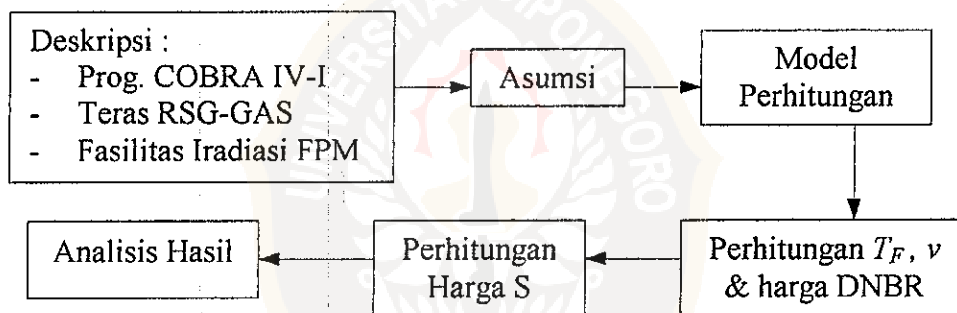


BAB III

METODA PENELITIAN

Analisis keselamatan termohidrolika 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 harga DNBR, perhitungan harga instabilitas aliran (S) dan terakhir analisis terhadap hasil perhitungan. Gambar 3.1. menunjukkan diagram blok metoda penelitian yang dilakukan.



Gambar 3.1. Diagram blok metoda penelitian.

Simulasi perhitungan menggunakan program COBRA IV-I memerlukan asumsi dan model perhitungan dari fasilitas iradiasi FPM untuk mendapatkan pendekatan kondisi operasi iradiasi target FPM dalam teras reaktor seperti kondisi yang sebenarnya. Simulasi perhitungan dengan menggunakan program COBRA IV-I dilakukan untuk target FPM yang disisipkan ke dalam teras Reaktor Serbaguna G. A. Siwabessy.

3.1. Deskripsi Paket Program COBRA IV-I

Paket program COBRA IV-I (COBRA IV-I = *Coolant Boiling in Rod Arrays IV-Interim*) dikembangkan oleh *The Pasific Northwest Laboratory, Battle Northwest* pada tahun 1976 dengan biaya dari *The Energy Research and Development Administration* (ERDA) dan *The Nuclear Regulatory Commission* (NRC). Program COBRA IV-I digunakan sebagai alat analisis desain dan keselamatan teras reaktor yang berpendingin air, gas dan logam cair.

Program COBRA IV-I pada analisis keselamatan termohidrolika pada fasilitas iradiasi FPM digunakan untuk menghitung harga DNBR minimum dan karakteristik termohidrolika, yaitu fluks panas, temperatur fluida pendingin dan kecepatan fluida pendingin. Masukan program COBRA IV-I disusun dengan memilih kartu-kartu yang telah tersedia, masukan program COBRA IV-I yang digunakan dalam analisis adalah (Wheeler, 1977) :

a) Kartu 1 : Masukan parameter-parameter fisis termohidrolika fluida pendingin.

Parameter-parameter fisis termohidrolika fluida pendingin yang diperlukan adalah tekanan sistem (p), temperatur (T), volume spesifik cairan (VF), volume spesifik gas (VG), entalpi cairan (HF), entalpi gas (HG), viskositas cairan dan konduktivitas panas dari fluida pendingin (KF).

b) Kartu 2 : Faktor friksi dan korelasi aliran dua fase.

Kartu masukan berisi korelasi-korelasi termohidrolika, memuat korelasi-korelasi yang digunakan untuk perhitungan termohidrolika yang relevan, yaitu korelasi Dittus-Boelter yang digunakan untuk menghitung bilangan *Nusselt* dan korelasi faktor friksi.

c) Kartu 3 : Masukan fluks panas di posisi aksial.

Fluks panas pada target FPM berasal dari fluks panas gamma dan fluks panas fisi (Anonim, 1993). Target FPM dibagi menjadi beberapa *mesh* pada posisi aksial. Fluks panas fisi dihitung dari kuat sumber fisi volumetrik persamaan (2-1) dikalikan dengan volume U^{235} dan dibagi luas permukaan yang menghadap fluida pendingin dari *mesh* tersebut, persamaan (2-4). *Mesh* target FPM disesuaikan dengan profil U^{235} di dalam target FPM. Fluks panas gamma dihitung dari panas gamma hasil pengukuran (Setiyanto, dkk., 1993) dikalikan dengan densitas (ρ) dan volume (V) material penyusun target FPM kemudian dibagi dengan luas permukaan (A) material penyusun target tersebut, pembagian volume dan luas permukaan material penyusun target pada posisi aksial target FPM sesuai dengan *mesh* untuk menentukan fluks panas fisi.

d) Kartu 4 : Masukan geometri subkanal.

Masukan berisi data dimensi dan bentuk kanal pendingin, yaitu perimeter basah dan panas, lebar celah antara subkanal yang berbatasan dan luas subkanal.

e) Kartu 8 : Masukan geometri dan parameter-parameter termal target FPM.

Masukan memuat data yang berkaitan dengan hantaran panas dalam target FPM, yaitu konduktivitas panas, panas jenis dan densitas dari material penyusun target FPM, serta memuat data diameter target, subkanal yang mengitari target dan fraksi panas yang diberikan pada subkanal tersebut.

f) Kartu 9 : Variabel-variabel perhitungan.

Masukan berisikan pilihan penyelesaian perhitungan yang dilakukan oleh program COBRA IV-I. Prosedur penyelesaian yang tersedia dalam program COBRA IV-I adalah prosedur penyelesaian secara eksplisit dan implisit. Prosedur penyelesaian secara eksplisit digunakan untuk kondisi transien, sedangkan prosedur penyelesaian secara implisit digunakan untuk kondisi setimbang (*steady state*). Analisis keselamatan termohidrolika pada fasilitas iradiasi FPM menggunakan prosedur penyelesaian secara implisit. Kartu 9 juga memuat data panjang kanal sepanjang target FPM.

g) Kartu 11 : Masukan data operasi reaktor.

Masukan berisikan data yang berkaitan dengan operasi termohidrolika reaktor, yaitu tekanan sistem, debit (laju alir) fluida pendingin dan temperatur masukan fluida pendingin.

h) Kartu 12 : Kartu pilihan keluaran program COBRA IV-I.

Memberikan keluaran hasil-hasil perhitungan berupa harga DNBR minimum dan karakteristik termohidrolika yaitu fluks panas, temperatur fluida pendingin dan kecepatan fluida pendingin.

3.2. Deskripsi Teras Reaktor Serbaguna G. A. Siwabessy

Reaktor Nuklir Serbaguna G. A. Siwabessy (RSG-GAS) yang dibangun sejak tahun 1983 dan diresmikan tanggal 20 Agustus 1987 merupakan reaktor tipe kolam dengan Berilium sebagai reflektor, air ringan sebagai moderator dan fluida pendingin. Teras reaktor terletak $\pm 12,5$ meter dari permukaan air kolam.

Komponen-komponen teras disusun di dalam posisi jaringan yang berbentuk matriks 10 x 10 kisi untuk dudukan elemen bahan bakar, elemen kendali, elemen reaktor, fasilitas iradiasi dan fasilitas-fasilitas pengujian lainnya. Ukuran tiap kisi adalah panjang sebesar 81,0 mm dan lebar 81,0 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%. Konfigurasi teras setimbang reaktor diberikan pada Tabel 3.1. dan gambar teras reaktor pada kondisi setimbang diberikan pada LAMPIRAN C.

Tabel 3.1. Konfigurasi Teras Setimbang RSG-GAS

Elemen Bakar	Jenis	U_3O_8Al/U_3Si_2Al , MTR
	Jumlah Plat/Elemen Bakar	40
	Jumlah Plat/ Elemen Kendali	8
	Ukuran <i>Plate</i> (mm)	1,30x70,75x625,0
	Material <i>Cladding</i>	AlMg
	Jumlah Elemen Reflektor	30
Termohidrolika	Bahan Pendingin	H ₂ O
	Aliran Pendingin (kg/s)	800
	Temperatur <i>Inlet</i> (°C)	40,5
Kemampuan	Daya Maksimum (MW)	34
	Fluks Neutron (n/cm ² s)	orde 10 ¹⁴

Sumber : PPTRR-BATAN

Panas yang timbul dalam teras akibat terjadinya reaksi fisi dibuang ke sistem pendingin reaktor. Panas yang dilepas oleh teras dan reflektor diambil oleh sistem pendingin primer dan kemudian dipindahkan ke sistem pendingin sekunder melewati penukar panas HE (HE = *Heat Exchanger*). Fluida pendingin yang

mengandung produk fisi sebelum memasuki sistem pendingin sekunder, diturunkan dahulu aktivitasnya di dalam kamar tunda (*delay chamber*) sekitar 59 detik, sehingga aktivitas pendingin sebelum pemindahan panas dapat turun.

3.3. Deskripsi Fasilitas Iradiasi FPM RSG – G. A. Siwabessy

Fasilitas iradiasi FPM terdiri dari target FPM dan *stringer*. Target FPM dibentuk dari sejumlah Uranium dalam bentuk oksida dengan tingkat pengayaan U^{235} 93,5% dilapiskan pada bagian dalam tabung baja tahan karat (SS-304 = *Stainless Steel-304*). Kedua ujung tabung dilas sehingga tidak ada kebocoran antara bagian dalam tabung dan lingkungannya. Diameter luar tabung 30 mm dengan panjang target 45,72 cm dan tebal kelongsong SS-304 1 mm. Gambar dari target FPM diberikan pada LAMPIRAN D.

Pada pelaksanaan iradiasi, target FPM disisipkan ke dalam teras reaktor dengan menggunakan *stringer* yang ditempatkan pada posisi iradiasi. *Stringer* terbuat dari AlMg₃ dengan dimensi luar (73 x 76) mm, yang dapat memuat tiga target FPM. *Stringer* berlubang di bagian bawah dengan diameter 25 mm untuk mengalirkan fluida pendingin setelah mendinginkan target FPM. Gambar *stringer* FPM diberikan pada LAMPIRAN E.

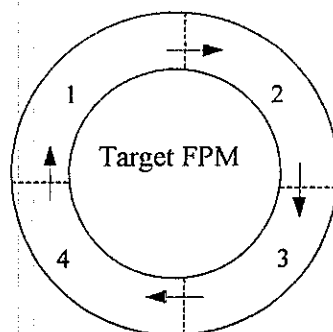
3.4. Asumsi

Beberapa asumsi yang menggambarkan kondisi target FPM yang dianalisis keselamatan termohidrolika pada proses iradiasi dalam teras reaktor adalah sebagai berikut :

1. Sumber panas berasal U^{235} yang divariasikan massanya mulai 3 gram dengan interval kenaikan 1 gram, dan dari panas gamma material penyusun target yaitu SS-304.
2. Perpindahan panas pada target hanya terjadi pada arah radial dan merata ke segala arah (Prayoto,1978).
3. Posisi target dan *stringer* FPM akan dipasang di posisi iradiasi pusat CIP, yaitu E-7 pada teras setimbang. Perhitungan menggunakan data laju air mengacu pada hasil pengukuran teras setimbang (Isnaini, dkk., 1993) dan distribusi aksial fluks neutron maksimum untuk mendapatkan batas keselamatan yang tinggi, mengacu pada hasil pengukuran teras setimbang (Anonim,1997).
4. Panas gamma SS-304 sebesar 9,93 W/gr (Setiyanto, dkk.,1993).
5. *Error* dalam perhitungan DNBR sebesar 30% (Sudo, Kaminaga, 1993) sehingga ditetapkan harga DNBR minimum sebesar 1,95.
6. Harga S minimum ditetapkan sebesar 4,39 dengan *error* dalam perhitungan sebesar 30% untuk mendapatkan batas keselamatan yang tinggi.

3.5. Model Perhitungan

Model perhitungan dibuat untuk menyederhanakan kondisi fasilitas iradiasi FPM. Model perhitungan yang digunakan dalam analisis adalah dengan menggunakan satu kanal yang terdapat pada *stringer* target FPM seperti pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Model Perhitungan

Kanal fluida pendingin di sekeliling target FPM dibagi menjadi 4 subkanal (subkanal 1, 2, 3 dan 4) dengan satu batang target FPM. Arah panah menggambarkan arah aliran fluida pendingin di sekeliling target FPM.

Data masukan program COBRA IV-I yang ditentukan dari model perhitungan adalah sebagai berikut :

- a) Data parameter-parameter fisis termohidrolika fluida pendingin diberikan pada LAMPIRAN F.
- b) Data distribusi fluks panas aksial sepanjang target FPM.

Fluks panas pada target FPM berasal dari fluks panas gamma (q_γ) dan fluks panas fisi (q_f) (Anonim, 1993). Penentuan fluks panas, target FPM dibagi menjadi beberapa *mesh* pada posisi aksial. *Mesh* target FPM untuk menentukan fluks panas fisi disesuaikan dengan profil U^{235} yang terdapat dalam target FPM seperti diberikan pada LAMPIRAN D, sedangkan *mesh* untuk menentukan fluks panas gamma sesuai dengan *mesh* pada penentuan fluks panas fisi dan ditambah *mesh* target FPM yang tidak terlapsi U^{235} yaitu bagian atas target (0 cm - 1,27 cm dan 1,27 cm - 3,81 cm) dan bagian bawah

target (41,91 cm – 45,09 cm dan 45,09 cm – 45,72 cm), seperti diberikan pada gambar target FPM di LAMPIRAN D.

Fluks panas gamma yang dibangkitkan material SS-304 pada posisi aksial sepanjang target FPM dihitung dengan menggunakan persamaan (2-3) :

$$q'' = q/A$$

karena q pada persamaan (2-3) dalam satuan Watt, sedangkan q SS-304 yang diketahui dalam satuan Watt/gram maka persamaan (2-3) menjadi :

$$q'' = \frac{q \times m}{A} = \frac{q \times \rho \times V}{A} \quad (3-1)$$

dengan q'' adalah fluks panas gamma (W/cm^2), m adalah massa material kelongsong SS-304, q adalah panas gamma yang besarnya 9,39W/gr (Setiyanto,dkk., 1993), ρ adalah densitas material SS-304 yang besarnya 7,689 gr/cm^3 , V adalah volume *mesh* material SS-304 (cm^3), dan A adalah luas permukaan hantaran *mesh* yang menghadap fluida pendingin (cm^2). Distribusi fluks panas gamma pada posisi aksial sepanjang target FPM ditunjukkan pada Tabel 3.2.

Fluks panas fisi yang dibangkitkan U^{235} sepanjang target FPM pada posisi aksial dihitung dengan menggunakan persamaan (2-4) :

$$q'' = \frac{q''' \pi R^2 L}{A} = \frac{q''' V}{A}$$

Tabel 3.2. Distribusi Fluks Panas Gamma Target FPM
pada Posisi Aksial

Posisi Aksial (10 ⁻² m)	V/A (10 ² m)	q_{γ} (10 ⁴ W/m ²)
0,00	-	-
1,27	0,75000	54,14978
3,81	0,04916	3,54981
11,45	0,04916	3,54981
19,05	0,04916	3,54981
21,67	0,04916	3,54981
34,29	0,04916	3,54981
41,91	0,04916	3,54981
45,09	0,04916	3,54981
45,72	0,75000	54,14978

Ket : Fluks panas gamma diantara posisi aksial.

dengan kuat sumber fisi volumetrik q''' pada posisi aksial dihitung menggunakan persamaan (2-1) :

$$q_{(z)}''' = Q N_{ff} \sigma_f \phi_{(z)}$$

$$q_{(z)}''' = Q \left(\frac{A_v \times \rho_{ff} \times i}{M_{ff}} \right) \sigma_f \phi_{(z)}$$

dengan Q sebesar 180 Mev, σ_f sebesar 568 barn dan ρ_{ff} sebesar 19,1 gr/cm³ (P.T. BATAN Teknologi), M_{ff} sebesar 235,0439 amu dan i sebesar 1,0 (El-Wakil, 1978), dan distribusi kuat sumber fisi volumetrik pada posisi aksial sepanjang target FPM diberikan pada LAMPIRAN G.

Fluks panas fisi diperoleh dari persamaan (2-1) dikalikan dengan volume *mesh* U²³⁵ dan dibagi luas permukaan hantaran *mesh* yang menghadap pendingin,

persamaan (2-5), dengan *mesh* sesuai dengan profil U^{235} dalam target FPM. Fluks panas total yang dibangkitkan target FPM merupakan penjumlahan fluks panas gamma dengan fluks panas fisi. Distribusi fluks panas fisi dan fluks panas yang dibangkitkan sepanjang target FPM pada posisi aksial diberikan pada LAMPIRAN H.

- c) Data parameter-parameter termal target, geometri target dan geometri subkanal diberikan pada LAMPIRAN I.
- d) Data kondisi operasi dan korelasi-korelasi termohidrolika yang digunakan diberikan pada LAMPIRAN J.

3.6. Perhitungan Karakteristik Termohidrolika dan DNBR

Perhitungan karakteristik termohidrolika dan harga DNBR (DNBR = *Departure from Nucleate Boiling Ratio*) target FPM pada tiap tingkat aksial dilakukan dengan menggunakan paket program COBRA IV-I. Karakteristik termohidrolika target FPM yang diperlukan dalam analisis adalah fluks panas yang dibangkitkan target FPM, kecepatan dan temperatur fluida pendingin.

Fluks panas yang dibangkitkan target FPM yang digunakan dalam perhitungan program COBRA IV-I telah diketahui terlebih dahulu melalui perhitungan menggunakan persamaan. Hasil perhitungan fluks panas menggunakan persamaan tersebut merupakan input pada kartu 3 program COBRA IV-I, yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan ekuivalen diskrit dari persamaan (2-9) hingga (2-11) yang diberikan pada LAMPIRAN B. Persamaan energi kanal dalam program COBRA IV-I diselesaikan untuk

menentukan harga entalpi cairan dan temperatur dinding penghantar panas, yang kemudian digunakan untuk menghitung densitas fluida (ρ), koefisien perpindahan panas permukaan penghantar (H_{surf}) dan temperatur fluida (T_f). Program COBRA IV-I menyelesaikan persamaan momentum untuk menentukan harga aliran silang (w) dan tekanan sistem (p), secara jelas urutan solusi yang dilakukan oleh program COBRA IV-I pada kondisi tunak diberikan pada LAMPIRAN K.

Perhitungan harga DNBR untuk kondisi fluks panas seragam dilakukan oleh program COBRA IV-I pada *subroutine* yang berbeda dengan prosedur penyelesaian implisit, yaitu pada *subroutine* CHF2 ($CHF = \underline{C}ritical Heat Flux). *Subroutine* CHF2 digunakan untuk memecahkan korelasi yang dikembangkan oleh Westinghouse untuk tiap tingkatan aksial, yaitu persamaan (2-5) :$

$$q_c'' = 0,28 \times 10^6 \left(\frac{h_c}{1000} \right)^{-2.5} \left(1 + \frac{G}{10^7} \right)^2 e^{\frac{-0,0012 L}{D}}$$

dengan parameternya adalah h_c yaitu entalpi fluida. Kemudian menghitung harga DNBR pada persamaan (2-8) :

$$DNBR = \frac{q_{DNB}''(z)}{q''(z)}$$

dengan harga $q_{DNB}'' = q_c''$.

3.7. Perhitungan Harga Instabilitas Aliran (S)

Harga instabilitas aliran (S) dihitung dengan memasukan karakteristik termohidrolika pada posisi aksial sepanjang target FPM yang diperoleh dari keluaran program COBRA IV-I, yaitu temperatur dan kecepatan fluida pendingin serta fluks panas yang dibangkitkan target FPM ke dalam persamaan (2-6). Hasil

perhitungan persamaan (2-6) dibagi dengan harga η_c yang besarnya diperoleh pada LAMPIRAN A yang ditentukan berdasarkan kecepatan fluida pendingin sistem, persamaan (2-7).

3.8. Analisis Hasil

Hasil keluaran program COBRA IV-I, yaitu fluks panas yang dibangkitkan target FPM, temperatur fluida pendingin dan harga DNBR, serta hasil perhitungan harga instabilitas aliran (S) dianalisis untuk setiap variasi muatan massa U^{235} di dalam tiap target FPM. Analisis dilakukan untuk setiap variabel hasil perhitungan sebagai fungsi muatan massa U^{235} dalam target FPM, sehingga diketahui muatan massa U^{235} yang optimal dalam target FPM yang sesuai dengan batas keselamatan termohidrolika yang ditetapkan.

