

DESAIN FAKTOR KANAL PANAS UNTUK MODEL PERHITUNGAN TERMOHIDROLIKA REAKTOR RISET INOVATIF

Endiah Puji Hastuti, M. Darwis Isnaini, M. 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: endiah@batan.go.id

ABSTRAK

DESAIN FAKTOR KANAL PANAS UNTUK MODEL PERHITUNGAN TERMOHIDROLIKA REAKTOR RISET INOVATIF. Pada tahun 2020 reaktor riset yang dioperasikan BATAN akan habis izin operasinya, sedangkan reaktor RSG-GAS pada saat itu akan berusia cukup tua (37 tahun), bertolak dari hal itu maka dipandang perlu untuk memiliki sebuah reaktor riset baru pendamping reaktor RSG-GAS. Litbang desain termohidrolika reaktor riset inovatif merupakan salah satu pendukung desain reaktor tersebut. Untuk mencapai desain reaktor yang selamat perlu batasan marjin keselamatan yang cukup, dengan memperhitungkan faktor ketidak-pastian dari aspek neutronik dan aspek enjinereng. Desain faktor ketidak pastian untuk kandidat konfigurasi reaktor riset inovatif tipe MTR dengan bahan bakar tipe pelat menggunakan UMo dengan tingkat muat tinggi 7-9 g U/cm³. Tipe bahan bakar ini memiliki geometri yang sama dengan produksi PT BATEK yang memproduksi bahan bakar RSG-GAS. Faktor ketidakpastian nuklir diperoleh dari hasil perhitungan neutronik, sementara faktor ketidak pastian enjinereng dan korelasi perpindahan panas yang digunakan menggunakan data referensi. Desain faktor ketidakpastian reaktor riset inovatif ditentukan dengan menggunakan metode perkalian dan statistik.

Kata kunci: faktor kanal panas, analisis keselamatan, reaktor riset inovatif

ABSTRACT

HOT CHANNEL FACTOR DESIGN FOR THERMAL HYDRAULIC CALCULATION MODEL OF INOVATIVE RESEARCH REACTOR. In 2020 the research reactor license that operated by BATAN, will be expire, while the RSG-GAS will be too old (37 years old), accordance to this problem it is necessary to have a new research reactor as a RSG-GAS reactor companion. R & D for thermal hydraulic design of innovative research reactor is one of the supporters of the reactor design. According to nuclear reactor design, uncertainty factors should be taken into account. This uncertainty factor will be taking the risk of power peaking factor and give influence to safety margin magnitude, from the aspect neutronic and engineering aspects. Uncertainty factor design for the candidate configuration innovative type research reactor with MTR type, fuel plates using high loading of UMo of 7-9 g U/cm³. These fuel types have the same geometry with the production of PT BATEK that produces of the RSG-GAS fuel element. Nuclear uncertainty factors obtained from the neutronic calculation, while the engineering uncertainty factors and heat transfer correlations used the reference data. Uncertainty factor design of research reactor innovative determined using multiplication and statistics methodology.

Keywords: Hot channel factor, safety analysis, reaktor riset inovatif

PENDAHULUAN

Pada tahun 2020 reaktor riset yang dimiliki Indonesia pada saat ini akan habis izin operasinya, sedangkan reaktor RSG-GAS pada saat itu akan berusia 37 tahun, bertolak dari hal itu maka dipandang perlu untuk memiliki sebuah reaktor riset baru pendamping reaktor RSG-GAS. Reaktor riset baru yang diinginkan adalah reaktor yang didesain sesuai rencana kebutuhan dalam penyediaan fasilitas untuk produksi radioisotop maupun untuk kebutuhan litbang. Kegiatan litbang yang akan dilaksanakan dalam rangka mencapai target tersebut adalah litbang Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif. Litbang ini perlu dikerjakan secara paralel dengan perhitungan desain konfigurasi teras secara interaktif, dan perhitungan perisai radiasi sehingga diperoleh hasil desain reaktor riset inovatif yang optimal secara utuh. Tujuan penelitian ini sesuai dengan tahap kegiatan yang harus dilakukan untuk mencapai sasaran yang ingin dicapai yaitu penyusunan filosofi margin keselamatan dan faktor kanal panas pada desain termohidrolika reaktor riset inovatif^[1].

Pemilihan faktor kanal panas enjineri untuk analisis termohidrolika memiliki dampak yang signifikan pada margin keselamatan reaktor. Reaktor dengan margin keselamatan besar yang dihitung berdasarkan pemilihan faktor ketidakpastian tinggi menyebabkan perhitungan faktor puncak daya menjadi sangat konservatif. Hal ini akan menyebabkan keterbatasan pada utilitas reaktor. Untuk itu maka metode pemilihan faktor puncak daya dalam desain reaktor riset tipe MTR perlu diperhatikan. Asumsi yang digunakan di sini adalah desain bahan bakar telah ada, dan operator reaktor sekarang harus mengevaluasi bahan bakar berdasarkan toleransi dan angka ketidakpastian yang diberikan oleh fabrikasi.

Distribusi fluks neutron arah aksial dan radial akan menghasilkan apa yang dinamakan *hot channel* dan *hot spot* di dalam teras reaktor. *Hot channel* didefinisikan sebagai kanal di dalam teras yang memiliki fluks panas maksimum atau pembangkitan panas linear maksimum. Di dalam desain reaktor, *hot channel* dan *hot spot* biasanya digunakan sebagai titik acuan kondisi termohidrolika di seluruh teras reaktor. Jika kanal yang direpresentasikan sebagai *hot spot* dapat dipertahankan dalam kondisi aman selama transien reaktor, maka keselamatan di kanal-kanal lainnya akan terjamin.

TEORI

Berdasarkan pada fenomena fisika, ElWakil (1978)^[2] mendeskripsikan *hot spot* tersusun dari dua komponen yaitu faktor *hot spot* nuklir, F_N , dan faktor *hot spot* enjineri, F_E . Kedua faktor tersebut dapat dijelaskan dengan lebih rinci seperti di bawah ini:

1. Faktor *hot spot* nuklir terjadi karena adanya variasi fluks neutron dari kondisi reratanya. Variasi fluks neutron dipicu oleh faktor geometris teras reaktor, peningkatan distribusi lokal karena adanya gangguan batang penyerap (*control rod absorber*), perubahan densitas moderator sebagai akibat terjadinya void di dalam teras reaktor dsb. Parameter penting yang menentukan keselamatan reaktor selama terjadinya transien reaktor adalah koefisien reaktivitas, ρ_T , neutron life time, l , dan fraksi neutron lambat efektif, β . Koefisien reaktivitas teras reaktor dipengaruhi oleh temperatur teras melalui berbagai mekanisme. Ketika daya reaktor meningkat sebagai konsekuensi pembangkitan daya, temperatur bahan bakar dan pendingin/moderator akan

meningkat pula. Kenaikan temperatur bahan bakar akan memicu terjadinya perubahan koefisien reaktivitas karena terjadi ekspansi termal dan efek *Doppler*. Namun, karena desain reaktor telah bergeser ke arah bahan bakar pengayaan rendah dan spektrum neutron lebih lemah, maka koefisien *Doppler* akan memberi sumbangan yang besar. Koefisien *Doppler* memberikan koefisien reaktivitas negatif karena terjadi penyerapan neutron resonansi kuat, karena terjadi perluasan puncak *Doppler* seiring dengan peningkatan temperatur. Kontribusi utama pada koefisien temperatur moderator adalah perubahan dalam spektrum energi panas dan densitas moderator. Spektrum energi neutron berbanding linier dengan temperatur mutlak moderator. Kenaikan temperatur pendingin akan menyebabkan perubahan densitas moderator, sekaligus menyebabkan terjadinya pendidihan. Fenomena fisika ini akan menyebabkan pengerasan spektrum neutron termal yang akan mengurangi faktor multiplikasi neutron atau reaktivitas. Dengan kata lain, temperatur reaktivitas reaktor koefisien bernilai negatif karena peningkatan temperatur akan mengurangi reaktivitas.

2. *Hot spot* enjineri dapat berasal dari faktor mekanis dan distribusi laju alir pendingin di dalam teras reaktor. Faktor mekanis terjadi sebagai hasil karena adanya deviasi karena toleransi fabrikasi. Perubahan dimensi bahan bakar dapat disebabkan karena proses utilisasi seperti terjadinya *swelling* atau *bowing* yang terjadi pada pelat bahan bakar. Distribusi laju alir pendingin yang tidak homogen ke dalam teras reaktor karena geometri bahan bakar atau *spot/node* pada permukaan pelat bahan bakar. Hal ini terjadi bersama dengan toleransi *orifice*, hal ini akan menyebabkan distribusi aliran yang berbeda dari nilai desain.

Faktor kanal panas enjineri dapat diuraikan ke dalam tiga komponen terpisah yaitu:

1. Ketidakpastian karena pengaruh fluks panas, F_q
2. Ketidakpastian yang disebabkan oleh kenaikan temperatur atau perubahan entalpi di dalam kanal, F_b
3. Ketidakpastian di dalam penggunaan koefisien perpindahan panas, F_h .

Faktor faktor tersebut dimasukkan ke dalam analisis sebagai:

$$q''_{hc} = F_q * q''_{nc} \dots\dots\dots(1)$$

$$\Delta T_b = F_b * Q / (C_p * MFR) \dots\dots\dots(2)$$

$$\Delta T_s = F_h * q'' / h \dots\dots\dots(3)$$

dengan:

- h_c = nilai kanal panas
- n_c = nilai fluks panas pada kanal nominal (q''),
- MFR = laju alir massa
- F_b = rasio $\Delta T_{hc} / \Delta T_{nc}$ untuk temperatur pendingin bulk (b),
- F_h = rasio $\Delta T_{hc} / \Delta T_{nc}$ untuk temperatur permukaan kelongsong (s).

Komponen-komponen tersebut dapat diuraikan menjadi sub faktor dan dikombinasikan dengan cara perkalian.

$$F_b = fb1 * fb2 * fb3 * \dots\dots\dots(4)$$

atau diselesaikan dengan metode statistik

$$F_b = 1 + (1)2 \sum -f_{bi} \dots\dots\dots (5)$$

Pada umumnya sub faktor dapat ditentukan dari toleransi dari spesifikasi bahan bakar, pompa dan komponen lainnya. Sub faktor lainnya dapat ditentukan dari batasan dalam kemampuan untuk mengukur berbagai parameter secara akurat, seperti, laju alir dan temperatur. Meskipun demikian tetap memerlukan pertimbangan enjineriing dalam kajian kualitas data yang tersedia. Beberapa analisis termohidrolika dapat digunakan dalam penentuan rentang berbagai variasi. Spesifikasi pelat bahan bakar dan elemen bahan bakar yang digunakan dalam fabrikasi bahan bakar biasanya memuat toleransi tingkat muat bahan bakar, variasi densitas bahan bakar, tebal pelat, dan jarak kanal/gap.

Table 1. Faktor ketidak pastian dan perlakuannya^[3]

Parameter	Perlakuan
<i>Fabrikasi bahan bakar</i>	
Lebar bahan bakar	Statistik
Tebal bahan bakar	Statistik
Panjang bahan bakar	Statistik
Lebar kanal/gap	Statistik
Tebal kanal	Statistik
<i>Plate UMo loading</i>	Statistik
<i>Plate Uranium Homogeneity</i>	Statistik
<i>Pengukuran Operasional</i>	
Temperatur inlet teras	Sistematik
Laju alir teras	Sistematik
Daya reaktor	sistematik
<i>Korelasi</i>	
Perpindahan panas	Sistematik
ONB	Sistematik
Distribusi daya	Sistematik
CHF	sistematik
<i>Other modeling</i>	
Laju alir volumetric teras	Statistik

Kombinasi kedua faktor di atas akan menghasilkan faktor *hot spot* total (*overall hot-spot factor*), *F*. Sub faktor *hot spot* dapat merupakan kombinasi dari nilai faktor *hot spot* total yang dihasilkan dari salah satu dari dua skema berikut, yaitu: (a) metode pengalihan, dan (b) metode statistik. Penggunaan metode pengalihan untuk menentukan nilai *F* akan menyebabkan desain teras reaktor menjadi terlampaui konservatif, sehingga dari sudut pandang enjineriing akan menyebabkan

over estimasi. Sehingga penentuan faktor *hot spot* total, F, menggunakan metode statistik lebih dapat diterima. Contoh penggunaan metode pengalihan yang dilakukan secara sistematis dan metode statistik yang diterapkan dalam perhitungan faktor ketidak pastian ditunjukkan pada Tabel 1.

PENENTUAN DESAIN FAKTOR KANAL PANAS RRI

Desain termohidrolika teras reaktor RRI menggunakan faktor *hot spot* nuklir dan *hot spot* enjineri, F_N and F_E ^[4]. Faktor *hot spot* nuklir merupakan perkalian faktor radial, F_R , dan faktor aksial, F_A . Faktor enjineri secara praktis dibagi menjadi faktor *hot spot* enjineri, F_q , dan faktor kanal panas enjineri, F_{DT} . Faktor *hot spot* enjineri didefinisikan sebagai faktor pengali fluks panas, faktor kanal panas enjineri sebagai faktor pengali kenaikan temperatur pendingin di dalam kanal panas yang dihasilkan oleh fluks panas. Masing-masing faktor, F_q dan F_{DT} , terdiri dari beberapa sub faktor.

F_{q1}	= ketidak rerataan bahan fisil di dalam pelat bahan bakar	= 1,20
F_{q2}	= <i>eccentricity</i> bahan bakar (<i>meat</i>) di dalam pelat bahan bakar	= 1,003
F_{DT1}	= variasi kandungan bahan fisil per pelat bahan bakar	= 1,023
F_{DT2}	= <i>eccentricity</i> <i>meat</i> di dalam pelat bahan bakar	= 1,003
F_{DT3}	= variasi tebal gap dalam kanal pendingin	= 1,076

Sub-faktor terkait laju alir pendingin (BATAN, 1999)^[5]:

F_{DT4}	= Distribusi tak rata kecepatan pendingin pada teras inlet di setiap elemen	= 1,03
F_{DT5}	= Distribusi tak rata kecepatan pendingin pada teras inlet di setiap kanal	= 1,05

Sub-sub faktor tersebut secara statistik akan memberikan kontribusi terhadap faktor enjineri melalui persamaan (6) dan (7).

$$F_q = 1.0 + \sqrt{\sum_{i=1}^2 (F_{q_i} - 1)^2} = 1.2 \dots\dots\dots(6)$$

$$F_{DT} = \left[1 + \sqrt{\sum_{i=1}^3 (F_{DT_i} - 1)^2} \right] \times F_{DT4} \times F_{DT5} = 1.215 \dots\dots\dots(7)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan *User Criteria Document* yang telah disusun untuk RRI, bahan bakar yang akan digunakan adalah tipe pelat^[6]. Tipe bahan bakar ini dipilih sebagai salah satu kemandirian karena PT BATEK telah mampu memasak. Sedangkan *meat* jenis uranium molybdenum yang saat ini sedang dikembangkan di dunia, termasuk Indonesia karena memiliki tingkat muat yang tinggi, 7-9 gU/cm³. Jenis bahan bakar ini lebih mudah untuk didaur ulang dibandingkan jenis silisida yang selama ini digunakan. Fabrikasi pelat bahan bakar direncanakan akan dilakukan oleh PT BATEK

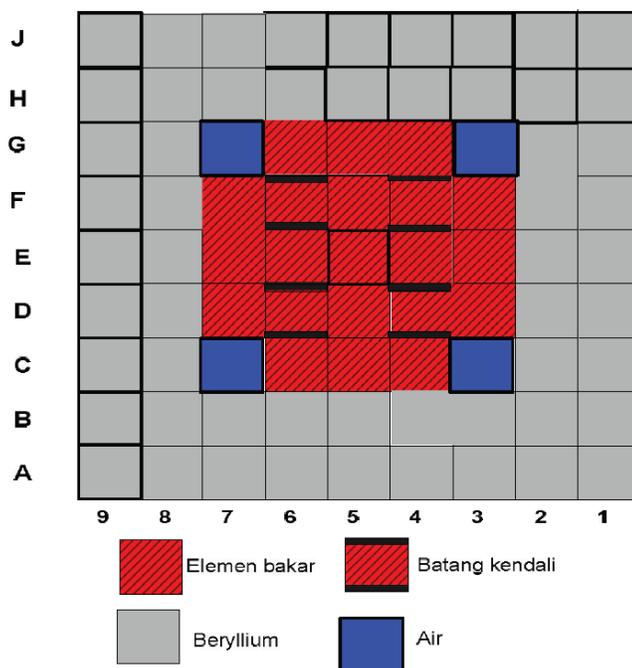
dengan asumsi geometri pelat sama dengan pelat bahan bakar yang dipasok untuk RSG-GAS pada saat ini, diasumsikan faktor ketidak pastian enjineriing akan sama.

Aplikasi faktor kanal panas diterapkan pada model/desain konfigurasi teras reaktor riset inovatif berupa teras kompak, yang disusun dengan berbagai kerapatan bahan bakar UMo dengan tingkat muat tinggi. Salah satu kandidat teras reaktor riset inovatif adalah kisi bahan bakar yang diusulkan di dalam teras reaktor berukuran 5 x 5. Sebagai kandidat teras reaktor terpilih, di bawah ini ditampilkan dua jenis konfigurasi teras RRI. Gambar 1 adalah konfigurasi teras reaktor tanpa trap neutron, sedangkan Gambar 2 adalah konfigurasi teras reaktor dengan trap neutron di tengah teras. Kedua kandidat tersebut memiliki konfigurasi elemen teras yang hampir sama, kecuali kisi yang berada di tengah teras reaktor, yang akan diperhitungkan pada faktor ketidak pastian fluks panas karena pengaruh posisi. Faktor ketidakpastian nuklir ditentukan berdasarkan konfigurasi tersebut terkait posisi elemen teras dan kedekatannya dengan elemen teras lainnya. Faktor ketidakpastian faktor puncak daya akan sangat bergantung dari hasil perhitungan neutronik, seberapa perbedaan antara nilai faktor puncak daya dibandingkan dengan nilai reratanya, dalam hal ini hanya ditentukan parameter penyusun faktor ketidakpastiannya. Posisi batang kendali pada beberapa ketinggian, posisi bank, posisi batang kendali pengatur akan menghasilkan nilai faktor puncak daya yang berbeda terhadap nilai reratanya. Hasil perhitungan tersebut akan diperhitungkan dalam faktor ketidakpastian nuklir. Nilai-nilai ini diperhitungkan tidak jauh berbeda dengan RSG-GAS. Faktor ketidakpastian RSG-GAS ditunjukkan pada Tabel 2.

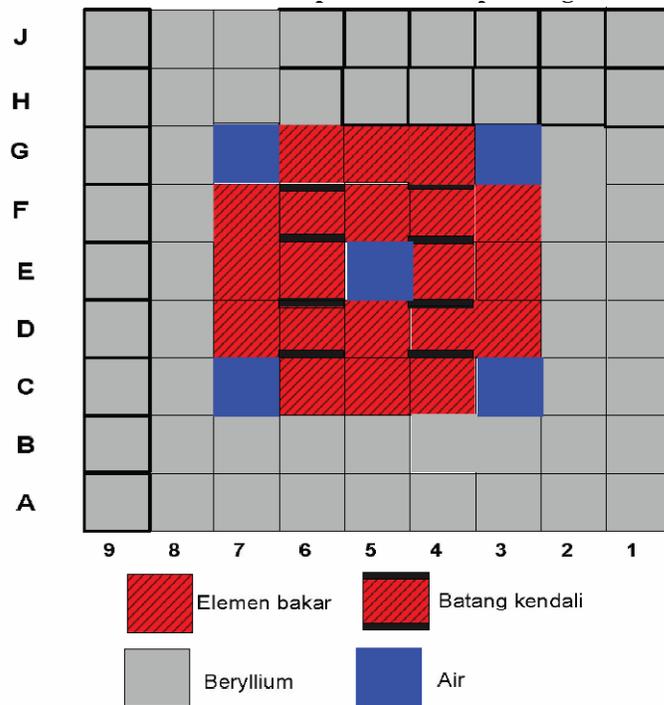
Tabel 2. Faktor ketidakpastian RSG-GAS^[5]

Simbol	Parameter	Faktor ketidakpastian
<i>Faktor enjineriing:</i>		
Fq''_1	Ketidakteragaman bahan fisil di dalam pelat bahan bakar	1,20
Fq''_2	<i>eccentricity</i> bahan bakar di dalam pelat bahan bakar	1,003
<i>Korelasi for Fq''</i>	$Fq'' = 1.0 + \sqrt{\sum_{i=1}^2 (Fq''_i - 1)^2}$	1,20
$F_{\Delta T1}$	Variasi kandungan bahan fisil per pelat bahan bakar	1,023
$F_{\Delta T2}$	<i>eccentricity</i> meat di dalam pelat bahan bakar	1,003
$F_{\Delta T3}$	Variasi tebal gap kanal pendingin terhadap nilai reratanya	1,076
<i>Sub-factors terkait laju alir isothermal (BATAN, 1999):</i>		
$F_{\Delta T4, iso}$	Ketidakteragaman distribusi laju alir massa pada sisi inlet teras yang berdampak pada setiap elemen.	1,03
$F_{\Delta T5, iso}$	Ketidakteragaman distribusi kecepatan pada sisi inlet bahan bakar terhadap setiap kanal pendingin	1,05
<i>Korelasi untuk $F_{\Delta T}$</i>	$F_{\Delta T} = 1.0 +$	1,215

	$\sqrt{\sum_{i=1}^3 (F_{\Delta Ti} - 1)^2 x F_{\Delta T4} x F_{\Delta T5}}$	
<i>Faktor nuklir untuk kondisi tunak pada operasi normal:</i>		
<i>Faktor kanal bahan bakar untuk operasi normal dengan posisi batang kendali yang diizinkan</i>		
	8 posisi batang kendali sebagai bank, dengan tinggi insersi bervariasi antara 0 cm dan 40 cm.	1,20 - 1,32
	Batang kendali hampir di atas dan posisi bank bervariasi antara 20 cm dan 42 cm	1,18 - 1,61
	Posisi batang kendali antara 0 cm dan 60 cm	1,47 - 1,94
<i>Faktor posisi di sekeliling bahan bakar</i>		
	Kanal berhadapan dengan beryllium reflector	1,25
	Kanal di samping posisi iradiasi	1,35
	Kanal bahan bakar di antara elemen berilium untuk iradiasi di dalam reflector dan posisi iradiasi teras	1,33
<i>Fleksibilitas ketidakpastian perhitungan</i>		
	Faktor kanal panas radial	1,20
	Faktor kanal panas aksial	1,10
<i>Desain Faktor kanal</i>		
F_{Rad}	Faktor distribusi daya radial (diperoleh dari hasil perkalian 1.94 x 1.35 x 1.20)	3,14
F_{Aks}	Faktor distribusi daya aksial (diperoleh dari hasil perkalian 1.45 x 1.10 untuk aksial maksimum di dalam kanal panas)	1,6



Gambar 1. Teras reaktor tanpa neutron trap di tengah reaktor^[7]



Gambar 2. Teras reaktor dengan neutron trap di tengah reaktor^[7]

Faktor ketidakpastian enjinereng dapat diuraikan menjadi sub-sub faktor yang antara lain berasal dari fabrikasi bahan bakar, distribusi aliran pendingin, pengukuran parameter termohidrolika dan korelasi yang digunakan. Pada penentuan faktor kanal panas enjinereng, komponen perpindahan panas, F_h , memiliki nilai terbesar dan memiliki efek terbesar pada temperatur permukaan kelongsong. Faktor ini hanya mengubah temperatur kelongsong. Ketidakpastian dalam perhitungan koefisien perpindahan panas merupakan kontributor terbesar, karena harus diperhitungkan dengan metode perkalian. Sehingga apabila nilai ketidakpastiannya dapat dikurangi maka margin keselamatan akan bertambah.

Komponen fluks panas merupakan kontributor terbesar berikutnya, dan sub faktor yang dominan dalam komponen ini adalah heterogenitas bahan bakar, penentuan faktor heterogenitas diperoleh dari hasil fabrikasi, apabila semakin homogen maka faktor ini akan membantu mengurangi faktor ketidakpastian. Dalam kasus konveksi alam, laju alir meningkat apabila fluks panas meningkat di dalam kanal panas. Peningkatan kecepatan pendinginan di dalam kanal pendingin akan mengurangi temperatur kelongsong. Contoh pendinginan konveksi alam mungkin agak berbeda seperti yang terjadi di dalam reaktor yang didinginkan dengan metoda konveksi paksa. Akibat dari perubahan lebar gap kanal pendingin juga akan menghasilkan kecepatan pendingin yang lebih besar di dalam kasus ini daripada dengan moda pendinginan konveksi paksa, demikian pula adanya pompa pendingin dan pemipaan perlu diperhitungkan nilai faktor ketidakpastiannya.

Faktor kanal panas diterapkan pada perhitungan fluks panas, perubahan temperatur atau entalpi di dalam kanal, dan perpindahan panas dari kelongsong ke pendingin melalui *interface* pendingin. Faktor-faktor tersebut dapat diurai ke dalam sub-sub faktor berdasarkan toleransi

ketidakpastian pada proses manufaktur, pengukuran, spesifikasi dan metode-metode perhitungan yang digunakan. Sub-sub faktor tersebut dapat dikombinasikan dengan mengalikan semua faktor, dengan cara statistik, atau dengan kombinasi antara kedua metode tersebut. Metode pengalihan menghasilkan margin yang sangat konservatif, sehingga perlu dilakukan dengan menggunakan metode statistik atau kombinasi antara keduanya, hanya faktor ketidakpastian nilai koefisien perpindahan panas yang menggunakan metode pengalihan.

Mengingat bahwa desain teras RRI belum final, sementara perhitungan termohidrolika harus dilakukan untuk memperkirakan model konfigurasi yang memenuhi aspek keselamatan kecukupan pendingin, maka untuk perhitungan faktor ketidak pastian daya reaktor, kerapatan daya dan laju pendingin ditentukan dengan asumsi berdasarkan acuan yang ada, asumsi yang dapat diambil adalah:

Faktor ketidakpastian pengukuran daya reaktor $\pm 5\%$

Faktor ketidakpastian densitas daya $\pm 10\%$

Faktor ketidakpastian pengukuran laju alir $\pm 10\%$

Faktor ketidakpastian perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi bebas $\pm 20\%$.

Faktor ketidakpastian nuklir dan enjinereng dan sub faktor penyusunnya ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Parameter faktor ketidakpastian kanal panas dalam desain reaktor riset inovatif

No.	Parameter
A.1.	Fuel element channel factor for normal operation
	<ul style="list-style-type: none"> • 4 control rod <i>bank</i>
	<ul style="list-style-type: none"> • 3 bank, batang kendali pengatur ditarik
	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Bank</i>, batang kendali pengatur diinsersi
2.	Faktor kanal bahan bakar pada operasi tak normal (tidak diizinkan)
	<ul style="list-style-type: none"> • EB dekat reflektor, Bank masuk penuh, RR ditarik
	<ul style="list-style-type: none"> • Satu dari Bank masuk disamping RR yang ditarik hampir penuh di atas Bank.
	<ul style="list-style-type: none"> • Satu dari Bank ditarik di samping RR yang hampir ditarik penuh
3.	Faktor Lingkungan
	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal dekat reflektor
	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal dekat posisi iradiasi
	<ul style="list-style-type: none"> • Kanal dalam EB antara reflektor untuk iradiasi dan posisi iradiasi di dalam teras reaktor
B.	Analisis pengambilan panas dibedakan untuk 3 kasus:
	<ul style="list-style-type: none"> a. aliran pendingin normal b. konveksi bebas tanpa pendingin c. Pengurangan aliran karena Kehilangan Aliran Pendingin.
1.	Faktor Kanal Disain LOFA (Penurunan Aliran Pendingin)
	F Rad = Hasil perhitungan x faktor posisi x faktor ketidakpastian perhitungan
	F Aks = Hasil perhitungan x faktor ketidakpastian perhitungan

2.	Kondisi tunak (<i>Steady-State</i>)
	BK ditarik penuh dan Sisa BK Bank dimasukkan <ul style="list-style-type: none"> • F Rad = Hasil perhitungan x faktor posisi x faktor ketidakpastian perhitungan • F Aks = Hasil perhitungan x faktor ketidakpastian perhitungan
3.	Disain Faktor Kanal Panas dan <i>Hot Spot</i> Fq'' = Faktor enjinereng <i>hotspot</i> = pengali untuk fluks panas. $F_{\Delta T}$ = Faktor Kanal Panas enjinereng = pengali kenaikan temperatur dalam kanal pendingin. Maka : Fluks panas rerata \bar{q}'' di dalam teras reaktor: $q''_{maks} = \bar{q}'' \cdot Fq'' \cdot F_R \cdot F_A$ Rata-rata kenaikan temperatur $\bar{\Delta T}$ sepanjang teras reaktor $\bar{\Delta T}_{maks} = \bar{\Delta T} \cdot F_{\Delta T} \cdot F_R$
4.	Sub-sub factor yang berkaitan dengan proses pembuatan: <ol style="list-style-type: none"> a. Variasi pada isi bahan fisik perpelat bb ($F_{\Delta T1}$) b. Ketidak seragaman distribusi bahan fisil di dalam pelat bb (Fq''_1). c. Eksentrisitas bb di dalam pelat bb ($F_{\Delta T2}$, Fq''_2) d. Variasi pada rata-rata ketebalan celah dari kanal pendingin ($F_{\Delta T3}$)
5.	Sub-sub faktor yang berkaitan dengan aliran pendingin: <ol style="list-style-type: none"> a. Ketidak seragaman distribusi kecepatan massa diinlet teras reactor yang mempengaruhi, masing-masing elemen ($F_{\Delta T4}$). b. Ketidak seragaman distribusi kecepatan massa di teras reactor, pada inlet elemen bakar yang mempengaruhi masing-masing kanal pendingin ($F_{\Delta T5}$).
6.	Spesifikasi teknis pelat bb: <ul style="list-style-type: none"> • $Fq''_1 = 1,20$ • $Fq''_2 = 1,003$ Karena tidak mungkin terjadi variasi- variasi ekstrim maka: Eng. Hot spot factor: $Fq'' = 1,0 + \sqrt{\sum_{i=1}^2 (Fq''_i - 1)^2} = 1,2.$ Dengan cara ini diperoleh: $F_{\Delta T1} = 1,023 \quad F_{\Delta T2} = 1,003 \quad F_{\Delta T3} = 1,076$ Untuk aliran isothermal $F_{\Delta T4, iso} = 1,03 \quad F_{\Delta T5, iso} = 1,0$
7.	Faktor ketidakpastian pengukuran daya reaktor $\pm 5\%$ Faktor ketidakpastian densitas daya $\pm 10\%$ Faktor ketidakpastian pengukuran laju alir $\pm 10\%$ Faktor ketidakpastian perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi bebas $\pm 20\%$.

Tidak semua faktor ketidakpastian dapat ditampilkan di sini mengingat bahwa faktor nuklir masih menunggu hasil konfigurasi teras RRI terpilih dan hasil perhitungan kelompok neutronik. Tabel 3 di atas telah memuat parameter berbagai faktor ketidakpastian nuklir maupun enjinering berdasarkan acuan dan data fabrikasi PT BATEK yang memproduksi bahan bakar RSG-GAS, sehingga dapat digunakan untuk memperkirakan kandidat konfigurasi teras RRI yang memenuhi kecukupan pendingin.

KESIMPULAN

Penentuan faktor-faktor kanal panas mempunyai pengaruh yang besar pada kinerja termohidrolika dan berdampak pada desain margin keselamatan reaktor. Oleh karena itu harus ditentukan secara hati-hati. Proses penentuan perlu memperhatikan toleransi fabrikasi dan reference untuk kasus yang sama. Dalam menentukan faktor kanal panas perlu dilakukan komponen pendukung untuk masing-masing sub faktor yang dihitung dengan metode statistik, kecuali untuk koefisien perpindahan panas digunakan metode perkalian agar lebih konservatif. Desain faktor ketidakpastian reaktor riset inovatif tidak berbeda jauh dengan desain reaktor riset berbahan bakar tipe pelat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada Kemenristek yang telah memberikan dana untuk penelitian melalui PI-PKPP 2012 dengan judul: "Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat Tinggi"

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Endiah Puji Hastuti, "Desain Termohidrolika Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat Tinggi", Proposal PI-PKPP, Kemenristek, 2012.
- [2]. El Wakil, "Nuclear Heat Transport", International Textbook Company, New York, 1978
- [3]. Endiah Puji Hastuti, *Uncertainty Factor And Best Estimate Approach For The RSG-GAS Thermal-Hydraulic Safety Analysis*, Proceeding ICMNS, ITB Bandung 2006
- [4]. H. HASTOWO, "Investigation on ATWS and Hypothetical Accidents for the Indonesian Multipurpose Research Reactor RSG-GAS", Phd Thesis, Gajah Mada University, Yogyakarta, 1996.
- [5]. BATAN, *Safety Analysis Report of the Indonesian Multipurpose Reactor GA-Siwabessy*, Rev.8, Maret 1999.
- [6]. BFTR-PTRKN, *User Criteria Document (UCD) Reaktor Riset Inovatif*, BATAN-RKN-06-2010.
- [7]. Surian Pinem, Dokumen Hasil PI PKPP Personel PTRKN 2012: "Desain Neutronik Teras Reaktor Riset Inovatif Berbahan Bakar Tingkat Muat Tinggi", Mei 2012

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Hermansyah, Mahasiswa UPI)

- Mengapa inovasi yang di buat tidak untuk penghasil daya?
- Penggunaan bahan U235 menghasilkan energi yang lebih kecil dari plutonium, mengapa tidak menggunakan plutonium saja?

JAWABAN: (Endiah P.H., PTRKN-BATAN)

- *PTRKN mempunyai tugas untuk membuat desain reaktor riset inovatif dan reaktor daya temperatur tinggi generasi IV & PWR, tugas tersebut dilaksanakan secara paralel dan terpisah. Sehingga dapat di sampaikan bahwa PTRKN juga membuat konsep desain untuk reaktor penghasil daya. Desain yang di sampaikan pada makalah ini adalah untuk reaktor riset.*
- $U^{235} + n \rightarrow Pu^{238} + n + \text{energi}$
Indonesia menandatangani proliferasi nuklir untuk maksud damai, plutonium di hasilkan terutama pada uranium dengan pengayaan tinggi, sementara IAEA membatasi penggunaan uranium untuk reaktor riset < 20% karena uranium dengan pengayaan > 97% berpotensi menjadi senjata nuklir. Sehingga Indonesia tidak akan menggunakan plutonium untuk penghasil energi.