

## ANALISIS TERMOHIDRAULIKA TARGET LEU PENGHASIL FPM DENGAN PROGRAM COBRA IV-I

Suroso, Kurnia Putranta, Dedy Sunaryadi  
Pusat Reaktor Serba Guna - BATAN

### ABSTRAK

**ANALISIS TERMOHIDROLIKA TARGET LEU PENGHASIL FPM DENGAN PROGRAM COBRA IV-I.** Telah dilakukan analisis termohidraulika untuk iradiasi target LEU (*Low Enriched Uranium*) penghasil FPM (*Fission Product Molybdenum*) di dalam teras reaktor. Batas keselamatan (*Safety Margin*) yang digunakan adalah *Minimum Departure from Nucleat Boiling Ratio* (MDNBR). Analisis dilakukan dengan menggunakan paket program komputer COBRA IV-I yang dikembangkan oleh *The Pacific Northwest Laboratory, Battele Northwest*. Data masukan laju alir pendingin dan fluks neutron diperoleh dari pengukuran. Perhitungan dilakukan dengan berbagai variasi massa  $U^{235}$ . Untuk muatan  $U^{235}$  sebesar 6 gr diperoleh laju pembangkitan panas dari fisi dan *gamma heating* sebesar 26,11 kW, sedangkan dari hasil perhitungan diperoleh temperatur kelongsong 163,06 °C, temperatur pendingin 47,06 °C, koefisien perpindahan panas 33,611 kW/(m<sup>2</sup>K) dan MDNBR sebesar 1,62.

### ABSTRACT

**THERMAL - HYDRAULICS ANALYSIS OF LEU TARGETS PRODUCING FPM USING COBRA IV-I.** Thermal-hydraulics analysis of the LEU (*Low Enriched Uranium*) producing FPM (*Fission Product Molybdenum*) targets irradiated in the reactor core of RSG-GAS have been done. A safety margin applied was based on the *Minimum Departure from Nucleat Boiling Ratio*. The analysis was done using COBRA IV-I developed in the *Pacific Northwest Laboratory*. The input data for the coolant flow rates and neutron flux were based on the measurement results. The calculations were done for different weight mass of LEU targets. The heat generated in 6-gr  $U^{235}$  LEU target from fission and *gamma heating* is 26.11 kW. The calculation results showed that the cladding temperature, coolant temperature, heat transfer coefficient along the targets, and MDNBR were 163.06 °C, 47.06 °C, 33.611 kW/(m<sup>2</sup>.K) and 1.62 respectively.

### I. PENDAHULUAN

Fasilitas iradiasi target LEU (*Low Enriched Uranium*) penghasil FPM (*Fission Product of Molybdenum*) di pasang pada teras reaktor serbaguna G.A. Siwabessy untuk memproduksi  $Mo^{99}$ . Pada umumnya, bahan target (sasaran) yang digunakan adalah uranium diperkaya dengan pengkayaan tinggi (*High Enriched Uranium*) yaitu lebih besar dari 90 %. Bahan dengan pengkayaan tinggi tersebut merupakan bahan strategis di mana penggunaan dan penyimpanannya selalu di bawah pengawasan IAEA (*International Atomic Energy Agency*). Berdasarkan program *Reduced Enrichment for Research and Test Reactor* diperkirakan pada waktu mendatang

penggunaan bahan bakar dengan pengkayaan tinggi tersebut akan dibatasi bahkan dilarang sama sekali. Untuk mengantisipasi pembatasan/pelarangan pengadaan bahan strategis tersebut di pasaran internasional, maka perlu dilakukan studi penggantian sasaran dari bahan bakar pengkayaan tinggi menjadi bahan bakar dengan pengkayaan rendah (*Low Enriched Uranium*) yaitu dengan tingkat pengkayaan kurang dari 20 %.

Perbedaan antara target HEU dan target LEU terdapat pada ukuran dan bahan penyusunnya. Target dengan pengkayaan tinggi hanya terdiri dari tabung *stainless steel* 321 yang di dalamnya di lapiskan uranium secara elektrik (*electro plating*), diameter luar target 32

mm dan panjang aktif target sekitar 457,2 mm, sedangkan target pengkayaan rendah terdiri dari tiga bagian masing-masing adalah bagian pertama terdiri dari tabung aluminium yang di dalamnya diisi helium kemudian bagian kedua lempeng uranium, dan bagian ketiga tabung zirconium. Ukuran dari masing-masing bagian dapat dibaca pada deskripsi target.

Analisis termohidraulika target HEU penghasil FPM telah dikerjakan oleh Pribadi Agung dkk.<sup>8)</sup> dengan menggunakan paket program PARET. Perhitungan dilakukan dengan memvariasikan berbagai massa  $U^{235}$  sebagai fungsi temperatur kelongsong, temperatur pendingin, awal pendidihan inti (*Onset Nucleat Boiling*) dan DNBR. Hasil yang diperoleh pada muatan massa  $U^{235}$  sebesar 8 gram diperoleh temperatur kelongsong 130,1 °C, ONB 132,0 °C, sehingga diperoleh

selisih ONB sebesar -1,9 °C yang diperkirakan sudah mulai dijumpai terjadinya pendidihan inti. DNBR minimum untuk muatan massa uranium 9 gram diperoleh sebesar 2,166<sup>8)</sup>. Selanjutnya dalam makalah ini diketengahkan analisis termo-hidraulika untuk iradiasi target dengan pengkayaan rendah. Perhitungan dikerjakan dengan paket program COBRA IV-I dengan data masukan laju alir pendingin dan fluks neutron diperoleh dari pengukuran pada teras tipikal (*Typical working core*). Batasan keselamatan yang dipakai sebagai acuan di dalam perhitungan berdasarkan pada harga MDNBR.

Paket program COBRA IV-I dikembangkan oleh *The Pacific Northwest Laboratory, Battelle Northwest* pada tahun 1976. Cobra menggunakan konsep dasar analisis subkanal. Subkanal secara aksial dibagi menjadi volume-volume atur yang diskret, di mana persamaan-persamaan kekekalan massa, momentum dan energi ditulis. Variabel-variabel laju aliran massa, tekanan, entalpi dan densitas didefinisikan sebagai harga rerata secara volume. Dengan adanya analisis subkanal tersebut

memungkinkan paket program COBRA IV-I dapat digunakan untuk menganalisis target LEU, disamping kemampuan komputasinya terhadap elemen bakar yang dapat berisi beberapa material berbeda baik secara radial maupun aksial.

## II. TEORI

Analisis subkanal adalah salah satu metoda yang dapat digunakan untuk menyelesaikan persoalan aliran di dalam banyak kanal yang terhubung secara kontinyu di sepanjang kanal, disamping untuk menyelesaikan kasus termohidraulika di dalam kanal itu sendiri. Dalam pendekatan subkanal, perangkat elemen bakar dibagi ke dalam beberapa volume atur (*control volume*). Ada dua pendekatan dalam mendefinisikan volume subkanal, yaitu volume subkanal dengan pusat pendingin (*coolant centered subchannels*) dan volume subkanal dengan pusat elemen bakar (*rod centered subchannel*). Pendekatan subkanal dengan subkanal sebagai pusat pendingin untuk aliran satu fase cukup akurat dan relevan untuk kondisi target.

Sifat - sifat fisis subkanal, seperti kecepatan dan densitas ke arah aksial diwakili oleh satu harga rerata. Persamaan konstitutif, diperlukan untuk parameter-parameter seperti faktor gesekan, laju pertukaran energi dan momentum ke arah lateral. Persamaan-persamaan mendasar diterapkan pada tiap volume subkanal, selanjutnya persamaan-persamaan mendasar diselesaikan. Persamaan-persamaan tersebut adalah:

### II.1. Persamaan kekekalan massa

Persamaan kekekalan massa untuk subkanal  $i$  adalah sebagai berikut :

$$A_{fi} \frac{\partial \langle \rho_i \rangle}{\partial t} + \frac{\Delta m_i}{\Delta z} = - \sum_{j=1}^J [W_{ij} + W_{i \rightarrow j}^D] \quad (1)$$

$$\dot{m}_i = \int_{A_{fi}} \rho V_z dA \quad (2)$$

di mana :

$\dot{m}$  = laju aliran massa arah aksial

$i$  = indeks identifikasi subkanal

$A_{fi}$  = luasanampang lintang aliran pendingin ke arah aksial untuk subkanal  $i$

$\rho$  = densitas

$j$  = jumlah subkanal

$\Delta z$  = panjang aksial

$W_i$  = *Diversion cross flow*

$W_{i \rightarrow j}^D$  = pertukaran turbulen

$V$  = kecepatan

$fi$  = subscript

## II.2. Persamaan kekekalan energi

Untuk subkanal  $i$  berlaku persamaan kekekalan energi sebagai berikut :

$$\Lambda_i \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_i) + \frac{\Delta}{\Delta z} (m h_i) = (q_i)_{nb} - \sum_{j=1}^J W_{ij}^D (h_i - h_j) - \sum_{j=1}^J W_{ji}^D (h_j - h_i) + \Lambda_i \left( \frac{Dh}{Dt} \right) \quad (3)$$

di mana :

$\langle q_i \rangle_{nb}$  = laju pembangkitan panas linear pada subkanal

$W_{ij}^{*H}$  = pertukaran gesekan ditambah turbulen pada perpindahan energi

$$\frac{Dp_i}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_i) = \text{perubahan entalpi}$$

Persamaan tersebut diturunkan dengan asumsi sebagai berikut :

a). Untuk aliran satu fase selisih pertukaran turbulen ditambah efek viskositas berlaku

$$W_{ij}^{*D} h_i - W_{ji}^{*D} h_j = W_{ij}^{*D} (h_i - h_j) \quad (4)$$

b). Konduksi panas ke arah aksial di dalam pendingin diabaikan sehingga

$$\left\{ k_r \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right\} = 0 \quad (5)$$

c). Tidak ada pembangkitan panas di dalam pendingin  $\langle q'' \rangle = 0$

d). Pembuangan panas karena efek viskositas diabaikan  $\langle \Phi \rangle = 0$

e). Entalpi yang dibawa oleh *diversion cross flow*  $\{h^*_x\}$  dan  $\{h^*_j\}$  diberikan dalam  $\{h^*\}$ .

## II.3. Persamaan kekekalan momentum ke arah lateral

Pada setiap volume atur, aliran ke arah lateral hanya ditinjau satu dimensi. Subkanal-subkanal yang berdekatan dihubungkan melalui laju aliran lateral  $W_{ij}$  satu dimensi yang melewati celah  $S_{ij}$ . Persamaan kekekalan momentum ke arah lateral diberikan sebagai berikut :

$$\frac{\partial}{\partial t} (w_{ij}^*) + \frac{\Delta}{\Delta z} (w_{ij}^* \{v_x\}) = - \frac{S_{ij}^*}{l} (\Delta \{p\}) - \left\{ \frac{F_{ij}}{l \Delta z} \right\} \quad (6)$$

Untuk kondisi tunak dan dengan mengabaikan suku kedua pada ruas kiri persamaan tersebut menjadi :

$$\frac{S_{ij}^*}{l} (\Delta \{p\}) + \left\{ \frac{F_{ij}}{l \Delta z} \right\} = 0 \quad (7)$$

di mana  $p$  adalah tekanan,  $F$  gaya apung,  $l$  panjang lintasan dan  $z$  adalah jarak tempuh aliran.

## II.4. Korelasi *critical heat flux* dan perpindahan panas.<sup>3)</sup>

Korelasi *critical heat flux* (CHF) dan perpindahan panas dibagi menjadi tiga bagian, masing-masing : *Pre CHF*, *Post CHF* dan bagian CHF. Korelasi-korelasi untuk masing-masing bagian tersebut adalah sebagai berikut :

Kondisi *Pre CHF*, untuk *forced convection*, *Sub-cooled & nucleate boiling* dan *forced convection vaporization* masing-masing menggunakan korelasi Dittus Boelter, Thom dan Schrock & Grossman.

Kondisi Post CHF, untuk *transition boiling*, *stable film boiling*, *low pressure film boiling* dan *pool film boiling*, masing-masing menggunakan korelasi Mc.Donough, Milich King, Groeneveld, Dougall & Rohsenow dan Berenson.

Kondisi CHF untuk :

1.  $P/psia < 725$  menggunakan korelasi Modified Barnett.
2.  $725 < P/psia < 1000$  menggunakan korelasi interpolasi antara Barnett & modified Barnett.
3.  $1000 < P/psia < 1500$  menggunakan korelasi interpolasi Barnett dan B & W II.
4.  $1000 < P/psia < 1500$  menggunakan korelasi interpolasi Barnett dan B & WII.
5.  $P/psia > 1500$  menggunakan B and W II.

Eksekusi program dilakukan dengan memilih opsi yang sesuai dengan kondisi perhitungan.

### III. Tata Kerja

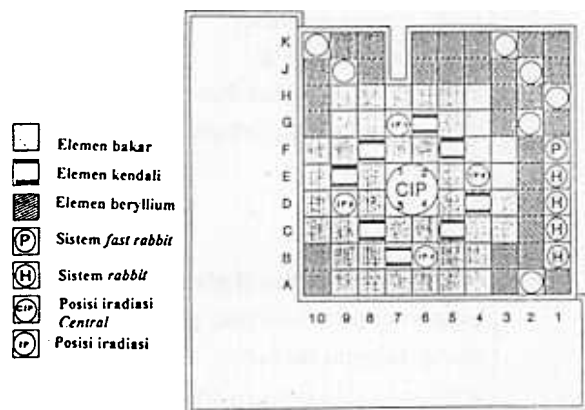
#### III.1. Deskripsi Target

Target LEU terdiri dari tiga bagian. Bagian pertama berupa tabung yang terbuat dari bahan zirconium dengan diameter luar 30 mm, dengan diameter dalam berlainan antara ujung yang satu dengan yang lain, masing-masing berdiameter 28,19 mm dan 28,80 mm, panjang 150 mm. Bagian kedua berupa lempeng (foil)

uranium panjang  $75,0 \pm 1,0$  mm, lebar  $88,0 \pm 1,0$  mm dan tebal  $0,125 \pm 0,013$  mm.

Bagian ketiga terdiri dari sebuah tabung yang terbuat dari bahan aluminium dengan diameter luar 28,50 mm dan diameter dalam 19,0 mm dan panjang 125,0 mm. Dalam proses perakitannya, lempeng uranium digulungkan ke pipa aluminium, kemudian pipa aluminium yang diselubungi oleh lempeng uranium tersebut dimasukkan ke pipa zirconium, setelah itu bagian atas dan bawah ditutup dengan sebuah penyumbat (*plug*) yang

dilas ke tabung zirconium. Sebelum dilas pada bagian dalam tabung diberi gas helium dengan tekanan atmosfer untuk mencegah terjadinya reaksi korosi dan mempertinggi konduktivitas panas. Iradiasi target direncanakan dilakukan di teras reaktor pada CIP (*Central Irradiation Position*) seperti gambar 1.



Gambar 1. Teras RSG GA Siwabessy

#### III.2. Batasan

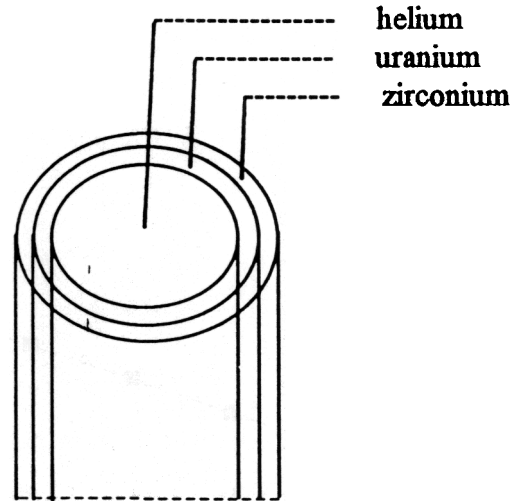
Sebagai batasan dalam perhitungan adalah harga *Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio* (MDNBR) yang merupakan dasar desain reaktor. Untuk reaktor yang berpendingin air biasanya harga DNBR-nya lebih besar dari 1,3<sup>4)</sup>. Dengan memperhitungkan ketidakpastian di dalam pengukuran dan akurasi di dalam perhitungan, maka batas keselamatan MDNBR yang digunakan dalam perhitungan ditetapkan sebesar 1,6.

#### III.3. Metode Perhitungan

- a) Perhitungan dilakukan dengan menggunakan besar laju alir yang diperoleh dari pengukuran yaitu sebesar  $43 \text{ m}^3/\text{jam}$  untuk satu kanal posisi yang bisa terisi 4 target pada daya nominal.
- b) Perhitungan dilakukan dengan menganggap sumber panas berasal dari fisi  $U^{235}$  yang divariasikan massanya dari 1 gr

sampai 10 gr dan *gamma heating* dari material penyusun target.

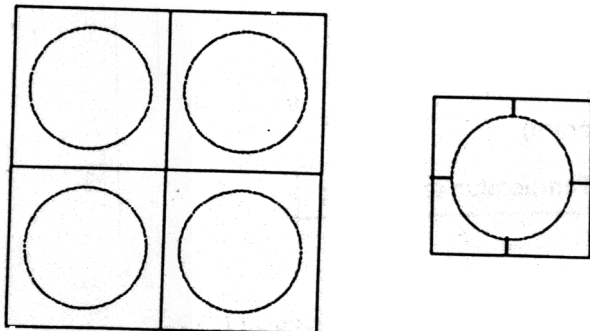
- c) Massa  $U^{235}$  diasumsikan terdistribusi secara homogen sepanjang target dan pembangkitan panas merata sepanjang target aktif.
- d) Besarnya panas fisi diperoleh dari perhitungan manual, sedangkan laju *gamma heating* diperoleh dari pengukuran dan perhitungan material penyusun target LEU pada teras tipikal (*typical working core*).
- e) Perhitungan temperatur fluida, temperatur kelongsong, rugi tekanan, koefisien perpindahan panas dan MDNBR dilakukan dengan menggunakan paket program COBRA IV-1.



Gambar 3. Pemodelan penyusunan material target ke arah radial

#### III.4. Model Perhitungan

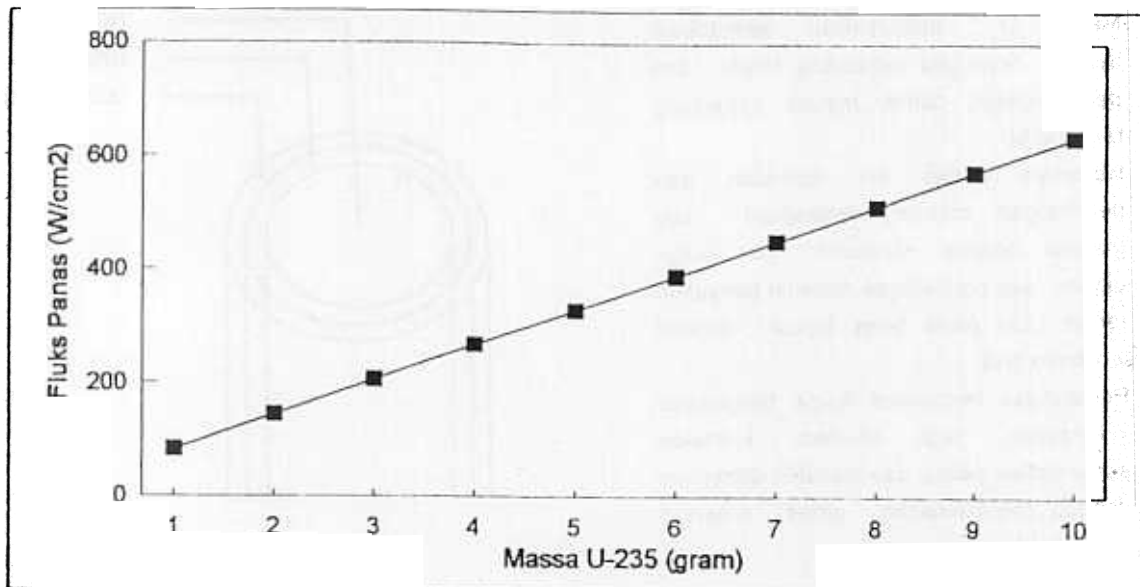
Target FPM ditempatkan pada stringer yang bisa diisi dengan empat target. Setiap target menempati posisi yang simetris satu dengan lainnya, sehingga model dapat dibuat sederhana dengan hanya membuat satu target yang menempati salah satu dari empat tempat yang disediakan stringer (gambar 2). Sedangkan pembagian daerah material penyusun target ke arah radial COBRA IV-1 memungkinkan bisa diisi dengan tiga jenis material penyusun target. Di dalam pemodelan ketiga material tersebut diisi oleh bagian pertama gas helium, bagian kedua uranium dan bagian terluar zirconium (gambar 3).



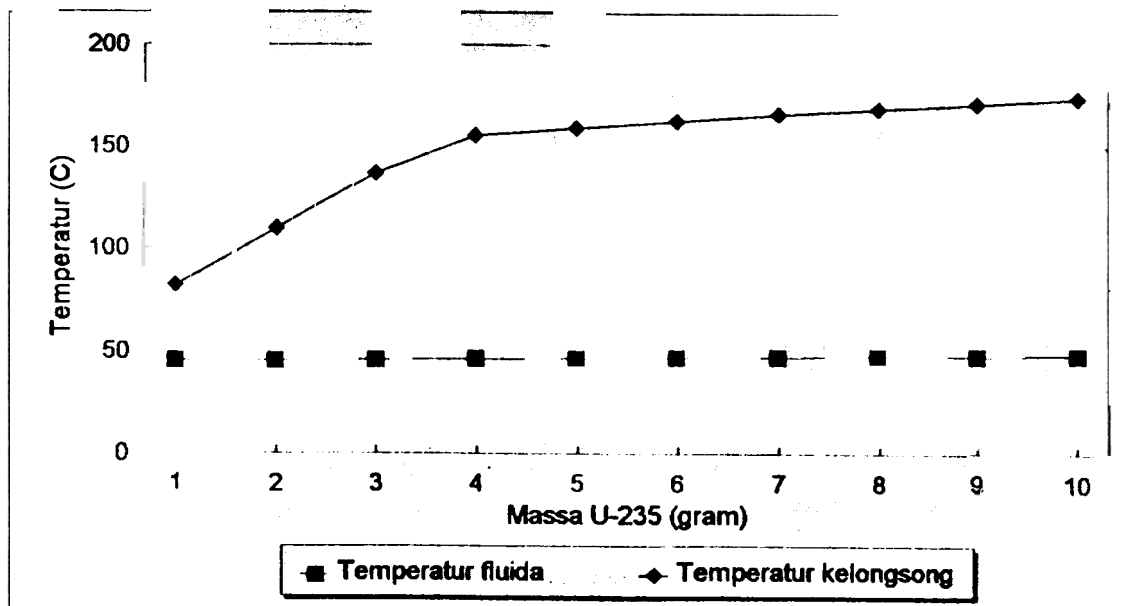
Gambar 2. Pemodelan penempatan target pada stringer

#### IV. Hasil dan Analisis

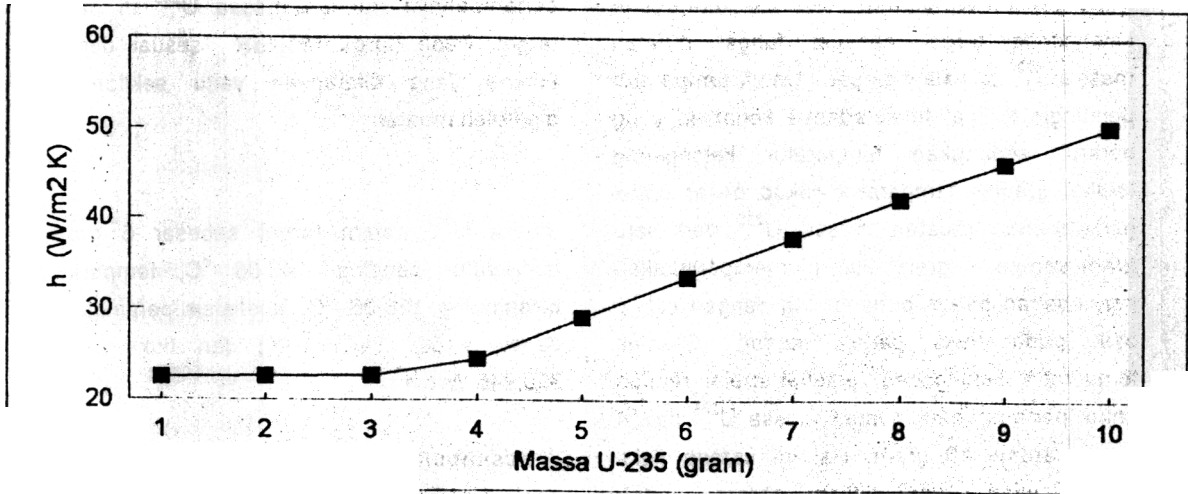
Sebagai batasan dalam perhitungan digunakan harga *Minimum Departure from Nucleate Boiling Ratio* (MDNBR). MDNBR untuk reaktor yang ber-pendingin air biasanya harganya lebih besar dari 1,3<sup>4)</sup>. Dengan memperhitungkan ketidaktentuan di dalam pengukuran dan ketelitian di dalam perhitungan, maka pada perhitungan ini harga MDNBR - nya ditetapkan sebesar 1,6. Dalam perhitungan diasumsikan target ditempatkan pada sebuah stringer yang dapat diisi 4 buah kapsul, sehingga setiap kapsul memperoleh laju alir pendingin maksimum sebesar seperempat bagian dari 43 m<sup>3</sup>/jam yang diperoleh dari pengukuran<sup>2)</sup>. Fluks neutron pada posisi iradiasi untuk daya nominal dari pengukuran diperoleh besarnya 1,5 x 10<sup>14</sup> neutron/(cm<sup>2</sup> sec.)<sup>2)</sup>. Fluks panas fisi dan *gamma heating* yang diperoleh dari perhitungan dengan memvariasikan muatan massa  $U^{235}$  dari satu gram sampai 10 gram di dalam target LEU dapat dilihat pada gambar 4.



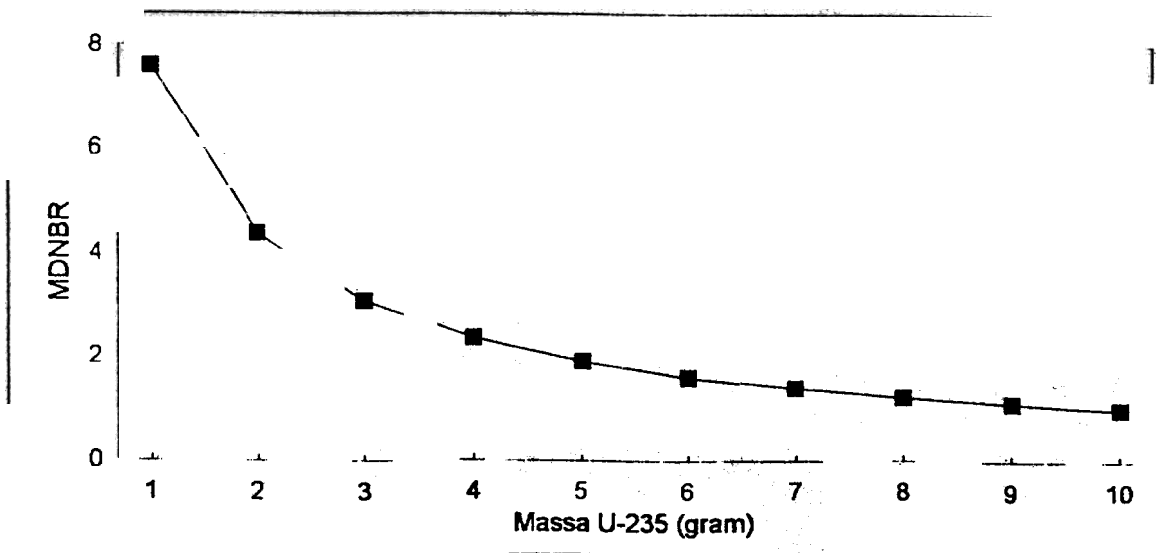
Gambar 4. Grafik fluks panas fungsi muatan massa U-235 dalam target



Gambar 5. Grafik temperatur fluida dan kelongsong fungsi muatan massa U-235 dalam target



Gambar 6. Grafik koefisien perpindahan panas fungsi muatan massa U-235 dalam target



Gambar 7. Grafik MDNBR fungsi muatan massa U-235

Terlihat bahwa besarnya fluks panas naik secara linier terhadap pertambahan muatan massa  $U^{235}$  di dalam target. Sedangkan gambar 5 menyajikan temperatur fluida dan temperatur kelongsong target sebagai fungsi muatan massa  $U^{235}$  di dalam target. Untuk temperatur pendingin terlihat tidak adanya kenaikan yang berarti, sedangkan temperatur kelongsong terlihat gradien temperatur cukup besar untuk pertambahan muatan massa  $U^{235}$  dari satu gram sampai 4 gram. Hal ini memperlihatkan perpindahan panas berlangsung dengan cukup baik pada fluks panas rendah. Gradien temperatur kelongsong tersebut mulai rendah untuk pertambahan muatan massa  $U^{235}$  dari 4 gram sampai 10 gram. Hal ini karena fluks panas yang dibangkitkan target sudah mendekati kondisi pendidihan<sup>7)</sup>. Harga koefisien perpindahan panas sebagai fungsi muatan massa  $U^{235}$  di dalam target dapat dilihat pada gambar 6. Untuk muatan  $U^{235}$  dari 1 gram sampai 3 gram tidak ada kenaikan yang berarti bahkan bisa dikatakan konstan, dan mulai terlihat kenaikannya pada muatan massa  $U^{235}$  4 gram sampai 10 gram. Pola demikian menunjukkan bahwa untuk muatan massa  $U^{235}$  dari 1 gram sampai dengan 3 gram berada pada daerah belum terjadi pendidihan inti dan mulai terjadi pendidihan inti pada muatan massa  $U^{235}$  dari 4 gram sampai 10 gram<sup>7)</sup>.

#### Daftar Pustaka

1. PRSG-BATAN, *Safety Analysis Report*, revisi 7, Jakarta, 1989
2. PRSG-BATAN, *Addendum Laporan Analisis Keselamatan Iradiasi Target FPM-LEU*, Serpong, 1995
3. Wheeler, C.L., CS. *An Interim Version of COBRA for Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements and Cores*, Battelle Pacific Northwest Laboratories, Washington, 1976
4. Todreas, N.E, and Kazimi, M.S., *Nuclear System II Elements of Thermal-Hydraulic Design*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990.
5. Anhar R. dkk. *Analisis Perpindahan Panas Pada Kanal Uji Termohidraulika Reaktor*, Lokakarya Termohidraulika PPTKR-BATAN, Serpong, 1994.
6. Wood, E.L. , *Thermal Testing of Uranium Metal Targets for  $^{99}\text{Mo}$  Production* ANL, USA, May 20 1994.
7. Collier, J.G. , *Convective Boiling And Condensation*, McGraw-Hill, NewYork,

Harga MDNBR yang diperoleh dari perhitungan dapat dilihat pada gambar 7, terlihat bahwa harganya semakin me-nurun dengan bertambahnya muatan massa  $U^{235}$  di dalam target. Pada harga MDNBR sesuai dengan kriteria yang ditetapkan yaitu sekitar 1,6 diperoleh muatan

massa  $U^{235}$  dalam target sebesar 6 gram, temperatur pendingin 47,06 °C, temperatur kelongsong 163,06 °C, koefisien perpindahan panas 33,611 kW/(m<sup>2</sup> K) dan fluks panas 390,446 W/cm<sup>2</sup>.

#### V. Kesimpulan

Hasil perhitungan dengan menggunakan paket program COBRA IV-I, target LEU penghasil FPM sampai dengan muatan  $U^{235}$  sebesar 6 gram dapat diiradiasi di dalam teras reaktor G.A. Siwabessy, karena pada muatan  $U^{235}$  sebesar 6 gram tersebut batas keselamatan yang disyaratkan belum terlampaui. Pada muatan  $U^{235}$  di dalam target sebesar 6 gram diperoleh fluks panas 390,446 W/cm<sup>2</sup>, temperatur fluida 47,06 °C, temperatur kelongsong 163,06 °C, koefisien perpindahan panas 33,611 W/(m<sup>2</sup> K) dan MDNBR 1,62.



1981.

8. Agung, P. dkk., *Analisis Perpindahan Kalor Pada Iradiasi Target FPM di RSG-GA. Siwabessy*, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, PPNY- BATAN, Yogyakarta 27-29 April 1993.

## DISKUSI

Pertanyaan : **Sri Kuntjoro**

- a. Sudahkah program COBRA-4 terverifikasi untuk reaktor riset. Bila sudah dengan apa program ini diverifikasi. Bila belum diverifikasi bagaimana anda dapat memberikan toleransi kesalahan pada hasil perhitungan.
- b. Pada target HEU kapsul TFM dapat digunakan untuk mengiradiasi 15 gram U-235. Berapakah target maksimum U yang dapat diiradiasi pada target tersebut.

Jawaban :

- a. Saya bandingkan perhitungan yang saya lakukan , dengan yang telah dilakukan oleh Sdr. Agung dkk, yang menggunakan Paret, perhitungan untuk HEU dan hasil perhitungan yang kami lakukan cukup sesuai.
- b. Pada target LEU untuk satu pin bisa diiradiasi maksimum 6 gram U-235, sehingga kalau untuk satu stringer yang bisa terisi 4 target bisa diiradiasi 24 gram / target. Tetapi perlu dikaji batasan neutroniknya.