



PROGRAM KOMPUTER UNTUK EVALUASI TERMOHIDROLIK RANCANGAN ELEMEN BAKAR PELAT SEJAJAR

Bambang Herutomo, Basuki Agung Pujanto
Pusat Elemen Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

PROGRAM KOMPUTER UNTUK EVALUASI TERMOHIDROLIK RANCANGAN ELEMEN BAKAR PELAT SEJAJAR. Telah dibuat suatu program komputer untuk evaluasi Termohidrolik kondisi mantap rancangan elemen bakar pelat sejajar yang digunakan di reaktor uji dan penelitian. Evaluasi meliputi distribusi aksial temperatur sepanjang pelat (temperatur pendingin, kelongsong, dan pusat bahan bakar), temperatur permukaan kelongsong dan fluks panas untuk mulai terjadinya pendidihan inti (ONB - *Onset of Nucleate Boiling*), penurunan tekanan dan laju alir pendingin yang melintasi saluran, kondisi untuk mulai terjadinya ketidakstabilan aliran (OFI - *Onset of Flow Instability*) dan kecepatan kritis aliran pendingin yang merupakan batas atas kecepatan pendingin agar pelat elemen bakar tidak *collapse*, serta fluks panas untuk mulai terjadinya pelesatan pendidihan inti (DNB - *Departure from Nucleate Boiling*). Program dibuat berdasarkan persamaan-persamaan matematik yang direkomendasikan dalam IAEA - TECDOC No. 233. Uji coba awal program untuk elemen bakar RSG-GAS menunjukkan hasil yang memadai.

ABSTRACT

A COMPUTER PROGRAM FOR THERMOHYDRAULIC EVALUATION OF THE STRAIGHT PLATE FUEL ELEMENT. A computer program for steady state thermohydraulic evaluation of the straight plate fuel element for MTR has been made. The evaluation includes axial temperature distributions along the plate (i.e. coolant, surface cladding and fuel center temperature), surface cladding temperature, and heat flux for onset of nucleate boiling (ONB), pressure drops and flow rate through the coolant channel, the condition for flow instability and the critical velocity as an upper margin at which the fuel plate will not be collapse, and heat flux for the departure from nucleate boiling (DNB). The program was made based on equations recommended in the IAEA-TECDOC No. 233. A preliminary verification of the program for the RSG-GAS fuel elements showed appropriate results.

PENDAHULUAN

Pengembangan elemen bakar pelat untuk reaktor penelitian dan uji material (MTR - *Material Testing Reactor*) merupakan salah satu tugas pokok PEBN dan uji iradiasi terhadap rancangan elemen bakar baik elemen bakar mini maupun utuh adalah salah satu tahapan kegiatan yang harus dilakukan. Untuk menilai keselamatan rancangan elemen bakar uji tersebut, analisis kinerja Termohidrolik merupakan salah satu persyaratan dasar yang harus dilakukan. Berdasarkan analisis ini dapat diketahui apakah suatu elemen bakar masih dalam batas aman (integritas tetap terjaga) apabila disisipkan pada teras reaktor yang memiliki kondisi Termohidrolik tertentu.

Untuk elemen bakar pelat sejajar, analisis keselamatan Termohidrolik dalam kondisi mantap antara lain meliputi perhitungan distribusi aksial temperatur

sepanjang pelat elemen bakar (pendingin, permukaan kelongsong dan pusat daging bahan bakar), fluks panas untuk terjadinya awal pendidihan inti (ONB- *Onset of Nucleate Boiling*) dan pelesatan pendidihan inti (DNB- *Departure from Nucleate Boiling*), penurunan tekanan dan laju alir pendingin yang melewati saluran, fluks panas kritis dan kecepatan kritis pendingin yang menyebabkan ketidakstabilan aliran pendingin (OFI-*Onset of Flow Instability*) yang apabila harga ini dilampaui pelat bahan bakar akan rusak (*collapse*).

Untuk memudahkan dalam melakukan analisis tersebut, program komputer sederhana telah dibuat. Program diberi nama Thermo-1, ditulis dalam bahasa Fortran versi Watfor77. Persamaan-persamaan dasar yang digunakan terutama diambil dari acuan [1] dan [2]. Dalam bab berikut disajikan persamaan-persamaan yang digunakan. Arti notasi dalam persamaan dapat dilihat pada lampiran 1.

METODE KOMPUTASI

Distribusi temperatur sepanjang pelat bahan bakar

Untuk melakukan perhitungan ini, pelat elemen bakar dibagi dalam N-segmen ke arah aksial. Oleh karena itu, ketelitian hasil perhitungan tergantung pada jumlah segmen yang digunakan. Temperatur pendingin, permukaan kelongsong dan pusat bahan bakar untuk setiap segmen aksial adalah sebagai berikut :

Temperatur Pendingin

Temperatur pendingin rata-rata dalam segmen ke-N adalah

$$T_p(N) = \frac{T_{PN}(M) + T_{PN}(M+1)}{2} \quad (1)$$

dalam hal ini, $T_{PN}(M)$ dan $T_{PN}(M+1)$ adalah temperatur pendingin pada titik segmen ke M dan M+1, dan $M = 0, 1, 2, \dots, N+1$

$$T_{PN}(M+1) = T_{PN}(M) + \frac{20 W_h \cdot q''(N) \cdot \Delta L}{W \cdot G \cdot t_w \cdot C_p} \quad (2)$$

$$T_{PN}(0) = T_m$$

Temperatur Permukaan Luar Kelongsong

$$T_s(N) = T_p(N) + \frac{q''(N)}{h} \quad (3)$$

$$h = 0,023 \frac{k_p}{100 De} Re^{0,8} Pr^{0,4}$$

$$De = \frac{2 \cdot t_w}{[1 + t_w / W]}$$

$$Re = \frac{G \cdot De}{100 \mu}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_p} 10^3$$

Temperatur Pusat Bahan Bakar

Apabila diasumsikan tidak terdapat penahanan aliran panas antara permukaan dalam kelongsong dengan daging bahan bakar, maka temperatur di pusat bahan bakar adalah :

$$T_F(N) = T_S(N) + q''(N) \left[\frac{t_c}{k_c} + \frac{t_m}{2k_f} \right] \quad (4)$$

Distribusi Aksial Fluks Panas

Program menyediakan dua pilihan untuk masukan fluks panas, yaitu (1) fluks panas diinputkan secara langsung untuk masing-masing segmen, atau (2) menggunakan distribusi fluks panas ideal dalam bentuk sinus, maka besarnya fluks panas rata-rata untuk segmen ke-N adalah :

$$q''(N) = \frac{q''_{\max} L_b}{\pi [L(N) - L(N-1)]} \left[\cos \frac{\pi}{L_b} L(N-1) - \cos \frac{\pi}{L_b} L(N) \right] \quad (5)$$

Penurunan Tekanan

Total penurunan tekanan pendingin yang mengalir melintasi pelat-pelat bahan bakar pada umumnya terdiri atas penurunan tekanan akibat pendingin masuk dan keluar *end boxes* atas dan bawah, serta penurunan tekanan akibat gesekan dengan pelat bahan bakar.

$$\Delta P_f = \frac{\rho \cdot U^2}{2} \left[K + \frac{4 \cdot f \cdot L_c}{De} + \left(1 - \frac{Ac}{Ao} \right)^2 \right] \times 10^{-5} \quad (6)$$

Kecepatan Kritis Aliran Pendingin

Untuk pendingin yang masuk elemen bakar melampaui kecepatan kritisnya, pelat-pelat elemen bakar menjadi tidak stabil (vibrasi) dan apabila terjadi defleksi yang relatif besar akan menyebabkan pemanasan lokal berlebih, atau secara ekstrim dapat mem-*blockage* aliran pendingin. Menurut Miller, kecepatan alir kritis pendingin yang melintasi pelat sejajar adalah:

$$V_{kritis} = \left[\frac{15 \cdot 10^5 \cdot E (t_p^3 - t_m^3) t_w}{\rho \cdot W^4 (1 - \mu^2)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Untuk keperluan desain, kecepatan kritis pendingin dibatasi sampai 2/3 dari kecepatan kritis yang diturunkan oleh Miller tersebut^[1].

Awal pendidihan Inti (ONB-Onset of Nucleate Boiling)

Meskipun ONB bukan kriteria pembatas dalam desain suatu elemen bakar, ONB perlu diidentifikasi secara jelas untuk pertimbangan perpindahan panas, seperti aliran satu fasa dengan aliran dua fasa. Pendidihan inti akan terjadi apabila temperatur permukaan kelongsong melebihi temperatur saturasi pendingin. Menurut Bagles dan Rohsenow, temperatur permukaan kelongsong untuk mulainya pendidihan inti adalah:

$$T_s = T_{SAT} + \frac{5}{9} \left[\frac{9,23 \cdot q''_{ONB}(z)}{P_z^{1,156}} \right] \left(\frac{P_z^{0,0234}}{2,16} \right) \tag{8}$$

Di dalam program yang telah dibuat, perhitungan fluks panas ONB dilakukan secara pendekatan yang cukup konservatif dengan melakukan kombinasi terjelek dari beberapa parameter yaitu ONB terjadi pada saluran keluaran dengan fluks panas maksimum, tekanan dan temperatur saturasi terendah dan temperatur pendingin tertinggi. Berdasarkan asumsi ini, diperoleh hubungan antara persamaan (1) dan (2) dengan persamaan (8) yaitu :

$$T_{in} + \frac{20 \cdot q''_a \cdot H_{co} \cdot W_h}{G \cdot t_w \cdot C_p \cdot W} + \frac{F_Z \cdot q''_a}{h} = T_{sat} + \frac{5}{9} \left[\frac{9,23 \cdot F_Z \cdot q''_a}{P_{ex}^{1,156}} \right] \left(\frac{P_{ex}^{0,0234}}{2,16} \right) \tag{9}$$

Harga fluks panas rata-rata dalam persamaan (9) di atas dapat dicari melalui teknik iterasi. Jika distribusi fluks panas ONB diketahui maka temperatur permukaan kelongsong untuk terjadinya ONB yang diekspresikan pada persamaan (8) dapat dihitung.

Awal ketidakstabilan aliran (OFI-Onset Flow instability)

Ketidakstabilan aliran terjadi karena adanya perubahan mendadak aliran pendingin melalui kanal yang dipanasi sebagai akibat transisi karakteristik penurunan tekanan dari aliran satu fasa ke aliran dua fasa atau sebaliknya. Batas awal terjadinya ketidakstabilan aliran dinyatakan dalam bentuk faktor keselamatan kestabilan aliran yang didefinisikan sebagai :

$$S_f = \left[\frac{T_{sat} - T_{in}}{T_{out} - T_{in}} \right] \left[\frac{1}{1 + \eta \cdot D_H / L_H} \right] \tag{11}$$

$$D_H = \frac{4 \cdot t_w \cdot W}{t_w \cdot W_h}$$

Fluks panas rata-rata untuk terjadinya awal ketidakstabilan aliran adalah,

$$q''_{OFI} = 0.05 \left[R \cdot \rho \cdot C_p \left(\frac{W \cdot t_w}{W_h \cdot L_H} \right) \cdot U \cdot (T_{sa} - T_{in}) \right] R = \frac{1}{1 + \eta \cdot D_H / L_H} \tag{12}$$

Berdasarkan fluks panas maksimum untuk terjadinya awal ketidakstabilan aliran ditentukan dengan mengalikan fluks panas ONB rata-rata di atas dengan faktor aksial.

Pelesatan Pendidihan Inti (DNB-Departure from Nucleate Boiling)

Dalam disain, data fluks panas untuk terjadinya DNB sangat diperlukan karena merupakan hambatan batas desain. Dalam program yang telah dibuat, korelasi DNB dari Mirshak digunakan sesuai rekomendasi dari acuan[1] dan [2] yaitu :

$$q''_{DNB} = 151 \cdot [1 + 0,1198 \cdot U] \cdot [1 + 0,00914 \cdot \Delta T_{sub}] \cdot [1 + 0,19 \cdot P]$$

$$\Delta T_{sub} = T_{sat} - T_{in} - \frac{20 \cdot W_h \cdot q''_{DNB}}{\rho \cdot C_p \cdot t_w \cdot W \cdot F_Z \cdot U} \tag{13}$$

UJI COBA PROGRAM

Untuk memeriksa kebenaran logika komputasi dalam program, suatu uji coba analisis kinerja termohidrolika elemen bakar RSG-GAS telah dilakukan. Data masukan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1, dan distribusi aksial fluks panas sepanjang pelat elemen bakar berbentuk sinus dengan faktor aksial 1,578 (*chopped sinus*). Harga konduktivitas panas kelongsong dan daging bahan bakar dianggap konstan terhadap temperatur. Ringkasan hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 2. Distribusi aksial temperatur pendingin, permukaan luar kelongsong, pusat bahan bakar dan distribusi temperatur permukaan kelongsong

untuk terjadinya ONB dapat dilihat pada Gambar 1.

Jika hasil perhitungan program ini dibandingkan dengan COOLOD-N terlihat bahwa program ini memberikan hasil yang cukup baik dengan penyimpangan lebih rendah dari 12% sedangkan dalam perhitungan kehilangan tekanan pendingin yang melintasi elemen bakar terdapat perbedaan yang sangat besar. Hal ini disebabkan perhitungan penurunan tekanan dalam program ini sampai pada saluran keluaran tepat setelah pendingin melewati jajaran pelat bahan bakar. Penurunan tekanan akibat perubahan tampang lintang aliran karena *end fitting* belum dimasukkan dalam program.

Tabel 1: Data Masukan

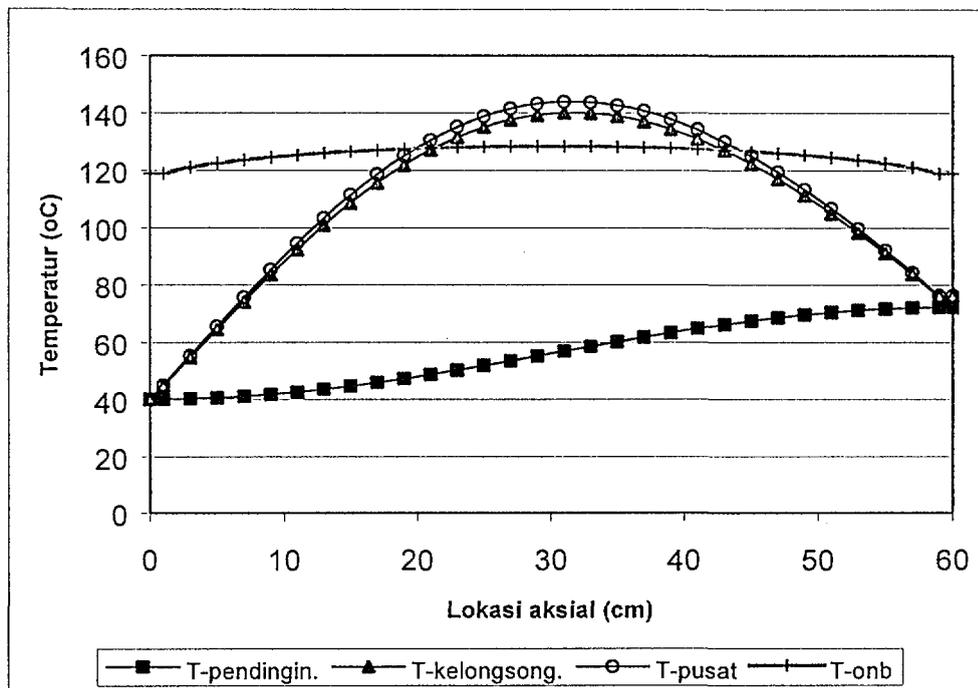
Parameter	Nilai
1. Fluks panas rerata (W/cm^2)	119,50
2. Kecepatan alir pendingin (m/s)	3,97
3. Tekanan pendingin masuk (bar)	2,00
4. Temperatur pendingin masuk ($^{\circ}C$)	40,00
5. Jumlah pelat BB per elemen	21
6. Tebal elemen bakar (cm)	8,05
7. Panjang saluran pendingin (cm)	62,50
8. Lebar saluran pendingin (cm)	6,71
9. Tebal saluran pendingin (cm)	0,255
10. Panjang aktif pelat BB (cm)	60,00
11. Lebar aktif pelat BB (cm)	6,275
12. Tebal kelongsong (cm)	0,038
13. Tebal daging BB (cm)	0,054
14. Konduktivitas panas daging BB ($W/cm^{\circ}C$)	1,416
15. Konduktivitas panas kelongsong ($W/cm^{\circ}C$)	23,165
16. Modulus elastisitas kelongsong (bar)	$6,6 \times 10^5$
17. <i>Poisson Ratio</i> kelongsong	0,35

Tabel 2. Ringkasan Hasil

	Harga		
	Thermo-1	Coolod-N *)	% deviasi **
1. Pendingin			
a. Kehilangan tekanan (bar)	0,274	0,58	-52,8
b. Kenaikan suhu pendingin sepanjang saluran ($^{\circ}C$)	28,06	31,59	-11,2
c. Temperatur saturasi pada saluran keluar ($^{\circ}C$)	115,65	115,70	- 0,04
d. Kecepatan Kritis (m/s)	11,43	-	-
2. Temp. maks. permukaan kelongsong ($^{\circ}C$)	139,96	134,48	+ 4,1
3. Temp. maks. pusat bahan bakar ($^{\circ}C$)	143,84	141,18	+ 1,9
4. Temperatur ONB maksimum ($^{\circ}C$)	128,33	128,6	- 0,2
5. Fluks panas rerata ONB (W/cm^2)	103,74	-	-
6. Batas keselamatan terhadap OFI (OFIR)	1,22	1,36	-10,3
7. Batas keselamatan terhadap DNB (DNBR)	1,82	1,67	+ 9,0

*) Dari acuan [4]

** $\left(\frac{\text{Thermo-1} - \text{Coolod-N}}{\text{Coolod-N}}\right) \times 100\%$



Gambar 1 : Distribusi temperatur sepanjang pelat elemen bakar.

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil uji coba awal program secara umum dapat disimpulkan bahwa program dapat digunakan untuk mengevaluasi keselamatan termohidrolika kondisi mantap (*steady state*) rancangan elemen bakar pelat sejajar. Untuk lebih memberikan keyakinan bahwa hasil perhitungan dapat diterapkan pada suatu program verifikasi yang lebih rinci, akan dilakukan baik melalui studi banding dengan hasil percobaan maupun hasil perhitungan program yang telah terverifikasi. Dengan demikian program yang telah dibuat ini nantinya diharapkan dapat digunakan sebagai kode program.

PUSTAKA

[1]. IAEA – TECDOC No. 233, Viena, 1980

- [2]. KHAN L. A., NABBI R., *Heat Transfer Analysis of the Existing HEU and Proposed LEU Cores of Pakistan Research Reactor*, KFA Julich GmbH-2118, 1987.
- [3]. WISMAN J., *Element of Nuclear Reactor Design*, Elsevier Scientific Publishing Co., 1977, p. 147-246.
- [4]. KURNIA P., DARWIS M., DEWANTO S., *Analisis Termohidrolik Teras RSG-GAS pada kondisi setimbang dengan Menggunakan Program Komputer Coolod-N*, Makalah yang disajikan pada Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung, 1994.
- [5]. GRAVES H. W. Jr., *Nuclear Fuel Management*, John Wiley & Sons, 1979, p.188-201.

Lampiran 1.

Nomenklatur

Simbol	Definisi	Satuan
Ao	Tampang lintang saluran pendingin di dalam elemen bakar	cm ²
Ac	Luas tampang lintang <i>end box</i> segera setelah saluran pendingin di antara pelat-pelat bahan bakar	cm ²
C _p	Panas spesifik pendingin	kJ/kg °C
De	Diameter ekivalen saluran pendingin	cm
E	Modulus elastisitas Young	bar
f	Faktor gesekan	-
F _z	Ratio fluks panas aksial maksimum dengan rata-rata	-
G	Fluks massa pendingin	kg/m ² .det
h	Koefisien transfer panas film	W/cm ² .°C
H _{co}	Panjang aktif pelat bahan bakar	cm
k _p	Konduktivitas panas pendingin	W/m°C
k _c	Konduktivitas panas kelongsong	W/m°C
k _f	Konduktivitas daging bahan bakar	W/m°C
K	Koefisien kehilangan tekanan masuk	-
L _c	Panjang pelat bahan bakar	cm
L _o	Panjang aktif pelat bahan bakar	cm
ΔL	Panjang segmen aksial	cm
P _z	Tekanan pada elevasi Z dalam saluran pendingin	bar
P _{ex}	Tekanan pada saluran keluaran pelat-pelat bahan bakar	bar
ΔP _F	Total kehilangan tekanan sistem pendingin yang melintasi saluran pendingin	bar
Pr	Bilangan Prandtl	-
q''	Fluks panas lokal	W/cm ²
q _a '	Rata-rata fluks panas aksial	W/cm ²
N	Segmen aksial	-
Re	Bilangan Reynolds	-
T _F	Temperatur pusat bahan bakar	°C
T _{in}	Temperatur pendingin masuk	°C
T _p	Temperatur pendingin	°C
T _s	Temperatur permukaan kelongsong	°C
T _{sat}	Temperatur saturasi pendingin	°C
t _c	Tebal kelongsong	cm
t _m	Tebal daging bahan bakar	cm
t _p	Tebal pelat bahan bakar	cm
t _w	Tebal saluran pendingin	cm
u	Kecepatan alir pendingin	m/s
V _{kritis}	Kecepatan alir kritis pendingin	m/s
w	Lebar saluran pendingin	cm
w _h	Lebar efektif pelat bahan bakar	cm
μ	Viskositas pendingin	Pascal. sec
ρ	Densitas pendingin	kg/m ³
υ	Poissson Ratio	-

TANYA JAWAB

Hasbullah Nasution

- Mohon dijelaskan arti fisis dari gambar 1 ?
- Dimana posisi titik nol (0) dari elemen bakar ?

Bambang Herutomo

- Temperatur pendingin yang terus naik dari saluran masuk sampai saluran keluar disebabkan fungsi pendingin sebagai pengangkut panas yang dibangkitkan bahan bakar. Profil temperatur permukaan kelongsong dan temperatur pusat bahan bakar sangat dipengaruhi oleh distribusi fluks panas dan pembangkitan panas sepanjang elemen bakar. *Sub nucleate Boiling* terjadi setelah pendingin mencapai 1/3 bagian saluran pendingin. Ketidakstabilan aliran tidak terjadi karena fluks panas yang dibangkitkan lebih rendah dibandingkan dengan fluks panas kritis untuk terjadinya ONB.
- Pada gambar 1, kedudukan titik nol berada di bagian atas elemen bakar-pendingin masuk.

Dhandhang Purwadi

- Mengapa terjadi deviasi cukup tinggi pada kehilangan tekanan serta adanya keganjilan yaitu kenaikan temperatur pendingin rendah sedangkan temperatur maksimum permukaan kelongsong lebih besar dibandingkan dengan hasil *Coolod-N* ?
- Apa tujuan pembuatan paket program ini ?

Bambang Herutomo

- Deviasi yang cukup tinggi pada kehilangan tekanan apabila dibandingkan *Coolod-N* kemungkinan disebabkan model yang digunakan belum memperhitungkan perubahan sifat-sifat pendingin dalam saluran dan perubahan tampang lintang aliran akibat *end fitting*. Keganjilan tersebut belum dapat dijelaskan karena model perhitungan program *Coolod-N* belum diperiksa secara teliti.
- Tujuan pembuatan paket program ini adalah meningkatkan kemampuan sumber daya manusia dalam rancang bangun elemen bakar bentuk pelat untuk reaktor tipe MTR. Program ini akan dikembangkan lebih lanjut sehingga diharapkan menjadi kode program.

Sigit

- Dalam model perhitungan yang dibuat, apakah dimasukkan faktor *gap* antar pelat? Mengingat *gap* memegang peranan penting dalam perpindahan panas elemen bakar.

Bambang Herutomo

- *Gap* antar pelat atau lebar saluran pendingin telah dimasukkan dalam perhitungan (lihat Bab II. Metoda Komputasi).