraksi uap untuk berbagai *radial peaking factor* dengan suhu air masuk teras reaktor 40°C

4. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil analisis distribusi suhu pendingin dalam kanal pendingin dan nilai DNBR untuk berbagai *radial peaking factor* dapat disimpulkan bahwa pendidihan film belum terjadi pada teras reaktor.
2. Hasil analisis ini juga menunjukkan bahwa reaktor TRIGA 2000 pada kondisi operasi

110% daya normal (2200 kW) dengan suhu pendingin masuk teras reaktor bervariasi antara 34°C sampai 40°C dapat beroperasi dengan aman.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. **GENERAL ATOMIC**, Safety Analysis Report for Upgrade of Triga Mark II Reactor, General Atomic Document (1996).
2. **PETERSEN, J.F.**, STAT: A FORTRAN Program for Calculating the Natural Convection Heat Transfer-Fluid Flow in an Array of Heated Cylinders, General Atomic (1989).
3. **ANONIM**, Rekomendasi Tim IAEA (2006).
4. **BERNATH, L.B.**, A Theory of Local Boiling Burnout and Its Application to Existing Data, Chem. Eng. Progress Symposium Series No.30, 56 (1960).
5. **McADAMS, W.H.**, "Heat Transmission", 3rd edition, McGraw-Hill Books, New York (1954).
6. **UMAR, E., KAMAJAYA, K., SUWONO, A., TANDIAN, N.P., dan HARDIANTO, T.**, Analisis Teoritis Parameter Termohidrolik Reaktor TRIGA 2000 Menggunakan STAT Code (Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknik Nuklir P3TkN-BATAN), Bandung (2005) 320-328.
7. **TIM UPGRADING REAKTOR**, Laporan Analisis Keselamatan Reaktor TRIGA 2000 Bandung, Revisi 2 (2000).