

ANALISIS KESELAMATAN TERMOHIDRAULIKA FASILITAS IRADIASI FPM PADA TERAS SILISIDA DI RSG-GAS

Suroso

ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN TERMOHIDRAULIKA FASILITAS IRADIASI PADA TERAS SILISIDA DI RSG-GAS. Iradiasi target *Fission Product Molybdenum* (FPM) di teras reaktor akan membangkitkan sejumlah panas. Panas yang dibangkitkan berasal dari pembelahan U^{235} , tabungnya dan *stringer*. Besarnya panas yang dibangkitkan akan sebanding dengan fluks neutron yang dihasilkan oleh teras reaktor. Penggantian teras reaktor dari menggunakan bahan bakar U_3O_8Al ke U_3Si_2Al akan berpengaruh terhadap harga fluks neutronnya. Teras reaktor dengan bahan bakar silisida, analisis keselamatan fasilitas iradiasinya dibahas pada kertas kerja ini. Fasilitas iradiasi yang dianalisis dibatasi hanya pada fasilitas iradiasi penghasil molybdenum, posisi iradiasi di *Central Posistion Irradiation* (CIP). Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program COBRA IV-I, terhadap muatan maksimum U^{235} di dalam target yang dapat diiradiasi. Batas keselamatan yang digunakan adalah harga ketidakstabilan aliran (S) dan *Minimum Departure from Nucleat Boiling Ratio* (MDNBR). Masing-masing harga faktor keselamatan tersebut yaitu untuk ketidakstabilan aliran minimum yang dipersyaratkan 3,38 dan MDNBR 1,3. Dengan memperhitungkan ketidak-tentuan dalam perhitungan maka, harga ketidakstabilan aliran ditetapkan sebesar 4,39 dan harga MDNBR sebesar 1,95. Hasil perhitungan menunjukkan muatan U^{235} di dalam target sampai dengan 10 gram diperoleh harga batas keselamatan tersebut belum terlampaui. Sehingga dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan teras silisida reaktor masih dalam keadaan aman untuk mengiradiasi target FPM dengan muatan U^{235} sampai 10 gram.

ABSTRACT

IRRADIATION FACILITY THERMALHYDRAULIC SAFETY ANALYSIS ON CORE SILICIDE IN MPR-30. The irradiation target of Fission Product Molybdenum (FPM) in the reactor core will generate heat. The heat is generated from U^{235} fission, tube and stringer. The heat generation will be proportional to the neutron flux which produced from reactor core. The exchange of reactor core from using fuel element U_3O_8Al to U_3Si_2Al will be influence to the neutron flux. The safety aspects of the irradiation facility with silicide core will be analyzed and discussed in this paper. The analysis is restricted only for irradiation facility producing molybdenum, irradiation position in the Central Irradiation Position (CIP). The calculation is done by using COBRA IV-I package program to determine the U^{235} maximum quantity on the target FPM, with restrict Minimum Departure from Nucleat Boiling Ratio (MDNBR) and flow instability value (S). For safety, the DNBR values must greather than 1.3 and flow instability must greather than equal 3.38. With the calculating of uncertainty the MDNBR value must greather than 1.93 and the minimum flow instability value is 4.39. The result of calculation show that maximum loaded every target is 10 grams U^{235} not over the safety restruct. From the result of calculation we can conclude that U^{235} on the FPM target can be irradiation in the silicide reactor core of mass until 10 grams and the reactor still save.

PENDAHULUAN

Bahan bakar reaktor RSG-GAS akan dikonversi dari U_3O_8Al ke U_3Si_2Al . Perubahan penggantian bahan bakar dikerjakan secara bertahap yaitu dari menggunakan teras silisida densitas uranium 2,96 gr/cc; 3,55 gr/cc dan 4,8 gr/cc. Setiap fase penggantian bahan bakar tentu diikuti oleh perubahan unjuk kerja dari teras reaktor baik dari segi neutronik maupun dari segi

termohidrolika. Kajian-kajian dari segi neutronik maupun dari segi termohidrolika untuk setiap fase perubahan densitas uranium dalam bahan bakar silisida sangat diperlukan, baik pada unjuk kerja teras reaktor maupun pada fasilitas iradiasinya, agar diperoleh suatu informasi yang benar yang akhirnya dapat digunakan untuk mengatur penggunaan atau pemanfaatan reaktor secara aman.

Pengaruh penggantian teras reaktor dari menggunakan bahan bakar U_3O_8Al ke U_3Si_2Al pada fasilitas iradiasi FPM, dari segi termohidraulika adalah harga pembangkitan panas yang diperoleh dari harga fluks neutronnya. Salah satu parameter yang membatasi pengoperasian reaktor dari segi termohidraulika adalah harga ketidak stabilan aliran atau harga instabilitas aliran (*Onset of Flow Instability = S*) dan harga akhir pendidihan inti (*Departure from Nucleat Boiling Ratio = DNBR*). Harga S dan DNBR minimum terpenuhi dalam pelaksanaan iradiasi target FPM agar tidak mengakibatkan pendidihan yang menyebabkan *burn out*. *Burn out* didefinisikan sebagai kerusakan hebat pada elemen bakar akibat kegagalan pendingin memindahkan panas yang timbul pada elemen bakar. Perhitungan harga DNBR dan karakteristik termohidraulika yaitu temperatur dan kecepatan fluida dapat dilakukan dengan menggunakan paket COBRA IV-I (*Colant Boiling in Rod Arrays IV-Interim*) karena metoda multi kanal yang digunakan dalam paket program sesuai dengan struktur target FPM yang diletakkan pada *stringer* yang terdapat kanal-kanal berisi fluida pendingin^[1].

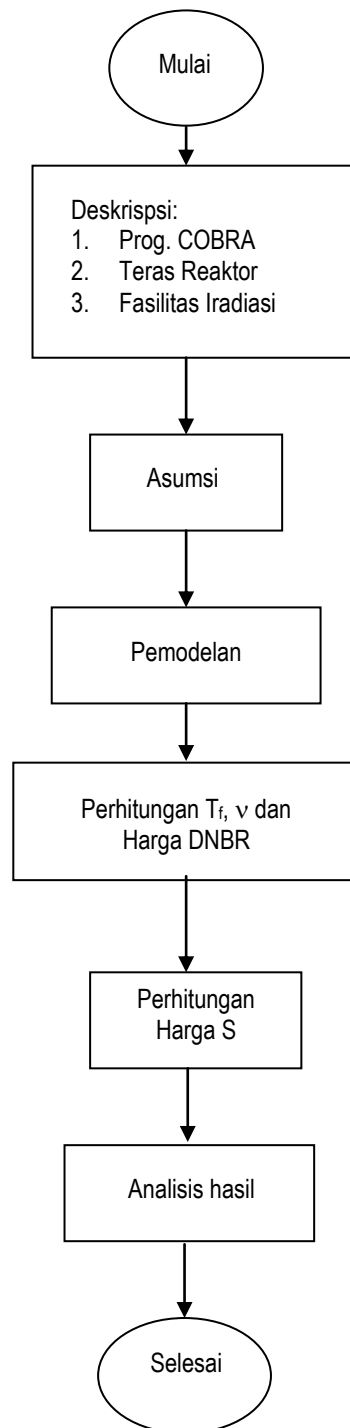
Analisis keselamatan iradiasi target FPM yang disisipkan ke dalam teras reaktor G.A. Siwabessy untuk mengetahui muatan maksimum U^{235} dalam target FPM telah dilakukan, tetapi untuk target FPM yang mengandung Uranium dengan tingkat pengayaan rendah (LEU, *Low Enrichment Uranium*) yaitu sebesar 19,75 % dan *stringer* yang digunakan dapat diisi dengan empat target. Analisis keselamatan dilakukan dalam dua segi yaitu neutronik dan termohidraulika. Perhitungan dari segi termohidraulika dilakukan dengan menggunakan program COBRA-IV-I, dan

perhitungan dari segi neutronik dilakukan dengan menggunakan program WIMS D/4 dan program BATAN-2DIFF. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa iradiasi target FPM dapat dilakukan dengan tingkat kandungan U^{235} dalam target FPM sampai dengan 6 gram reaktor masih dalam keadaan aman^[1].

Target FPM yang diiradiasi di dalam teras reaktor G.A. Siwabessy dengan bahan bakar U_3O_8Al selama ini biasanya mengandung 3 gram Uranium dengan tingkat pengayaan 93,5 %, memiliki harga S sebesar 18,8 dan awal pendidihan inti belum terjadi. Dalam *Safety Analysis Report*, untuk operasi reaktor pada daya setimbang harga S minimum 3,38 sehingga masih memungkinkan untuk meningkatkan kandungan U^{235} di dalam tiap target. Peningkatan kandungan U^{235} di dalam tiap target FPM diperhitungkan dengan mempertimbangkan panas yang timbul dari reaksi inti antara U^{235} dengan neutron harus dapat diambil oleh fluida pendingin, sehingga reaktor masih dalam kondisi aman, memenuhi batas keselamatan dari segi termohidraulika baik harga S maupun DNBR.

TATA KERJA

Analisis keselamatan termohidraulika pada fasilitas iradiasi FPM dilakukan dengan mengetahui terlebih dahulu deskripsi program COBRA IV-I, deskripsi teras reaktor, deskripsi fasilitas iradiasi FPM dan kemudian menetapkan asumsi dan model perhitungan, perhitungan DNBR dan ketidak stabilan aliran (S) dan akhirnya analisis hasil perhitungan. Langkah-langkah penyelesaian tersebut diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Langkah-langkah tahapan penyelesaian

Simulasi perhitungan menggunakan program COBRA IV-I memerlukan asumsi dan model perhitungan dari fasilitas iradiasi FPM, untuk mendapatkan pendekatan kondisi operasi yang sebenarnya.

Program COBRA IV-I digunakan sebagai alat analisis desain dan keselamatan teras reaktor yang pendingin air, gas dan logam cair. Program COBRA IV-I pada analisis keselamatan termohidraulika pada fasilitas FPM digunakan

untuk menghitung harga DNBR minimum dan karakteristik termohidraulika yang meliputi harga fluks panas, suhu fluida pendingin dan kecepatan aliran fluida pendingin. Sedangkan masukan program COBRA IV-I disusun dengan memilih kartu-kartu yang telah tersedia. Masukan program COBRA IV-I yang digunakan dalam analisis adalah :

- a). Kartu 1 : Parameter-parameter fisis termohidraulika fluida pendingin
- b). Kartu 2 : Faktor friksi dan korelasi aliran dua fase
- c). Kartu 3 : Fluks panas di posisi aksial
- d). Kartu 4 : Geometri sub kanal
- e). Kartu 8 : Geometri dan parameter-parameter termal target FPM
- f). Kartu 9 : Variabel-variabel perhitungan (*transient* atau *steady state*)
- g). Kartu 11 : Data-data operasi reaktor (tekanan sistem, laju alir fluida pendingin dll.)
- h). Kartu 12 : Pilihan keluaran program COBRA IV-I

Reaktor G.A Siwabessy merupakan reaktor penelitian tipe kolam dengan Berilium sebagai reflektor, air ringan sebagai moderator dan fluida pendingin. Teras reaktor terletak 12,5 m dari permukaan air kolam. Komponen-komponen teras disusun dalam posisi jaringan yang berbentuk matriks 10x10 kisi untuk dudukan elemen bakar, elemen kendali, fasilitas iradiasi dan fasilitas-fasilitas lainnya. Ukuran tiap kisi 81 mm dan lebar 81 mm. Komponen-komponen teras dikelilingi oleh blok reflektor Berilium. Bahan bakar reaktor adalah U_3O_8Al/U_3Si_2Al dengan pengayaan U^{235} sebesar 19,75 %.

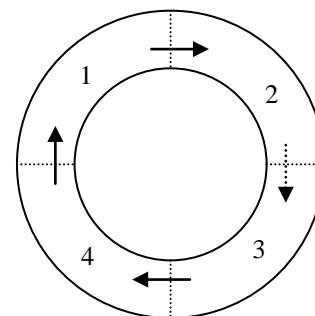
Fasilitas iradiasi FPM terdiri dari target FPM dan *stringer*. Target FPM dibentuk dari sejumlah Uranium dalam oksida dengan tingkat pengayaan U^{235} 93,7 % yang dilapiskan pada bagian dalam tabung baja tahan karat *Stainless Steel-304*. Kedua ujung tabung dilas sehingga tidak terdapat kebocoran antara bagian dalam tabung dengan lingkungannya. Diameter luar tabung 30 mm dengan panjang target 457,2 mm dan tebal kelongsong 1 mm. Target FPM pada pelaksanaan iradiasi disisipkan ke dalam teras reaktor menggunakan *stringer* yang ditempatkan pada posisi iradiasi. *Stringer* terbuat dari Al Mg_3 dengan dimensi luar 73 x 76 mm, yang dapat dimuat tiga target FPM. *Stringer* berlubang dibagian

bawahnya dengan diameter 25 mm untuk mengalirkan fluida pendingin.

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam analisis iradiasi target FPM adalah sebagai berikut:

1. Sumber panas berasal dari U^{235} yang divariasikan massanya mulai 3 gram dengan interval 1 gram dan dari panas gamma material penyusun target yaitu SS-304.
2. Perpindahan panas pada target hanya terjadi pada arah radial dan merata kesegala arah ^[2].
3. Posisi target dan *stringer* FPM akan dipasang di posisi CIP yaitu E-7 pada teras setimbang. Perhitungan menggunakan data laju alir hasil pengukuran teras setimbang dan distribusi aksial fluks neutron maksimum untuk mendapatkan batas keselamatan yang tertinggi ^[3].
4. Panas gamma SS-304 sebesar 9,93 W/gr ^[1].
5. Faktor kesalahan (*error*) dalam perhitungan DNBR sebesar 30 % ^[4] sehingga ditetapkan harga DNBR 1,95.
6. Harga ketidak stabilan aliran (S) minimum ditetapkan sebesar 4,39 dengan memperhitungkan faktor kesalahan sebesar 30 %.

Model perhitungan dibuat untuk menyederhanakan kondisi fasilitas iradiasi FPM. Model perhitungan yang digunakan dalam analisis menggunakan satu kanal yang terdapat pada *stringer* seperti diberikan pada Gambar 2. Kanal fluida pendingin di sekeliling target FPM dibagi menjadi 4 subkanal (sub kanal 1, 2, 3 dan 4) dengan satu batang target FPM. Arah panah menggambarkan arah aliran fluida pendingin di sekeliling target FPM.



Gambar 2. Model perhitungan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Keselamatan termohidrolika dari proses iradiasi target FPM yang disisipkan dalam teras reaktor dibatasi oleh harga ketidakstabilan aliran (S) dan DNBR, dengan mempertimbangkan faktor kesalahan (*error*) dalam analisis sebesar 30 % maka ditetapkan harga (S) minimum sebesar 4,39 dan harga DNBR minimum sebesar 1,95. Harga ketidakstabilan aliran (S) sangat bergantung pada fluks panas yang dibangkitkan target FPM dan temperatur fluida pendingin, sedangkan harga DNBR sangat tergantung pada fluks panas kritis dan fluks panas lokal pada target FPM. Perhitungan harga DNBR dan karakteristik termohidrolika yaitu fluks panas, kecepatan dan temperatur fluida pendingin dengan menggunakan paket program COBRA IV-I diasumsikan target ditempatkan pada sebuah *stringer* yang dapat diisi dengan 3 batang target FPM, sehingga setiap target FPM memperoleh fluida pendingin maksimum sebesar sepertiga bagian dari $43 \text{ m}^3/\text{h}$ dari hasil pengukuran laju alir pada posisi E-7^[3].

Fluida panas yang dibangkitkan target FPM berasal dari fluks panas gamma dan fluks panas fisi. Penggunaan tebal material SS-304 sebagai kelongsong target FPM yang dianggap tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM menyebabkan fluks panas gamma yang dibangkitkan dalam material SS-304 dianggap tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM. Pembangkitan fluks panas gamma yang tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM mengakibatkan fluks

panas yang dibangkitkan target FPM untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM bergantung pada pembangkitan fluks panas fisi. Harga fluks panas untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM yang diperoleh dari keluaran program COBRA IV-I merupakan hasil perhitungan menggunakan persamaan yang diulang kembali oleh program COBRA IV-I dengan interval *mesh* pada posisi aksial sebesar 4,06 cm. Harga fluks panas keluaran program COBRA IV-I sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Fluks panas maksimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM.

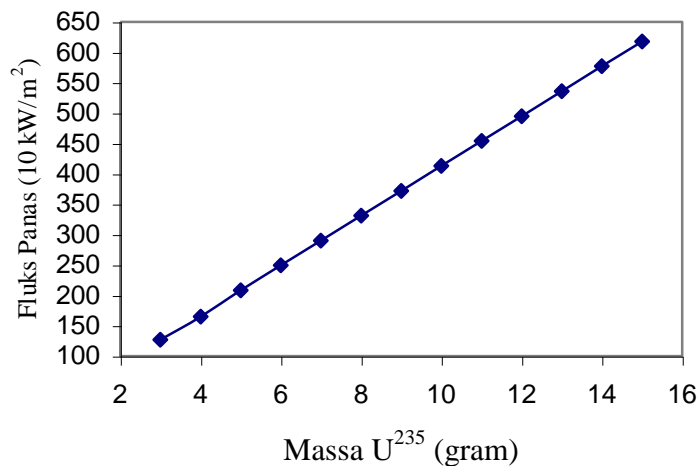
Massa U^{235} (gram)	Fluks Panas (q'') Maksimum (10^4 W/m^2)
3	126,9636
4	165,0369
5	208,3149
6	249,1164
7	290,1394
8	331,1778
9	372,0585
10	413,0654
11	453,9777
12	494,8899
13	535,8022
14	576,9037
15	617,6582

Tabel 2. Distribusi kuat sumber volumetrik pada posisi aksial sepanjang target FPM

Possisi Aksial (cm)	Profil U^{235} (%)	ϕ $10^{14} \text{ n}/(\text{cm}^2\text{s})$	q''' (kW/cm^3)
0,00	-	-	-
9,81	-	-	-
11,43	22,79	3,10	248,48847
19,05	19,39	2,75	220,43332
21,67	19,08	2,60	208,40968
34,29	20,17	1,83	146,68835
41,29	18,57	1,37	109,81587
45,72	-	-	-

Fluks panas maksimum untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM terjadi pada posisi aksial antara 11,16 cm sampai dengan 15,22 cm. Fluks panas maksimum untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM terjadi pada posisi tersebut disebabkan *mesh* target FPM pada

11,16 cm – 15,22 cm memiliki distribusi U^{235} 22,79% dan 13,39% dan mendapat fluks neutron maksimum (Tabel 2). Hubungan antara fluks panas maksimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik fluks panas maksimum sebagai sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM

Gambar 3 menunjukkan bahwa penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM mengakibatkan adanya kenaikan fluks panas maksimum secara linier. Kenaikan fluks panas yang dibangkitkan dalam target FPM akibat adanya penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM dapat dijelaskan menggunakan persamaan sebagai berikut [5,7,8]:

$$q'' = \frac{q'''V}{A} \quad (1)$$

Persamaan (1) menunjukkan bahwa fluks panas (q'') berbanding lurus dengan panas volumetrik (q''') dan volume bahan bakar fisil (V), dan berbanding terbalik dengan luas permukaan penghantar (A). Penggunaan luas permukaan penghantar target FPM yang menghadap fluida pendingin dan panas volumetrik yang tetap dalam analisis menyebabkan fluks panas hanya bergantung pada volume bahan bakar fisil (V). Peningkatan variasi muatan massa U^{235} dalam

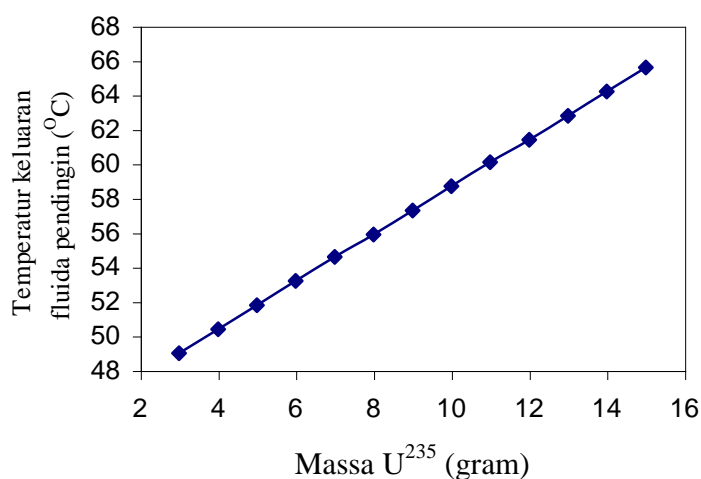
target FPM akan meningkatkan volume U^{235} dalam target FPM karena massa (m) U^{235} berbanding lurus dengan volume (V) U^{235} seperti pada persamaan : $\rho = m/v$, maka $v = m/\rho$, dengan ρ adalah densitas bahan bakar fisil U^{235} yang dalam analisis berharga tetap sebesar 19,1 gram/cm³ . Peningkatan volume U^{235} akibat adanya peningkatan massa U^{235} dalam target FPM akan meningkatkan fluks panas maksimum yang dibangkitkan dalam target FPM.

Peningkatan pembangkitan fluks panas dalam target FPM akibat adanya penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM akan berpengaruh terhadap temperatur fluida pendingin di sekeliling target FPM. Harga temperatur keluaran fluida pendingin untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM diberikan pada Tabel 3. Harga pada Tabel 3, mengambil harga temperatur keluaran fluida pendingin untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM dari harga temperatur fluida pendingin sepanjang target FPM hasil keluaran program COBRA IV-I.

Tabel 3. Temperatur keluaran fluida pendingin sebagai Fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM.

Massa U^{235} (gram)	Temperatur Keluaran Fluida Pendingin ($^{\circ}\text{C}$)
3	49,0
4	50,4
5	51,8
6	53,2
7	54,6
8	55,9
9	57,3
10	58,7
11	60,1
12	61,4
13	62,8
14	64,2
15	65,6

Hubungan antara variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM terhadap temperatur keluaran fluida pendingin diberikan pada Gambar 4. Terlihat pada Gambar 4 bahwa temperatur keluaran fluida pendingin meningkat dengan adanya penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM.



Gambar 4. Grafik temperatur keluaran fluida pendingin sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM

Peningkatan temperatur keluaran fluida pendingin disebabkan penggunaan temperatur masukan fluida pendingin yang tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM, sedangkan fluks panas yang dibangkitkan dalam target FPM semakin meningkat dengan adanya penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM seperti pada Gambar 3. Peningkatan fluks panas menyebabkan peningkatan panas yang diterima fluida pendingin dari permukaan target FPM, sehingga temperatur keluaran fluida pendingin naik secara linier terhadap fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM seperti pada Gambar 4.

Perubahan fluks panas dan temperatur fluida pendingin karena variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM akan berpengaruh terhadap harga instabilitas (S) fluida pendingin. Harga instabilitas (S) yang digunakan sebagai parameter keselamatan termohidraulika adalah harga S minimum yang harganya \geq harga S yang ditetapkan dalam analisis, yaitu 4,39 untuk operasi reaktor pada daya setimbang (*steady state*). Harga S minimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM diberikan pada Tabel 4.

Gambar 5, memperlihatkan bahwa penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM mengakibatkan harga instabilitas aliran (S)

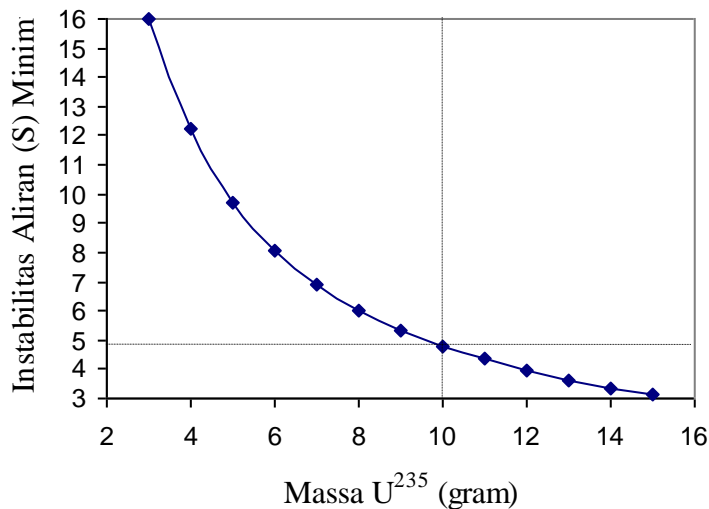
mengalami penurunan. Keadaan tersebut disebabkan pertambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM meningkatkan fluks panas dan temperatur fluida pendingin. Peningkatan fluks panas dan temperatur fluida pendingin berpengaruh pada perhitungan harga instabilitas aliran (S) yang sesuai dengan persamaan berikut [5]:

$$S = \frac{\eta}{\eta_c} = \frac{[T_s(z) - T_c(z)] \times V(z)}{q''(z)} \quad (2)$$

Tabel 4. Harga instabilitas aliran (S) sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM.

Massa U^{235} (gram)	Instabilitas Aliran (S) Minimum
3	15,99
4	12,27
5	9,72
6	8,06
7	6,90
8	6,02
9	5,34
10	4,79
11	4,34
12	3,97
13	3,65
14	3,37
15	3,14

Hubungan antara pertambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM dengan harga instabilitas aliran (S) diberikan Gambar 5.



Gambar 5. Harga S minimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM

Instabilitas dalam perhitungan digunakan temperatur jenuh (T_c) fluida pendingin pada tekanan sistem 2 atm sebesar $115,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dan kecepatan rerata fluida pendingin (v) sebesar 8,13 m/s. Pada persamaan (2) menunjukkan harga instabilitas aliran (S) berbanding lurus dengan harga parameter pelepasan gelembung (η) dan berbanding terbalik dengan parameter pelepasan gelembung yang diperoleh dari data statistik (η_c) yang besarnya untuk kecepatan rerata fluida pendingin 8,13 m/s η_c diperoleh sebesar 28

$\text{cm}^3\text{K/J}^2$). Harga η_c yang tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM mengakibatkan harga S hanya bergantung pada harga η . Harga η hanya bergantung pada fluks panas (q'') dan temperatur fluida pendingin (T_c) karena harga T dan v yang tetap untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM. Peningkatan fluks panas pada Gambar 3, dan temperatur fluida pendingin pada Gambar 4, karena adanya pertambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM akan mengakibatkan penurunan

harga η . Harga S berbanding lurus dengan harga η , sehingga penurunan parameter pelepasan gelembung (η) mengakibatkan penurunan harga instabilitas aliran (S) untuk setiap penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM seperti diperlihatkan pada Gambar 5.

Laju alir di dalam kanal akan stabil jika parameter pelepasan gelembung (η) di sepanjang kanal melampaui harga η_c , hal tersebut berarti harga S harus lebih besar dari 1. Hasil perhitungan harga S minimum yang diberikan pada Tabel 3. menunjukkan bahwa aliran fluida pendingin untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM masih dalam kondisi stabil karena harga S hasil perhitungan lebih dari satu. Batas keselamatan terhadap instabilitas aliran untuk memperoleh keselamatan yang tinggi pada proses iradiasi target FPM ditetapkan dalam analisis harus lebih besar sama dengan 4,39, maka target FPM yang masih aman untuk diiradiasi adalah target FPM dengan muatan massa U^{235} sampai dengan 10 gram. Target FPM dengan muatan massa U^{235} sebesar 10 gram memiliki harga S minimum sebesar 4,79 yang berada pada posisi antara 11, 16 cm sampai dengan 15,22 cm dari sisi atas target FPM, karena pada posisi tersebut terjadi penghantaran fluks panas maksimum oleh target FPM.

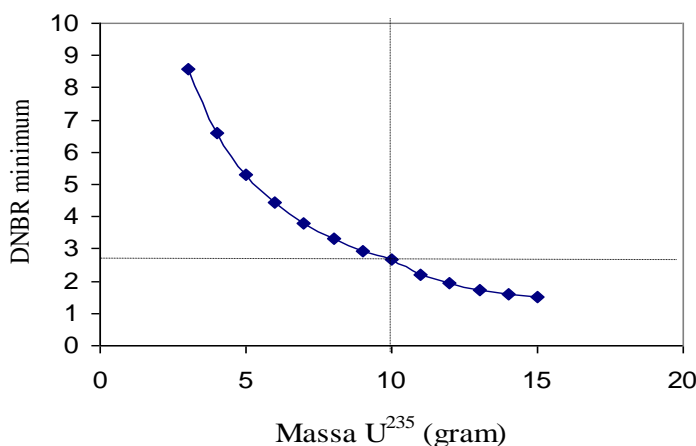
Faktor keselamatan termohidraulika yang juga digunakan sebagai pembatas pengoperasian reaktor untuk proses iradiasi target FPM adalah batas keselamatan terhadap rasio akhir pendidihan inti (DNBR). Akhir pendidihan inti berbahaya pada keselamatan teras reaktor dan target FPM karena pada keadaan akhir pendidihan inti telah tercapai titik *burnout* yang mengakibatkan kelongsong target FPM dapat pecah sehingga bahan-bahan radioaktif yang terkumpul dalam

target FPM dapat terlepas ke fluida pendingin DNBR. Dipengaruhi oleh perubahan fluks panas yang dihantarkan oleh target FPM karena variasi muatan massa U^{235} . Harga DNBR yang digunakan sebagai parameter keselamatan termohidraulika adalah harga DNBR minimum yang harganya harus lebih besar dari harga DNBR yang ditetapkan dalam analisis sebesar 1,95. Harga DNBR minimum untuk setiap variasi muatan massa U^{235} dalam target FPM diberikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Harga DNBR minimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM.

Massa U^{235} (gram)	DNBR Minimum
3	8,59
4	6,59
5	5,30
6	4,44
7	3,80
8	3,33
9	2,92
10	2,68
11	2,21
12	1,95
13	1,73
14	1,61
15	1,50

Hubungan antara penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM dengan harga DNBR minimum diberikan pada Gambar 6. Gambar tersebut menunjukkan penambahan muatan massa U^{235} dalam target FPM mengakibatkan penurunan harga DNBR minimum.



Gambar 6. Harga DNBR minimum sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM.

Penurunan harga DNBR minimum karena adanya pertambahan massa U^{235} dalam target diberikan oleh program COBRA IV-I sebagai berikut ^[5,7,8] :

$$DNBR = \frac{q''_{DNB}(z)}{q''(z)} \quad (3)$$

Harga DNBR berbanding lurus dengan fluks panas kritis (q''_{DNB}) dan berbanding terbalik dengan fluks panas lokal (q''). Peningkatan fluks panas pada Gambar 3 karena adanya pertambahan muatan massa U^{235} mengakibatkan terjadinya penurunan harga DNBR seperti pada Gambar 6. Batas keselamatan terhadap DNBR untuk memperoleh keselamatan yang tinggi pada proses iradiasi target FPM ditetapkan dalam analisis lebih besar dari 1,95, maka target FPM yang masih aman untuk diiradiasi adalah target FPM dengan muatan massa U^{235} sampai dengan 11 gram. Target FPM dengan muatan massa U^{235} sebesar 11 gram memiliki harga DNBR minimum sebesar 2,68 yang berada pada posisi antara 23,34 cm sampai dengan 27,40 cm, karena pada posisi tersebut terjadi penghantaran fluks panas yang tinggi oleh target FPM dengan temperatur fluida pendingin yang tinggi pula.

Harga S dan DNBR minimum sesuai dengan kriteria yang ditetapkan yaitu 4,39 dan 1,95, diperoleh muatan massa U^{235} dalam target FPM yang masih aman untuk diiradiasi di dalam teras reaktor adalah sebesar 10 gram, dengan parameter termohidrauliknya diberikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Parameter termohidraulika untuk muatan massa U^{235} dalam target FPM sebesar 10 gram

• Harga Instabilitas Aliran Minimum	4,79
• Harga DNBR Minimum	2,68
• Fluks Panas Maksimum	4130,654 kW/m ²
• Temperatur Fluida Keluaran	58,7°C

Dalam *Safety Analysis Report* diberikan parameter desain termohidraulika untuk teras Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy seperti pada Tabel 7.

Tabel 7. Parameter desain termohidraulika^[6]

• Harga Instabilitas Aliran untuk daya 30 MW	$\geq 3,38$
• Temperatur Fluida Keluaran pada Kanal Terpanas	74,4°C

Iradiasi target FPM dengan muatan massa U^{235} sampai dengan 10 gram masih dapat dilakukan dalam teras silisida reaktor dengan kondisi reaktor masih aman, karena tidak melampaui kriteria parameter desain termohidraulika untuk teras reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy.

KESIMPULAN

Hasil analisis keselamatan dari segi termohidraulika terhadap fasilitas iradiasi FPM dapat disimpulkan bahwa :

1. Hasil perhitungan termohidraulika dengan menggunakan paket program COBRA IV-I dilakukan untuk variasi muatan massa U^{235} dari 3 gram sampai dengan 15 gram, target FPM dengan muatan massa U^{235} sampai 10 gram untuk tiap target FPM dapat diiradiasi di dalam teras reaktor G.A. Siwabessy dengan kondisi reaktor masih aman.
2. Iradiasi target FPM dengan muatan massa U^{235} sebesar 10 gram dalam tiap target FPM tidak melampaui batas keselamatan termohidraulika yang ditetapkan.
3. Muatan massa U^{235} sebesar 10 gram di dalam setiap target FPM diperoleh harga minimum DNBR 2,68 dan harga ketidak stabilan aliran (S) sebesar 4,79.

DAFTAR PUSTAKA

1. SUROSO, Perhitungan Optimasi produk Mo⁹⁹ di Teras RSG-GAS, Prosiding Seminar Hasil Penelitian tahun 1998/1999, PRSG, BATAN, Serpong, 1999
2. PRAYOTO dkk., Pengantar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, BATAN, Jakarta, 1978
3. ISNAINI, M.D., dkk., Laporan Pengukuran Distribusi laju Alir teras X RSG- GAS, PRSG, BATAN, Serpong, 1994
4. SUDO, Y., KAMINAGA. M., *A New CHF Correlation Scheme Proposed for Vertical Rectangular Heated From Both Sides in Nuclear Research Reactors*, ASME, Journal of Heat Transfer, Vol., 115, Mei, 1993
5. DUDERSTADT, J.J., HAMILTON, L.J., *Nuclear Reactor Analysis*, John Willey & Sons, New York 1975.
6. ANONIM, *Safety Analysis Report*, BATAN, Serpong, September 1989
7. TODREAS, N.E., KAZIMI, M.S., *Nuclear System I, : Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990
8. TODREAS, N.E., KAZIMI, M.S., *Nuclear System II, : Thermal Hydraulic Fundamentals*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1990

