

## ANALISIS DISTRIBUSI LAJU ALIR DESAIN TERAS REAKTOR RISET BERBAHAN BAKAR TINGKAT MUAT TINGGI

**Muh. Darwis Isnaini, Endiah Puji Hastuti dan Muh. Subekti**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, BANTEN

Telp.: 62-21-7560912, Fax.: 62-21-7560913, Kode Pos : 15310

e-mail: [darwis@batan.go.id](mailto:darwis@batan.go.id)

### ABSTRAK

**ANALISIS DISTRIBUSI LAJU ALIR DESAIN TERAS REAKTOR RISET BERBAHAN BAKAR TINGKAT MUAT TINGGI.** Telah dilakukan suatu analisis untuk menentukan distribusi laju alir dan neraca panas pada desain reaktor riset baru berbahan bakar tingkat muat tinggi dengan menggunakan kode Caudvap dan Coolod-N. Metode yang digunakan antara lain menetapkan tiga model teras yang akan dianalisis, dilakukan perhitungan distribusi laju alir dan penurunan tekanan sepanjang teras sebagai fungsi laju alir teras mulai 500 kg/s sampai 1300 kg/s. Pada batasan penurunan tekanan sepanjang teras sebesar 0,5 bar diperoleh laju alir teras total model A, B dan C masing-masing sebesar 482,56 kg/s, 415,11 kg/s dan 472,41 kg/s. Perhitungan kecepatan pendingin di dalam elemen bakar untuk variasi laju alir total 500 sampai 1300 kg/s menggunakan kode Caudvap diperoleh 3,71 m/s sampai 9,58 m/s, sedangkan dengan kode Coolod-N diperoleh 3,74 m/s sampai 9,70 m/s, perbedaan hasil perhitungan keduanya berkisar 0,88% sampai 1,19%. Dengan menggunakan acuan kesetimbangan panas bahwa diperlukan entalpi minimum yang sama dengan RSG-GAS sebesar 50 kJ/kg, maka model A, B dan C membutuhkan laju alir teras minimum masing-masing sebesar 780 kg/s, 852 kg/s dan 801 kg/s dengan penurunan tekanan sepanjang teras masing-masing 1,25 bar, 1,74 bar dan 1,54 bar, serta kecepatan pendingin di dalam elemen bakar masing-masing sebesar 5,68 m/s, 6,73 m/s dan 6,33 m/s. Dilihat dari segi aspek pendinginan di elemen bakar, maka model A dan C memiliki nilai yang lebih baik dibanding model B.

**Kata kunci:** Distribusi laju alir, reaktor riset, Caudvap, Coolod-N.

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF FLOW DISTRIBUTION FOR HIGH DENSITY FUEL RESEARCH REACTOR DESIGN.** *An analysis to determine the flow rate distribution and heat balance on the new high density fuel research reactor designed has been carried out using Caudvap and Coolod-N codes. The analysis method are deciding three core models to be analyzed, determining the flow rate distribution and pressure drop across the core as a function of core flow rate from 500 kg/s to 1300 kg/s. On the limitation pressure drop across the core of 0.5 bar, it was found that the total core flow rate of A, B and C models, were 482.56 kg/s, 415.11 kg/s and 472.41 kg/s, respectively. The calculation of coolant velocity in the fuel element as a function of core flow rate from 500 kg/s to 1300 kg/s using the Caudvap code gave results 3.71 m/s to 9.58 m/s, whereas using the Coolod-N code obtained 3.74 m/s to 9.70 m/s, the deviation ranges of the two calculations were 0.88% to 1.19%. Based on the heat balance as a reference, that minimum enthalpy required for RSG-GAS was 50 kJ/kg, so it was found that the A, B and C models required a minimum core flow rate of 780 kg/s, 852 kg/s and 801 kg/s, respectively, engaged with the pressure drop across the core of 1.25 bar, 1.74 bar and 1.54 bar, respectively, whereas the coolant velocity in the fuel elements of 5.68 m/s, 6.73 m/s and 6.33 m/s, respectively. In terms of the cooling aspects of the fuel element, it was concluded that the A and C models better than B model.*

**Keywords:** *Flow rate distribution, research reactor, Caudvap, Coolod-N.*

## PENDAHULUAN

Saat ini terdapat 3 (tiga) reaktor riset di Indonesia yang dioperasikan oleh BATAN yaitu reaktor TRIGA 2000 di Bandung yang beroperasi sejak 1965, reaktor Kartini di Yogyakarta yang beroperasi sejak 1979 dan reaktor serba guna (RSG) GA Siwabessy yang beroperasi sejak 1987. Dilihat dari awal tahun pengoperasiannya, maka terlihat bahwa ketiga reaktor riset tersebut sudah berusia tua, RSG-GAS sebagai reaktor termuda sudah berusia 25 tahun pada tahun ini. Mengingat fungsi dari ketiga reaktor tersebut sangat penting antara lain untuk fasilitas latihan dan penelitian bagi mahasiswa, operator dan para peneliti, selain digunakan untuk memproduksi radio isotop, neutron difraktometer untuk pengujian ilmu bahan, Analisis Aktivasi Neutron (AAN) dan berbagai keperluan lainnya, maka perlu dipersiapkan untuk merancang sebuah reaktor riset baru sebagai pendamping RSG-GAS.<sup>[1,2,3,4]</sup> Dengan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan suatu analisis desain teras yang saling berkaitan satu dengan yang lain.

Ada tiga hal pokok yang harus dilakukan di dalam desain atau analisis teras yaitu (1) desain neutronik dan kinetika reaktor, (2) desain termohidrolika teras, dan (3) desain perisai radiasi (dosimetri neutron).

Beberapa hal yang harus diperhatikan di dalam analisis termohidrolika desain teras reaktor riset adalah perhitungan tentang<sup>[5]</sup>:

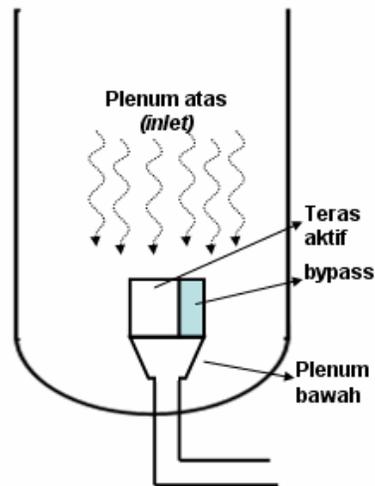
- Distribusi aliran (*flow distribution*) versus kehilangan tekanan (*pressure loss*) di dalam teras reaktor,
- Kesetimbangan panas (*heat balance*)
- Temperatur maksimum bahan bakar
- Awal pendidihan inti (*onset of nucleate boiling*)
- Fluks panas kritis (*critical heat flux*)
- Ketidak stabilan aliran (*flow instability*)
- Vibrasi dan deformasi pelat bahan bakar

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan hasil analisis desain yang berkaitan dengan termohidrolika teras Reaktor Riset Inovatif (RRI) berbahan bakar tingkat muat tinggi dengan elemen bakar tipe pelat. Penelitian ini dibatasi pada perhitungan distribusi laju alir di dalam teras reaktor dan perhitungan kesetimbangan panas. Dari perhitungan distribusi aliran akan didapatkan penurunan tekanan (*pressure drop*) sepanjang teras, laju alir dan kecepatan pendingin di masing-masing elemen teras. Dari perhitungan kesetimbangan panas, akan dihasilkan perhitungan entalpi (perbandingan daya dengan laju alir) dari masing-masing model. Di dalam makalah ini, akan disajikan hasil perhitungan distribusi laju alir dan kesetimbangan panas dari 3 model teras reaktor riset, dengan menggunakan kode Caudvap<sup>[6]</sup> dan Coolod-N<sup>[7]</sup> yang sudah tervalidasi<sup>[8, 9, 10]</sup>.

## DASAR TEORI

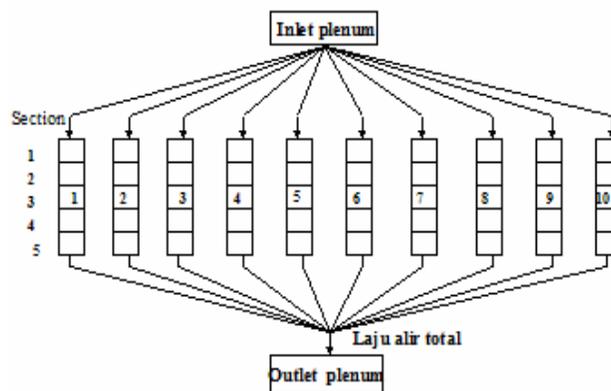
Teras reaktor riset inovatif tersusun atas beberapa elemen teras antara lain elemen bakar, elemen kendali, posisi iradiasi dan elemen reflektor (dapat berupa berilium atau D<sub>2</sub>O). Panas yang dibangkitkan di dalam teras reaktor harus dipindahkan oleh pendingin primer yang disirkulasikan di

dalam sistem pendingin primer dengan menggunakan pompa primer. Laju alir pendingin yang masuk ke dalam teras dibedakan menjadi 2 yaitu laju alir teras dan laju alir *bypass*. Laju alir teras aktif atau laju alir aktif (*active flow rate*) dipergunakan untuk menyebut aliran yang berhubungan (kontak) langsung dengan pelat bahan bakar. Sedangkan yang termasuk laju alir *bypass* adalah laju alir yang melalui kanal-kanal yang terbentuk di dalam elemen reflektor, di dalam posisi iradiasi, di dalam pengarah batang kendali dan laju alir antara elemen berilium dengan penyelubung teras. Skema lintasan aliran pendingin primer di dalam teras reaktor di tunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1. Garis besar lintasan aliran sistem pendingin primer Reaktor Riset.**

Di dalam perhitungan, tiap jenis elemen teras (elemen bakar, elemen kendali, elemen reflektor, dan lain-lain) masing-masing dimodelkan sebagai satu jenis kanal, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2. Pembagian jenis kanal reaktor riset inovatif.**

Beberapa persamaan yang dipergunakan di dalam perhitungan distribusi aliran di dalam teras reaktor riset.

**Persamaan konservasi massa.**

Besarnya laju alir total ( $Q_{total}$ ) sama dengan besarnya laju alir elemen teras ( $Q_i$ ) dikalikan jumlah dari masing-masing elemen teras ( $N_i$ ).

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^N (N_i \times Q_i) \dots\dots\dots(1)$$

Perhitungan kehilangan tekanan (*pressure loss*)  $\Delta PT_i$  untuk setiap kanal, menggunakan integral dari persamaan Bernoulli:

$$\Delta PT_i = \Delta P_i + \rho \cdot g(Hi_i - Ho_i) \dots\dots\dots(2)$$

dimana :

- $\Delta PT_i$  = kehilanagn tekanan (*pressure loss*) sepanjang kanal ke-i
- $\Delta P_i$  = penurunan tekanan ke-i, yang bisa disebabkan karena gesekan, ekspansi, kontraksi dan/atau akselerasi
- $\rho$  = rapat jenis (densitas) pendingin air, kg/m<sup>3</sup>
- $g$  = percepatan gravitasi, m/s<sup>2</sup>
- $Hi_i$  = Tinggi titik masukan kanal ke-i dari permukaan air, m
- $Ho_i$  = Tinggi titik keluaran kanal ke-i dari permukaan air, m

Karena kehilangan tekanan antara dua titik di dalam teras reaktor adalah tertentu (unik) dengan tidak mengindahkan jalan yang dilalui dari titik satu ke titik lainnya, maka :

$$\Delta PT_1 = \Delta PT_2 = \Delta PT_3 = \dots = \Delta PT_i = \Delta PT \dots\dots\dots(3)$$

Adapun beberapa korelasi yang dipakai untuk menghitung penurunan tekanan di setiap zona dari kanal yang dianalisis, antara lain:

▪ **Penurunan tekanan akibat Gesekan (*Friction*)**

Penurunan tekanan akibat gesekan sepanjang segmen dengan tampang lintang yang tetap ditentukan dengan:

$$\Delta P_f = f \frac{L \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot De} \dots\dots\dots (4)$$

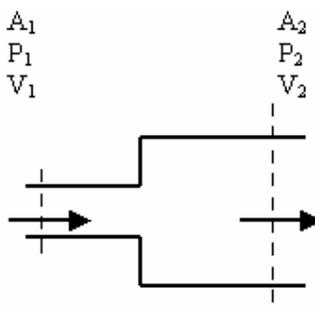
dimana:

- $\Delta P_f$  = penurunan tekanan akibat gesekan;       $L$  = panjang saluran, m
- $De$  = diameter ekuivalen, m;                               $V$  = kecepatan pendingin, m/s
- $f$  = faktor gesekan, yang besarnya ditentukan oleh  $f = \frac{0,184}{Re^{0.2}}$ , dengan

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot De}{\mu} \quad \text{untuk kanal berbentuk bulat atau tak teratur, dan}$$

$$Re = \frac{0,66 \cdot \rho \cdot V \cdot De}{\mu} \quad \text{untuk kanal berbentuk kotak (bahan bakar pelat).}$$

▪ **Penurunan tekanan karena ekspansi**

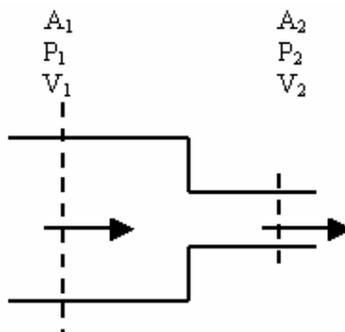


**Gambar 3. Perubahan luas penampang saluran karena ekspansi**

Penurunan tekanan irreversibel akibat perubahan luas penampang saluran membesar (ekspansi) yaitu  $A_{i,j+1} > A_{i,j}$ , dipergunakan korelasi :

$$\Delta P_{\text{exp}}(Q_i) = 0,5 \rho \cdot V_{i,j}^2 \left( 1 - \frac{A_{i,j}}{A_{i,j+1}} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

▪ **Penurunan tekanan karena kontraksi tiba-tiba**



**Gambar 4. Perubahan luas penampang saluran karena kontraksi.**

Penurunan tekanan *irreversibel* akibat perubahan luas penampang saluran yang mengecil (kontraksi), yaitu  $A_{i,j+1} < A_{i,j}$ , dipergunakan korelasi :

$$\Delta P_{\text{kontr}} = 0,5 \cdot Fk_{i,j} \cdot \rho \cdot V_{i,j+1}^2 \dots\dots\dots (6)$$

dengan  $Fk_{i,j}$  diambil dari tabel berikut :

RR	0,0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,0
$Fk_{i,j}$	0,5	0,45	0,36	0,21	0,07	0,0

dimana  $RR = \frac{A_{i,j+1}}{A_{i,j}}$

▪ **Perubahan tekanan karena percepatan (akselerasi)**

Penurunan tekanan yang timbul karena fenomena percepatan (akselerasi) diperhitungkan dari perubahan di titik lengkap masukan (*inlet plenum*) dan titik lengkap keluaran (*outer plenum*).

$$\Delta P_{acc}(Q_i) = \frac{0,5x Q_{tot}^2 \left( \frac{1}{A_{ip}^2} - \frac{1}{A_{op}^2} \right)}{\rho} \dots\dots\dots (7)$$

**Kode CAUDVAP**

Kode CAUDVAP v2.60 merupakan program komputer PC yang dikembangkan oleh Nuclear Engineering Division, INVAP SE, Argentina, untuk menghitung distribusi laju alir dan penurunan tekanan di dalam teras reaktor. Kode ini dapat menghitung distribusi kecepatan pendingin yang melalui beberapa kanal yang berbeda yang terhubung secara paralel antara plenum masukan dan keluaran yang berbeda ketinggiannya, dengan batasan bahwa perbedaan tekanan antara plenum masukan dan keluaran hanya disebabkan oleh gaya hidrostatik, di mana aliran air di dalam kanal-kanal harus dalam fase cairan (*liquid*).

**Kode Coolod-N**

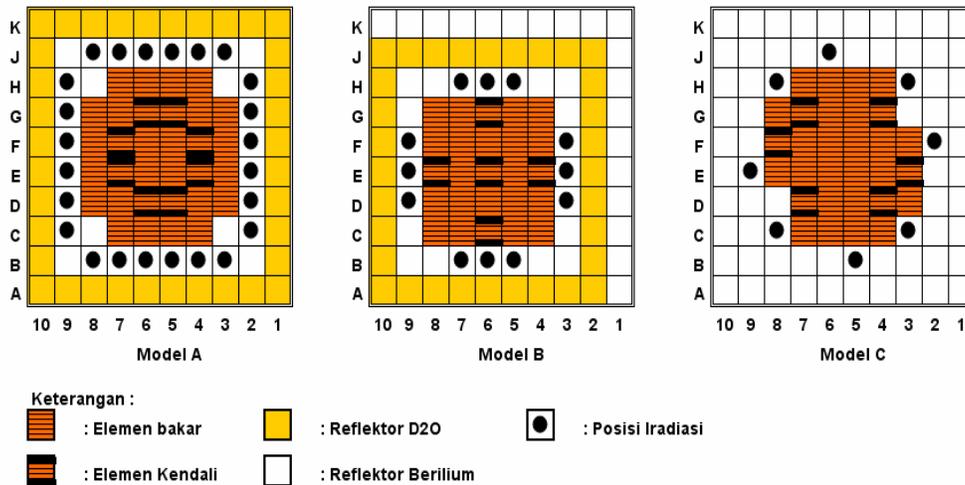
Kode Coolod-N dikembangkan oleh JAERI Jepang, untuk analisis termohidrolika reaktor riset. Kode ini dapat dipakai untuk menghitung kecepatan pendingin dan penurunan tekanan sepanjang elemen bakar, distribusi temperatur elemen bakar (pendingin, pelat bahan bakar dan *meat* bahan bakar).

**TATA KERJA**

Di dalam analisis distribusi laju alir desain reaktor riset yaitu laju alir yang melalui elemen teras dilakukan dengan menggunakan kode Caudvap. Dari hasil tersebut diperoleh laju alir, kecepatan pendingin dan penurunan tekanan yang melalui tiap segemen dari masing-masing elemen teras, termasuk laju alir pendingin yang melalui elemen bakar. Dari jumlah laju alir teras aktif yang dihasilkan oleh kode Caudvap, digunakan juga sebagai masukan ke dalam kode Coolod-N untuk analisis termohidrolika. Dari perhitungan tersebut dapat dibandingkan kecepatan pendingin dan penurunan tekanan untuk kedua kode Caudvap dan Coolod-N. Adapun langkah analisis yang dilakukan adalah sebagai berikut:

▪ **Teras reaktor dan elemen teras**

Dipilih 3 jenis teras yang akan dianalisis yaitu model A, B<sup>[2]</sup> dan C<sup>[3]</sup> seperti terlihat pada Gambar 5, dengan komposisi elemen teras seperti ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 5. Konfigurasi teras reaktor riset model teras A, B dan C.

- Dilakukan perhitungan distribusi laju alir, pada kondisi penurunan tekanan teras sebesar 0,5 bar (sebagai acuan RSG-GAS untuk laju alir minimum)<sup>[4]</sup>.
- Dilakukan perhitungan distribusi laju alir sebagai fungsi laju alir teras mulai 500 kg/s sampai 1300 kg/s.

Tabel 1. Jenis dan komposisi elemen teras dari masing-masing model.

Jenis elemen teras	Komposisi elemen teras		
	Model A	Model B	Model C
Elemen bakar	24	20	24
Elemen kendali	8	5	6
Reflektor Berilium	8	31	62
Reflektor D2O	36	32	0
Posisi iradiasi	24	12	8

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebagai acuan, digunakan data dari RSG-GAS, di mana pada laju alir minimum teras sebesar 800 kg/s diperoleh penurunan tekanan (*pressure drop*) sebesar 0,5 bar. Dari hasil tersebut, nilai penurunan tekanan sebesar 0,5 bar dipergunakan sebagai langkah awal dalam perhitungan laju alir minimum teras model A, B dan C, sebagaimana terlihat pada Tabel 2<sup>[11]</sup>.

Tabel 2. Perhitungan distribusi laju alir teras model A, B dan C untuk data penurunan tekanan 0,5 bar.

Jenis laju alir (total)	Model A		Model B		Model C	
	Laju alir (kg/s)	Laju alir (%)	Laju alir (kg/s)	Laju alir (%)	Laju alir (kg/s)	Laju alir (%)
<b>Teras aktif :</b>	<b>383,26</b>	<b>79,42</b>	<b>301,21</b>	<b>72,56</b>	<b>362,69</b>	<b>76,77</b>
• Elemen bakar	287,28	59,53	238,41	57,43	287,10	60,77
• Pelat dalam elemen kendali	81,42	16,87	50,70	12,21	61,03	12,92

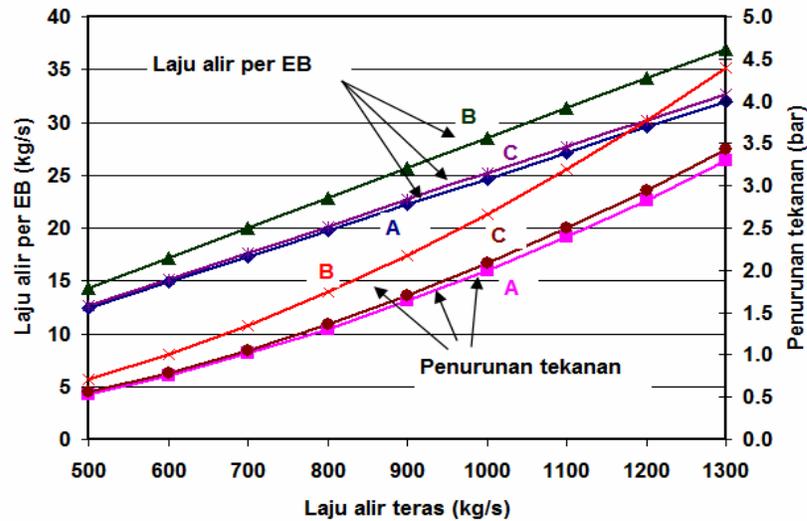
• Antara 2 elemen bakar	14,56	3,02	12,10	2,92	14,56	3,08
<b>Bypass :</b>	<b>99,29</b>	<b>20,58</b>	<b>113,90</b>	<b>27,44</b>	<b>109,72</b>	<b>23,23</b>
• Batang kendali	3,13	0,65	1,95	0,47	2,34	0,50
• Reflektor Berilium	11,18	2,32	43,17	10,40	86,60	18,33
• Reflektor D <sub>2</sub> O	50,31	10,43	44,57	10,74	0,00	0,00
• Posisi iradiasi	20,34	4,32	10,39	2,50	6,94	1,47
• Selubung teras ( <i>core shroud</i> )	13,83	2,87	13,82	3,33	13,83	2,93
<b>Laju alir total</b>	<b>482,56</b>	<b>100,0</b>	<b>415,11</b>	<b>100,0</b>	<b>472,41</b>	<b>100,0</b>

**Tabel 3. Kecepatan pendingin pada berbagai elemen teras**

Elemen teras	Kecepatan pendingin (m/s)		
	Model A	Model B	Model C
Antar pelat dalam elemen bakar	3,53	3,51	3,52
Antar pelat dalam elemen kendali	3,53	3,51	3,52
Antara 2 elemen bakar	3,91	3,90	3,91
Reflektor Be	3,51	3,50	3,51
Reflektor D <sub>2</sub> O	3,51	3,50	tidak ada
Posisi iradiasi	2,90	2,89	2,90
Selubung teras ( <i>core shroud</i> )	3,46	3,46	3,46

Dari Tabel 2 terlihat bahwa dengan penurunan tekanan teras sebesar 0,50 bar, diperoleh laju alir teras total model A, B dan C masing-masing sebesar 482,56 kg/s, 415,11 kg/s dan 472,41 kg/s, dengan prosentase laju alir teras aktif masing-masing 79,42%, 72,56% dan 76,77%, sedangkan prosentase laju alir ke elemen bakar masing-masing sebesar 59,53%, 57,43% dan 60,77%. Besarnya prosentase laju alir teras aktif model A dibanding model C, dikarenakan jumlah elemen kendali model A lebih banyak 2 buah. Adapun kecepatan pendingin di dalam kanal antar pelat di dalam elemen bakar untuk model A, B dan C masing-masing sebesar 3,53 m/s, 3,51m/s dan 3,52 m/s lebih rendah dari kecepatan pendingin minimum acuan (pada elemen bakar RSG-GAS) sebesar 3,70 m/s. Dari Tabel 2 dan 3, sudah diperoleh gambaran distribusi laju alir pada masing-masing elemen teras dan masing-masing kecepatannya. Untuk mengetahui kebutuhan besar pendingin yang diperlukan, maka dilakukan perhitungan distribusi laju alir teras, dengan variasi laju alir total teras mulai dari 500 sampai 1300 kg/s dengan interval 100 kg/s, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

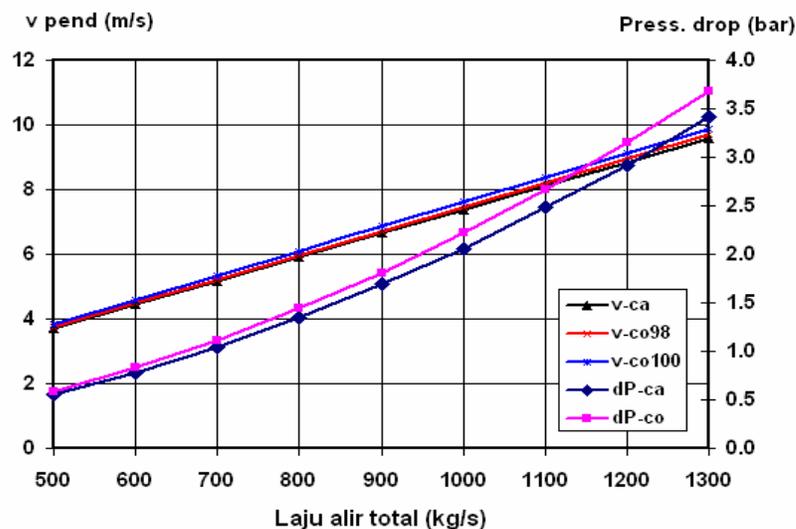
Dari grafik laju alir per elemen bakar sebagai fungsi besarnya laju alir teras total, menunjukkan bahwa pada model B mendapatkan laju alir yang paling besar dibanding model A dan C, hal ini disebabkan jumlah elemen bakar dan elemen kendali pada model B kurang dari jumlah elemen bakar dan elemen kendali model A dan C. Sedangkan laju alir elemen bakar model C sedikit lebih besar dibanding model A, hal ini disebabkan jumlah elemen kendali dan posisi iradiasi model C kurang dari model A, sehingga memberikan pengaruh 6,8% aliran ke elemen bakar tetapi reflektor model C lebih banyak dibanding model A sehingga memberikan pengaruh -5,58%, sehingga distribusi aliran ke elemen bakar naik pada model C lebih besar sekitar 1,22% dibanding pada model A.



Gambar 6. Grafik laju alir per elemen bakar dan penurunan tekanan teras sebagai fungsi besarnya laju alir teras total, untuk model A, B dan C.

Namun jika dilihat dari besarnya penurunan tekanan, terlihat bahwa penurunan tekanan teras model B lebih besar 33% dan 28% masing-masing dibanding penurunan tekanan teras model A dan C. Hal ini berakibat kurang baik, karena penurunan tekanan yang besar akan memicu adanya kavitasi pada pompa pendingin. Adapun model A dan C mempunyai penurunan tekanan yang hampir sama.

Sebagai pembandingan perhitungan dengan kode Caudvap, dilakukan juga perhitungan kecepatan pendingin dan penurunan tekanan dengan menggunakan kode Coolod-N, dengan sampel data teras C. Hasil perhitungan kecepatan pendingin dan penurunan tekanan teras sebagai fungsi laju alir teras mulai 500 kg/s sampai 1300 kg/s dengan kode Caudvap dan Coolod-N, ditunjukkan pada Gambar 7.

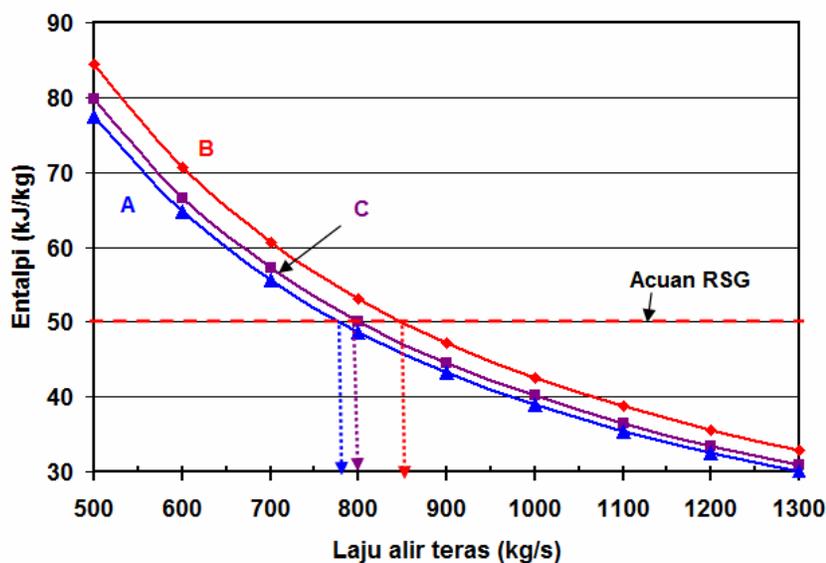


Gambar 7. Grafik kecepatan pendingin di dalam elemen bakar dan penurunan tekanan teras sebagai fungsi besarnya laju alir teras total, untuk teras model C<sup>[12]</sup>.

Dari grafik kecepatan pendingin di dalam elemen bakar sebagai fungsi besarnya laju alir teras total dari 500 kg/s sampai 1300 kg/s, menunjukkan bahwa kecepatan pendingin di dalam elemen bakar untuk kode Caudvap diperoleh 3,71 m/s sampai 9,58 m/s, sedangkan dengan kode Coolod-N diperoleh 3,74 m/s sampai 9,58 m/s. Perbedaan hasil perhitungan dengan kode Coolod-N dan Caudvap berkisar antara 0,88% sampai 1,19%. Sedangkan perbedaan penurunan tekanan dengan kode Coolod-N dan Caudvap berkisar antara 6,25% sampai 8,01%.

Sebagai bahan pembandingan, RSG-GAS yang mempunyai daya 30 MW dibangkitkan oleh 40 elemen bakar dan 8 elemen kendali (total 960 pelat), berarti daya pembangkitan per pelatnya adalah 31,25 kW. Jika laju alir pendingin minimum per kanal RSG-GAS adalah 0,625 kg/s, maka diperoleh enthalpi rerata pendingin sebesar 50,0 kJ/kg. Jika dianggap teras model A, B dan C memiliki daya yang sama 30 MW, maka grafik rasio daya dan kecepatan pendingin sebagai fungsi besarnya laju alir pendingin teras, digambarkan pada Gambar 8.

Gambar 8 menunjukkan bahwa pada teras model A diperoleh entalpinya lebih rendah dibanding model B dan C pada setiap nilai laju alir teras. Hal ini berarti untuk tingkat daya reaktor yang sama, maka teras model A membutuhkan laju alir teras yang lebih kecil dibanding model B dan C. Jika entalpi RSG-GAS dipakai sebagai acuan pembandingan, maka untuk entalpi yang sama, model A membutuhkan laju alir teras sebesar 780 kg/s, dengan penurunan tekanan teras sebesar 1,25 bar dan kecepatan pendingin di dalam elemen bakar sebesar 5,68 m/s, model B membutuhkan laju alir sebesar 852 kg/s dengan penurunan tekanan teras sebesar 1,74 bar dan kecepatan pendingin di dalam elemen bakar sebesar 6,73 m/s dan model C membutuhkan laju alir sebesar 801 kg/s dengan penurunan tekanan teras sebesar 1,54 bar dan kecepatan pendingin di dalam elemen bakar sebesar 6,33 m/s.



Gambar 8. Grafik entalpi sebagai fungsi besar laju alir teras.

Sebagai rangkuman dari keseluruhan analisis di atas, jika dibuat peringkat dengan nilai terbaik 3, cukup 2 dan kurang 1, maka akan diperoleh tabel nilai peringkat seperti ditunjukkan pada Tabel 4.

**Tabel 4. Peringkat hasil analisis.**

Jenis penilaian	Model A	Model B	Model C
Prosentase laju alir ke elemen bakar	2	1	3
Penurunan tekanan teras	3	1	2
Kecepatan pendingin di elemen bakar	3	1	2
Entalpi	3	1	2
<b>Jumlah</b>	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>10</b>

Dari penilaian di atas menunjukkan bahwa jika dilihat dari segi aspek pendinginan di elemen bakar, maka urutan peringkat dari A dan C hampir sama, jauh lebih baik dibanding model B. Namun demikian, hasil ini masih harus dioptimalisasikan dengan analisis neutronik dan analisis termohidrolika yang lain.

## **KESIMPULAN**

Dari perhitungan distribusi laju alir desain teras reaktor model A, B dan C dengan kode Caudvap pada penurunan tekanan sebesar 0,5 bar diperoleh sebesar 482,56 kg/s, 415,11 kg/s dan 472,41 kg/s, dengan kecepatan pendingin di elemen bakar masing-masing sebesar 3,53 m/s, 3,51 m/s dan 3,52 m/s. Perhitungan kecepatan pendingin untuk model C untuk variasi laju alir total 500 – 1300 kg/s diperoleh sebesar 3,70 – 9,58 m/s (kode Caudvap) dan 3,74 – 9,70 m/s (kode Coolod-N) atau perbedaan berkisar 0,88 – 1,19%. Dengan acuan entalpi RSG-GAS sebesar 50,0 kJ/kg, maka entalpi tersebut baru akan diperoleh jika laju alir teras model A, B dan C masing-masing sebesar 780 kg/s, 852 kg/s dan 801 kg/s, dengan penurunan tekanan sepanjang teras masing-masing 1,25 bar, 1,74 bar dan 1,54 bar, serta kecepatan pendingin sebesar 5,68 m/s, 6,73 m/s dan 6,33 m/s. Dilihat dari segi aspek pendinginan di elemen bakar, maka model A dan C memiliki nilai jauh lebih baik dibanding model B.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Ucapan terimakasih ditujukan kepada KNRT dan semua pihak yang membantu penelitian dapat dikerjakan. Penelitian ini adalah bagian dari penelitian yang dibiayai oleh Program insentif Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa (PI-PKPP) Ristek dengan judul “Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat Tinggi” Tahun 2012.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1]. Dokumen Teknis PTRKN No. BATAN-RKN-06-2010, "User Criteria Document (UCD) Reaktor Riset Inovatif" PTRKN – BATAN, Serpong, 2010.
- [2]. Dokumen Teknis PTRKN No. LAP.010.RKN.2011, "Desain Konseptual Teras Reaktor Riset Inovatif" PTRKN – BATAN, Serpong, 2011.

- [3]. TUKIRAN S. DAN TAGOR M.S. "Perhitungan Neutronik Desain Teras Setimbang untuk mendukung terbentuknya teras Reaktor Riset Inovatif", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Litdas Iptek Nuklir, PTAPB-BATAN, Yogyakarta, 19 Juli 2011, p. 25 – 34.
- [4]. ANONIM, "Safety Analysis Report of RSG-GAS" Rev. 7, BATAN, Jakarta, 1989.
- [5]. MISHIMA, K., "Thermal-Hydraulics and Safety Analysis of Research Reactor" Academic Lecture on FNCA Workshop on Research Reactor Utilization and Open Symposium, Hachinohe, Japan, September 7-10, 2009.
- [6]. ANONIM, "CAUDVAP v2.60, A Computer Program for the Calculus of Flow Distribution and Pressure Drop in Reactor Core" Division Ingenieria Nuclear, INVAP, Argentina, Printed 1996.
- [7]. KAMINAGA, M., "Coolod-N: A computer code, for the analysis of steady-state thermal-hydraulics in plate-type research reactors", JAERI-M 90-021, JAERI, February 1990.
- [8]. MUH. DARWIS ISNAINI, DKK., "Verifikasi Harga Laju alir RSG-GAS dengan program Caudvap", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Litdas Iptek Nuklir, P2TM-BATAN, Yogyakarta, 1998, p.
- [9]. MUH. DARWIS ISNAINI, "Analisis pada Laju Alir Stringer RSG-GAS", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, P2TRR-BATAN, Volume 5, No. 1, Pebruari 2003, p.23-38
- [10]. MUH. DARWIS ISNAINI, "Verifikasi Program Coolod-N Versi PC Dengan Versi AXP", Prosiding Lokakarya Komputasi Sains dan Teknologi Nuklir, PPIN-BATAN, Serpong, 6-7 Agustus 2008, p. 317-330.
- [11]. MUH. DARWIS ISNAINI, "Dokumen Hasil Penelitian Personal Bulan ke-3 PI-PKPP 2012", PTRKN-BATAN, Mei 2012.
- [12]. MUH. DARWIS ISNAINI, "Dokumen Hasil Penelitian Personal Bulan ke-4 PI-PKPP 2012", PTRKN-BATAN, Mei 2012.

### **DISKUSI/TANYA JAWAB:**

#### **1. PERTANYAAN: (Amir Hamzah, PTRKN-BATAN)**

- Pada Tabel 4 mengenai peringkat hasil analisis dinyatakan bahwa model A adalah yang terbaik. Akan tetapi ada salah satu parameter yaitu laju alir pada elemen bakar bernilai 1. Apakah itu masih memenuhi kriteria keselamatan?

#### ***JAWABAN: (M. Darwis Isnaini, PTRKN-BATAN)***

- Dengan data masukan yang sama yaitu daya 30 MW dan laju alir 800 kg/s, maka laju alir per kanal (pelat) model A sebesar 0,99 kg/s, model B 1,14 kg/s dan model C 1,01 kg/s (laju alir model A paling kecil), tetapi jika dilihat daya per pelat bahan bakar model A 48,08 kW, model B 60,81 kW dan model C 50,51 kW (terlihat daya per pelat model A juga paling kecil). Jika dibandingkan entalpinya ( $entalpi = \text{daya} / \text{laju alir}$ ) maka model A sebesar 48,64 kJ/kg, model B 53,06 kJ/kg dan model C 50,07 kJ/kg. Dan semakin kecil entalpi, maka nilai keselamatannya paling tinggi. Pada kondisi ini ketiganya masih memenuhi kriteria keselamatan.