

---

---

## ANALISIS KESELAMATAN TERMOHIDROLIKA KONFIGURASI TERAS KOMPAK RSG-GAS

**Endiah Puji Hastuti**  
**Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset - BATAN**  
**e-mail: endiah@batan.go.id**

### ABSTRAK

**ANALISIS KESELAMATAN TERMOHIDROLIKA KONFIGURASI TERAS KOMPAK RSG-GAS.** Penelitian terhadap kemungkinan penggunaan konfigurasi teras kompak RSG-GAS telah dilakukan, dengan tujuan efisiensi penggunaan reaktor dan memperpanjang siklus operasi. Analisis terhadap parameter teras menunjukkan bahwa teras kompak TK-2 dan TK-4, dimana masing-masing 4 atau 2 buah posisi iradiasi (IP) digantikan oleh bahan bakar memenuhi aspek keselamatan fisika teras. Kedua alternatif teras kompak ini perlu diuji dari aspek keselamatan termohidrolika dan keselamatan teras. Analisis dilakukan dengan menggunakan penyelesaian persamaan perpindahan panas, massa dan momentum pada kondisi tunak. Distribusi faktor puncak daya radial dan aksial yang merupakan salah satu faktor penentu dianalisis pada ketinggian batang kendali 0-40 cm. Analisis dilakukan dengan memperhitungkan faktor ketidakpastian dan kondisi terparah pada daya nominal dan daya lebih. Hasil analisis menunjukkan bahwa dari aspek fisika maupun termohidrolika serta keselamatan, teras kompak TK-2 and TK-4 dapat diterapkan sebagai teras kompak alternatif RSG-GAS.

*Kata kunci: teras kompak, TK-2, TK-4, margin keselamatan, instabilitas aliran.*

### ABSTRACT

**THERMAL HYDRAULIC SAFETY ANALYSIS of RSG-GAS COMPACT CORE CONFIGURATION.** The RSG-GAS compact core configuration research availability was done, those research purpose are for reactor utilization efficiency and lengthened the operation cycle. Analysis for core parameters indicate that compact core namely TK-2 and TK-4, which has 4 or 2 irradiation position (IP) replaced by fuel element are fulfill in reactor physic point of view. It was needed to analyze from thermal hydraulic and reactor safety aspect for this two compact alternative cores. Analysis was done using heat transfer, mass and momentum equation on steady state condition. Radial and axial power peaking factor as an important factor are analyzed in 0-40 cm of control rod height. Uncertainty factors and worst case condition on nominal and over power level are taking into the calculation. The analysis result shows that based on aspect of core physic, thermal hydraulic and safety, TK-2 and TK-4 compact core can be implemented as an alternative compact cores of RSG-GAS.

*Keywords: compact core, TK-2, TK-4, safety margin, flow instability.*

### PENDAHULUAN

Reaktor RSG-GAS telah dioperasikan selama 18 tahun, pada kondisi teras setimbang, dalam kurun waktu selama ini hanya maksimum 4 posisi yang digunakan dari 8 buah posisi iradiasi dalam teras yakni posisi iradiasi pusat (*Central Irradiation Position=CIP*) dan posisi iradiasi (*Irradiation Position=IP*) yang tersedia. Posisi iradiasi

---

ini awalnya didesain untuk uji bahan bakar nuklir jenis baru yang membutuhkan fluks neutron termal yang tinggi. Akan tetapi, CIP dan IP dalam teras reaktor RSG-GAS saat ini hanya digunakan untuk iradiasi target produksi isotop. Untuk alasan penghematan bahan bakar telah dilakukan analisis neutronik pembentukan konfigurasi teras kompak dengan cara mengurangi posisi CIP dan IP.

Pada penelitian terdahulu telah dilakukan kajian terhadap parameter teras reaktor. Pengurangan masing-masing sebanyak dua buah posisi CIP dan IP dapat menaikkan panjang siklus operasi sebesar 5,5 hari daya penuh atau sama dengan 165 MWD<sup>[1]</sup>. Sedangkan hasil analisis fisika teras menunjukkan bahwa konfigurasi teras kompak dengan penutupan 100% IP dengan bahan bakar (tanpa 4 buah IP) merupakan konfigurasi teras kompak terbaik. Teras kompak ini dapat meningkatkan panjang siklus operasi sebesar 145 MWD atau setara dengan 4,83 hari daya penuh<sup>[2]</sup>.

Analisis keselamatan tersebut perlu diuji dan dilengkapi dengan analisis keselamatan dari aspek termohidrolika teras. Oleh karena itu pada penelitian ini dilakukan analisis keselamatan teras pada kondisi tunak dan secara bertahap seluruh analisis keselamatan pada kondisi transien/kecelakaan. Hasil analisis ini merupakan bagian dari analisis keselamatan secara keseluruhan yang diperlukan bagi dukungan ilmiah teknis guna pertimbangan penggunaan teras kompak RSG GAS.

Analisis dilakukan dengan menggunakan penyelesaian persamaan perpindahan panas, massa dan momentum pada kondisi tunak. Terdapat banyak kemungkinan model teras kompak RSG-GAS, untuk itu perlu dilakukan analisis awal (prediksi) untuk memilih jenis teras yang diperkirakan memenuhi syarat awal keselamatan dari segi neutronik. Hipotesis yang ingin dibuktikan di sini adalah teras yang memiliki faktor puncak daya radial dan aksial terendah dari aspek perhitungan neutronik akan memiliki margin keselamatan yang mencukupi daripada kondisi sebaliknya.

Data-data hasil perhitungan neutronik diperoleh dari hasil perhitungan peneliti sebelumnya, hasil perhitungan faktor puncak daya radial dan aksial dari kelompok neutronik. Laju alir dalam kisi elemen bakar dipilih laju alir minimum.

## **TEORI**

### **Definisi Teras Kompak RSG GAS**

Teras kompak RSG-GAS didefinisikan sebagai pengurangan/pemindahan posisi iradiasi di tengah teras (CIP) atau posisi iradiasi (IP) ke pinggir teras, dan menggantinya

dengan bahan bakar melalui pola pergeseran (manajemen) bahan bakar.

Perubahan penempatan bahan bakar segar dari pinggir ke tengah teras mengakibatkan naiknya nilai reaktivitas lebih teras dan panjang siklus operasi, karena bahan bakar segar memiliki kemampuan reaksi pembelahan lebih besar daripada bahan bakar dengan fraksi bakar yang besar dan sebaliknya. Hasil analisis neutronik untuk berbagai konfigurasi teras kompak ditinjau dari panjang siklus, fraksi bakar maksimum yang diperoleh serta faktor puncak daya ditunjukkan oleh Tabel 1.

**Tabel 1. Hasil Perhitungan Neutronik Berbagai Konfigurasi Teras Kompak** <sup>[2]</sup>

PARAMETER	Teras Acuan	TK-1	TK-2	TK-3	TK-4	TK-5
Panjang siklus operasi reaktor (MWD/hari)	615/20,50	825/27,50	760/25,33	800/26,67	715/23,83	760/25,33
Fraksi Bakar maksimum (%)	56,00	73,46	66,54	70,41	63,46	68,30
Reaktivitas lebih teras (%)	9,65	10,00	9,44	9,75	9,13	9,50
Marjin reaktivitas padam (%)	-1,30	-2,22	-2,51	-2,12	-2,15	-2,74
PPF Radial maksimum	1,23	1,39	1,30	1,33	1,26	1,34
PPF Radial x PPF Aksial	1,77	1,83	1,66	1,92	1,78	1,79
Jumlah posisi iradiasi	8	4	4	4	6	6

Teras Kompak 1 (TK-1) : Konfigurasi teras RSG GA Siwabessy apabila seluruh CIP (4 posisi) diganti dengan bahan bakar.

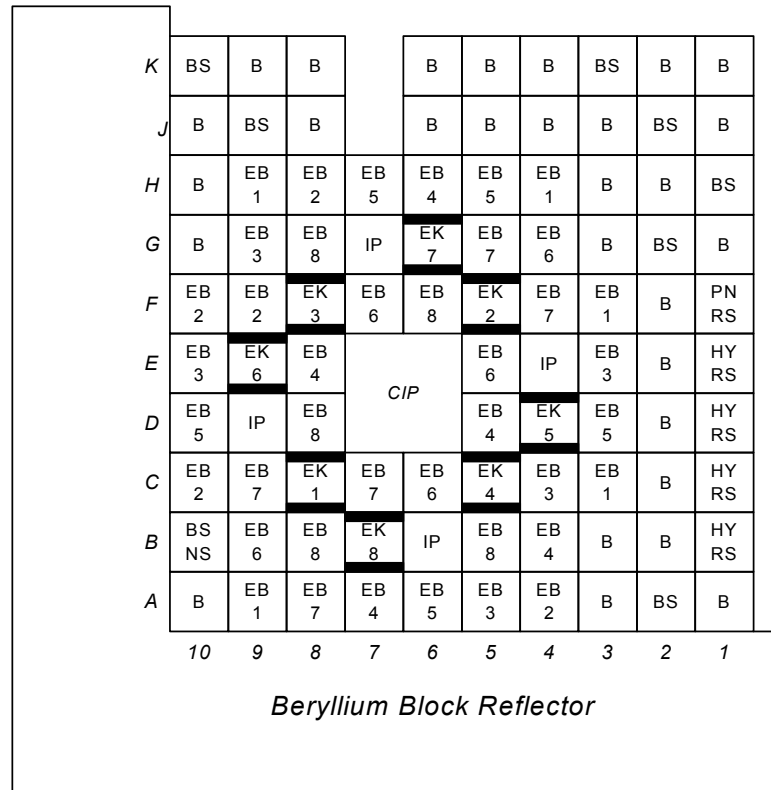
Teras Kompak 2 (TK-2) : Konfigurasi teras RSG GA Siwabessy apabila seluruh IP (4 posisi) diganti dengan bahan bakar.

Teras Kompak 3 (TK-3) : Konfigurasi teras RSG GA Siwabessy apabila 2 buah CIP dan 2 buah IP diganti dengan bahan bakar.

Teras Kompak 4 (TK-4) : Konfigurasi teras RSG GA Siwabessy apabila 2 buah IP diganti dengan bahan bakar.

Teras Kompak 5 (TK-5) : Konfigurasi teras RSG GA Siwabessy apabila 2 buah CIP diganti dengan bahan bakar.

Konfigurasi teras acuan RSG-GAS ditunjukkan oleh Gambar 1.



Keterangan: EB = Elemen bakar; EK = Elemen kendali.

**Gambar 1. Konfigurasi Teras Silisida RSG-GAS**

### Program COOLOD-N

COOLOD-N adalah program yang digunakan untuk menganalisis termohidrolika reaktor riset dengan elemen bakar tipe pelat. Program COOLOD-N yang dibuat oleh *Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI)*<sup>[3]</sup> ini berkemampuan menganalisis pendinginan konveksi bebas. Analisis dilakukan terhadap perpindahan panas di dalam kanal pendingin dan elemen bakar. Parameter-parameter tersebut dihitung dengan asumsi pembangkitan panas di dalam bahan bakar konstan sepanjang arah radial. Perhitungan perpindahan panas didasarkan pada pemecahan persamaan konduksi panas satu dimensi ke arah radial, dengan jumlah maksimum titik (*nodes*) ke arah aksial sebanyak 21 titik dan jumlah titik di bahan bakar ke arah radial sebanyak 5 titik.

## TATA KERJA/PEMODELAN

Analisis dilakukan berdasarkan prediksi awal dari kemungkinan konfigurasi teras kompak yang diperoleh hasil perhitungan neutronik, yaitu TK-2 dan TK-4. Perhitungan neutronik perlu dilanjutkan untuk mengetahui distribusi faktor puncak daya aksial sepanjang arah aksial bahan bakar. Hasil perkalian antara faktor puncak daya aksial dan radial minimum selanjutnya digunakan untuk analisis keselamatan teras kompak.

Analisis dilakukan pada kondisi terburuk (*worst case condition*), dengan menggunakan data laju alir minimal sebesar 800 kg/det<sup>[4]</sup> dan laju alir minimal yang melalui sebuah elemen bakar adalah 46,54 m<sup>3</sup>/jam<sup>[5]</sup>. Data masukan untuk perhitungan termohidrolika menggunakan data teras reaktor berbahan bakar silisida dengan tingkat muat 2,96 g U/cc seperti yang ditunjukkan di dalam Tabel 2.

**Tabel 2. Data Masukan Perhitungan termohidrolika teras reaktor RSG-GAS  
berbahan bakar silisida**

PARAMETER	TK-2	TK-4
Pembangkitan panas di teras reaktor, MW	30	34,2
Tekanan pendingin ke teras , kg/cm <sup>2</sup>	2,036	2,036
Suhu pendingin masuk ke teras, °C	44,5	44,5
Laju alir pendingin ke teras, kg/s	800	800
Laju alir pendingin min. per elemen bakar, m <sup>3</sup> /h	46,54	46,54
<b>Faktor-faktor puncak daya :</b>		
Faktor puncak daya radial, F <sub>R</sub>	1,9386	1,9386
F <sub>cool</sub>	1,167	1,167
F <sub>film</sub>	1,200	1,200
F <sub>hflx</sub>	1,200	1,200
F <sub>clad</sub> , F <sub>bond</sub> , F <sub>meat</sub>	1,000	1,000
Faktor puncak daya aksial, F <sub>A</sub>	1,9052	1,9514

Analisis dilakukan terhadap konfigurasi TK-2 dan TK-4 berbahan bakar silisida dengan tingkat muat 2,96 g U/cm<sup>3</sup> pada daya nominal 30 MW dan pada margin keselamatan daya 34,2 MW.

## HASIL DAN BAHASAN

### Pemilihan Konfigurasi Teras Kompak

Dari hasil perhitungan neutronik Tabel 1. terlihat bahwa konfigurasi teras kompak TK-2 dan TK-4 memiliki faktor puncak daya radial masing-masing 1,30 dan 1,26. Nilai faktor puncak daya radial ini jauh lebih rendah dari konfigurasi teras kompak lainnya. Selanjutnya dari hasil perkalian antara faktor puncak daya radial dan aksial terlihat bahwa TK-2 dan TK-4 masing-masing sebesar 1,66 dan 1,78. Kedua teras kompak ini mempunyai peluang untuk menjadi teras kompak RSG GA Siwabessy. Akan tetapi dari segi ketinggian penarikan batang kendali hal ini perlu ditinjau kembali karena perhitungan dilakukan pada ketinggian batang kendali maksimum sebesar 60 cm, hal ini tidak diijinkan dalam pengoperasian reaktor. Untuk itu diperlukan perhitungan lebih lanjut dilakukan perhitungan ulang untuk ketinggian batang kendali yang diijinkan pada kedua konfigurasi teras kompak tersebut. Hasil perhitungan faktor puncak daya sebagai fungsi ketinggian batang kendali ditunjukkan pada Tabel 3 berikut ini.

Tabel 3. Faktor puncak daya sebagai fungsi ketinggian batang kendali <sup>[6]</sup>

Tinggi BK	TK-2			TK-4		
	FR	FA	FR*FA	FR	FA	FR*FA
0	1,27	1,31	1,66	1,25	1,31	1,64
10	1,23	1,41	1,73	1,21	1,41	1,71
20	1,21	1,56	1,89	1,20	1,58	1,89
30	1,20	1,74	2,09	1,20	1,77	2,13
40	1,27	1,80	2,28	1,25	1,86	2,33
50	1,38	1,37	1,88	1,37	1,44	1,98
60	1,42	1,30	1,85	1,43	1,30	1,86

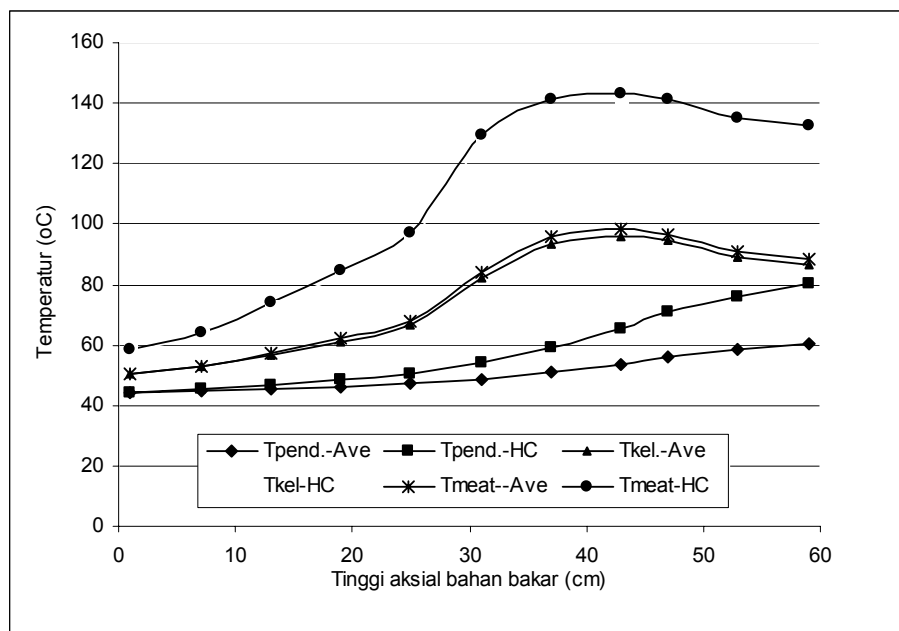
Dari Tabel 3 terlihat bahwa pada ketinggian batang kendali 30 cm, TK-2 dan TK-4 memiliki faktor puncak daya radial yang sama, akan tetapi TK-2 memiliki hasil perkalian faktor puncak daya radial dan aksial lebih rendah daripada TK-4. Sehingga prediksi awal menunjukkan TK-2 merupakan konfigurasi teras kompak terpilih dari aspek perhitungan neutronik. Untuk dapat mengetahui profil suhu sepanjang bahan bakar maka selanjutnya perlu dilakukan perhitungan distribusi faktor puncak daya aksial pada TK-2.

Teras alternatif TK-4 perlu dianalisis lebih lanjut apabila TK-2 terbukti mempunyai margin keselamatan yang mencukupi.

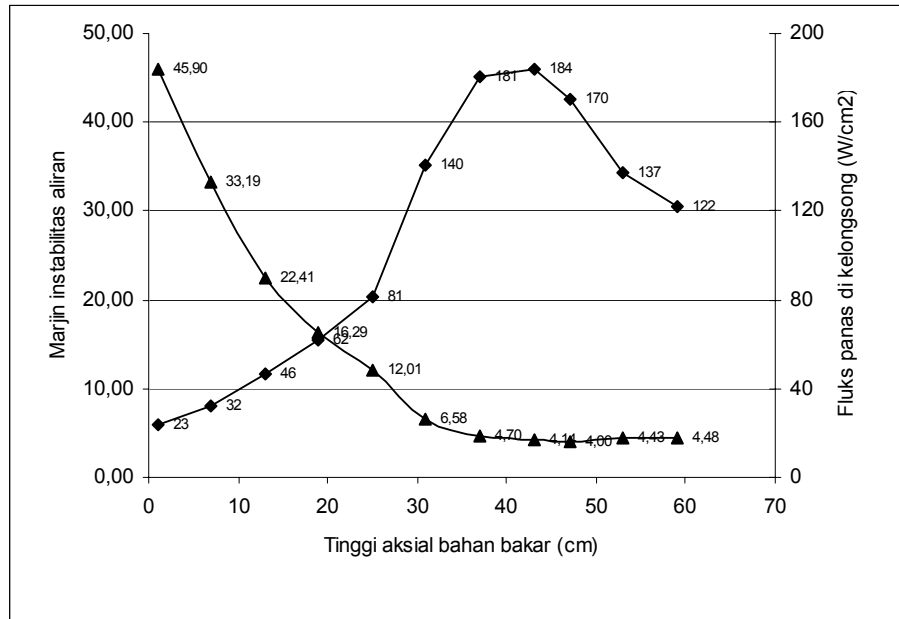
## Hasil Perhitungan Termohidrolika dan Keselamatan TK-2 Pada Kondisi Tunak

Perhitungan termohidrolika dan keselamatan dilakukan pada teras kompak terpilih TK-2, yaitu konfigurasi teras RSG-GAS apabila seluruh (4 posisi) IP digantikan dengan bahan bakar. Analisis keselamatan dilakukan dengan filosofi konservatisme dimana seluruh perhitungan menggunakan kondisi terparah. Analisis dilakukan untuk mengetahui marjin keselamatan dan profil suhu sepanjang bahan bakar kondisi nominal 30 MW pada kanal rerata dan kanal terpanas. Profil suhu pada kondisi nominal ditunjukkan oleh Gambar 2, sedangkan Gambar 3 menunjukkan profil marjin instabilitas aliran sepanjang bahan bakar.

Pada Gambar 2 terlihat bahwa profil suhu kelongsong dan bahan bakar mengikuti distribusi faktor puncak daya aksial pada penarikan batang kendali setinggi 30 cm. Pada bagian atas bahan bakar (0 cm) perbedaan suhu antara kondisi rerata (*average-ave*) dan kondisi kanal terpanas (*Hot channel-HC*) tidak terlampau lebar akan tetapi semakin ke bawah bahan bakar perbedaan tersebut semakin besar, hal ini disebabkan karena dengan terangkatnya batang kendali maka fluks panas yang dibangkitkan semakin besar. Sedangkan profil suhu pendingin dengan suhu masuk kanal 44,5°C juga mengikuti kecenderungan seperti yang ditunjukkan oleh suhu kelongsong dan bahan bakar akan tetapi suhu keluaran kanal pendingin mencapai maksimum akibat pengambilan panas yang semakin meningkat.



Gambar 2. Profil suhu sepanjang bahan bakar pada daya nominal 30 MW.



**Gambar 3. Profil Smin. dan fluks panas sepanjang bahan bakar (30MW)**

Pada Gambar 3 dapat dilihat profil marjin instabilitas aliran dan fluks panas yang dibangkitkan di kelongsong bahan bakar sepanjang arah aksial. Marjin instabilitas minimum (Smin) sebesar 4,00 tercapai pada pembangkitan fluks panas di kelongsong sebesar  $184 \text{ W/cm}^2$  pada ketinggian aksial bahan bakar 43 cm.

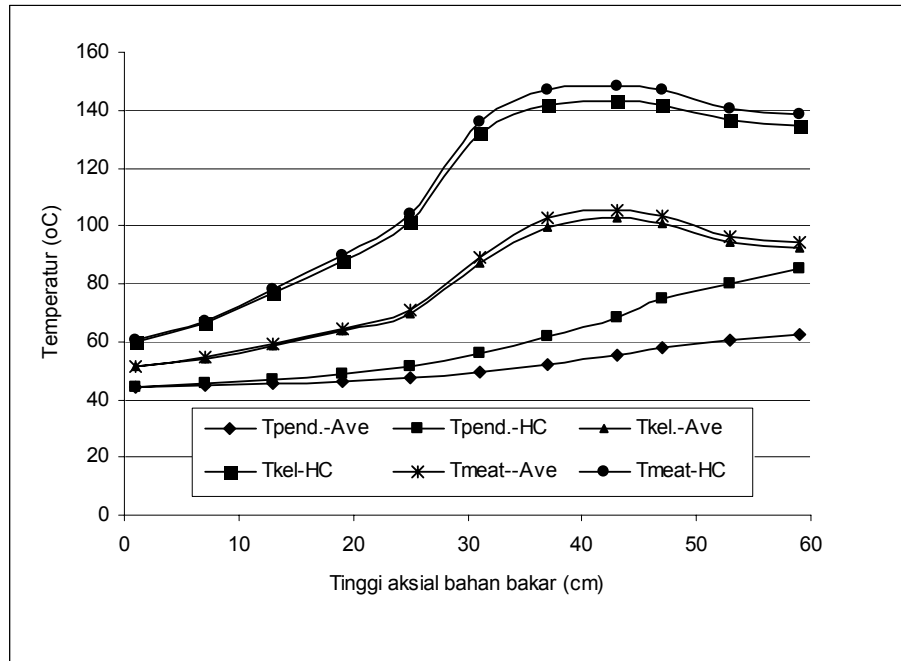
Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa marjin keselamatan instabilitas aliran pada kondisi nominal sebesar  $3,38^{[3]}$  tidak terlampaui, parameter termohidrolika dan keselamatan teras kompak TK-2 secara lengkap dirangkum dalam Tabel 4.

#### **Analisis TK-2 Pada daya lebih (34,2 MW)**

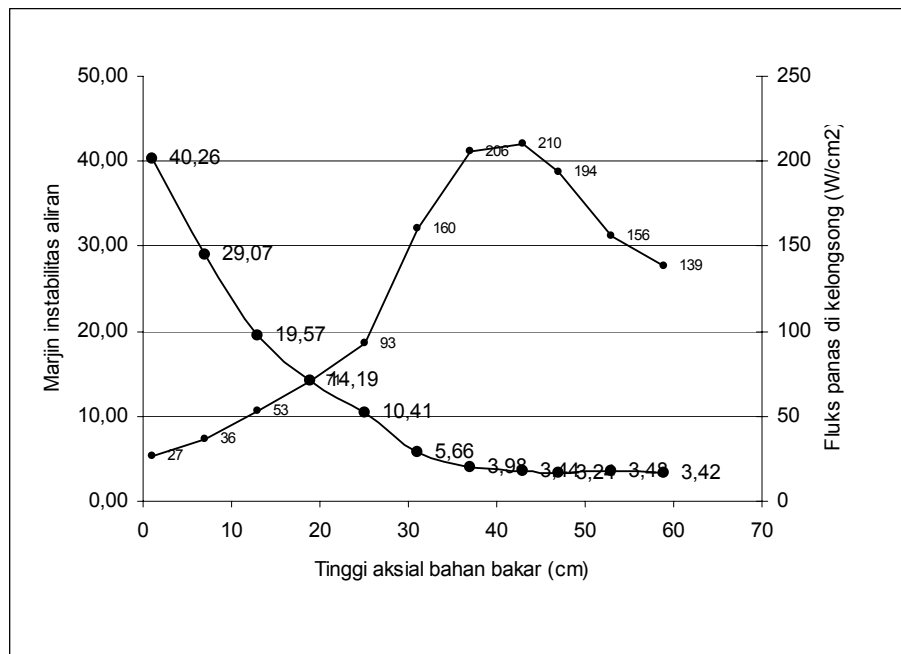
Analisis pada daya lebih sebesar 114% atau 34,2 MW dilakukan untuk mengetahui marjin keselamatan apabila terjadi lonjakan daya akibat suatu kecelakaan. Marjin keselamatan terhadap instabilitas aliran yang diterapkan untuk RSG-GAS adalah lebih kecil daripada pada daya nominal yaitu sebesar 2,67.

Profil suhu sepanjang bahan bakar pada daya lebih ditunjukkan oleh Gambar 4. Kecenderungan kenaikan suhu semakin besar pada ujung bawah bahan bakar sama dengan profil pada daya nominal karena distribusi faktor puncak dayanya sama. Suhu pendingin, kelongsong luar dan meat maksimum lebih panas daripada daya nominal karena pembangkitan dayanya jelas lebih tinggi daripada daya nominal.





Gambar 4. Profil suhu sepanjang bahan bakar pada daya nominal 34,2 MW.



Gambar 5. Profil Smin. dan fluks panas sepanjang bahan bakar (34,2MW)

Gambar 5 menunjukkan profil marjin instabilitas aliran dan pembangkitan fluks

---

panas pada kanal terpanas. Smin sebesar 3,2 tercapai ketika fluks panas mencapai puncaknya sebesar  $210 \text{ W/cm}^2$ , pada ketinggian 47 cm dari ujung atas bahan bakar. Hal ini menunjukkan bahwa margin keselamatan minimum belum mencapai nilai minimumnya. Sehingga dapat dinyatakan bahwa konfigurasi teras kompak TK-2 memenuhi margin keselamatan dari aspek neutronik maupun termohidrolika.

### **Hasil Perhitungan Termohidrolika dan Keselamatan TK-4 Pada Kondisi Tunak**

Melihat hasil perhitungan termohidrolika pada TK-2 yang masih memiliki margin keselamatan yang mencukupi, maka perlu dihitung alternatif penggunaan konfigurasi TK-4. Dengan cara perhitungan yang sama dengan yang dilakukan pada TK-2, maka pada Tabel 4 dirangkum seluruh parameter termohidrolika dan margin keselamatan teras kompak RSG-GAS.

Hasil perhitunagan faktor puncak daya radial pada ketinggian batang kendali 0-40 cm menunjukkan bahwa teras alternatif ini memiliki faktor puncak daya radial yang sama dengan TK-4 tetapi memiliki faktor puncak daya aksial yang lebih besar (lihat Tabel 3).

Analisis terhadap profil suhu, parameter termohidrolika dan margin keselamatan pada tingkat daya 30 MW menunjukkan bahwa pendingin keluaran, kelongsong dan bahan bakar mencapai suhu yang lebih tinggi daripada kondisi pada TK-2. Demikian pula dengan margin keselamatan yang lebih rendah yaitu sebesar 3,92, akibat pembangkitan fluks panas di kelongsong sebagai fungsi kenaikan faktor puncak daya aksial.

Seperti halnya pada daya nominal, analisis pada daya lebih yaitu 34,2 MW memberikan jaminan margin keselamatan yang mencukupi terhadap instabilitas aliran yaitu sebesar 3,18.

Kedua margin keselamatan TK-4, baik pada daya nominal maupun daya lebih menunjukkan bahwa teras kompak dimana 2 buah IP digantikan oleh bahan bakar aman dioperasikan baik dari aspek perhitungan neutronik maupun termohidrolika dan keselamatan teras.

**Tabel 4. Hasil Perhitungan Termohidrolika dan Keselamatan Teras Kompak alternatif RSG-GAS.**

PARAMETER	U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> Al		TK-2				TK-4			
	34,2 MW		30 MW		34,2 MW		30 MW		34,2 MW	
	Kanal rerata	Kanal Panas	Kanal rerata	Kanal Panas	Kanal rerata	Kanal Panas	Kanal rerata	Kanal Panas	Kanal rerata	Kanal Panas
Suhu Pendingin masuk kanal, °C	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5	44,5
Suhu Pendingin keluar kanal, °C	60,07	87,88	60,22	80,03	62,42	84,99	60,24	80,07	62,44	85,04
Suhu Kelongsong, °C	94,08	144,55	95,93	138,64	102,70	143,27	86,98	139,32	103,69	143,92
Suhu Bahan Bakar, °C	96,35	150,00	98,32	143,28	105,43	148,56	99,25	144,06	106,48	149,32
Koefisien Perpindahan panas, W/cm <sup>2</sup> °C	1,9627	2,9599	1,9648	2,5730	1,9935	2,8854	1,9651	2,5987	1,9938	2,9155
Fluks panas, W/cm <sup>2</sup>	75,38	216,29	79,20	184,3	90,29	210,09	80,984	188,40	90,45	214,77
Kecepatan pendingin, cm/det.	323,42	323,42	323	323	323	3,23	3,23	323	323	323
Tekanan Pendingin masuk kanal, kg/cm <sup>2</sup>	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997	1,997
Hilang tekan total sepanjang EB, kg/cm <sup>2</sup>	0,379	0,379	0,3789	0,3789	0,379	0,37903	0,379	0,379	0,379	0,379
Tekanan Pendingin keluar kanal, kg/cm <sup>2</sup>	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697	1,697
Suhu Jenuh pendingin, °C		118,46		118,46		118,46		118,46		118,46
Suhu Awal Pendidihan inti, °C		129,79		129,53		129,81		129,59		129,87
η,		66,6		88,3		71,5		86,7		70,2
Marjin instabilitas aliran		3,01		4,00		3,24		3,92		3,18
Smin RSG-GAS		2,67		3,38		2,67		3,38		2,67

---

## KESIMPULAN

Hasil analisis perhitungan termohidrolika dan keselamatan teras terhadap dua alternatif konfigurasi teras kompak RSG-GAS memberikan kesimpulan bahwa: Teras kompak TK-2, dengan konfigurasi teras RSG GA Siwabessy dimana seluruh IP (4 posisi) diganti dengan bahan bakar  $2,96 \text{ g U/cm}^3$  dan teras kompak TK-4, dimana 2 buah IP diganti dengan bahan bakar  $2,96 \text{ g U/cm}^3$  memenuhi margin keselamatan yang dipersyaratkan. Kedua konfigurasi tersebut memenuhi aspek keselamatan ditinjau dari perhitungan neutronik maupun termohidrolika saat tunak, pada kondisi daya nominal 30 MW maupun daya lebih 34,2 MW.

## SARAN

Kedua konfigurasi teras alternatif ini perlu dianalisis lebih lanjut pada kondisi transien, untuk selanjutnya dimintakan ijin operasi dan dapat diterapkan di RSG-GAS.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada rekan-rekan dari kelompok neutronik yang telah membantu perhitungan ulang menggunakan BATAN-3diff, terutama untuk rekan Lily Suparlina dan Tagor Malem Sembiring.

## DAFTAR PUSTAKA

1. SEMBIRING, T.M, LIEM, P.H. and TUKIRAN, 2000, *Fuel Management Strategy for The Compact Core Design Of RSG-GAS (MPR-30)*, Transactions of 4<sup>th</sup> International Topical Meeting on Research Reactor Fuel Management (RRFM 2000), hal.158-162, Colmar-France.
2. EKO SANG JAYA, *Analisis Konfigurasi Teras Kompak Reaktor RSG-GAS Dengan Pengurangan Jumlah Posisi Iradiasi*, Skripsi Program Studi Teknik Nuklir, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2003.
3. KAMINAGA, COOLOD-N : A Computer Code for the Analysis of Steady State Thermal Hydraulics in Plate Type Research Reactor, February 1994.

4. BATAN, *Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy*, Rev.8, Maret 1999.
5. M.D. ISNAINI, *Penelitian dan pengembangan Karakteristik Termohidrolika Teras RSG-GAS*, Presentasi Peneliti Muda, P2TRR, Serpong, 2004
6. LILY SUPARLINA, komunikasi pribadi, 2005.