

EVALUASI PERBANDINGAN KINERJA TERMOHIDROLIKA SUB-KANAL TERAS PWR 1000 TIPIKAL DENGAN AP-1000

Suroso, Sukmanto Diby, M. Darwis Isnaini

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310
e-mail: suroso@batan.go.id, sukdiby@batan.go.id, darwis@batan.go.id

ABSTRAK

EVALUASI PERBANDINGAN KINERJA TERMOHIDROLIKA SUB-KANAL TERAS PWR 1000 TIPIKAL DENGAN AP-1000. Investigasi terhadap karakteristik termohidrolika elemen bakar merupakan langkah penting berkaitan dengan aspek desain teras reaktor. Makalah ini menganalisis termohidrolika sub-kanal elemen bakar AP-1000 dan PWR 1000 menggunakan paket program RELAP5. Pendekatan model sub-kanal lazim dipakai dalam analisis termohidrolika elemen bakar. Paket program RELAP5 dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik termohidrolika teras dan sistem reaktor yang dalam analisis sub-kanal ini menggunakan nodalisasi yang terdiri dari model pipa, time dependent junction, time dependent volume dan struktur kalor. Untuk itu, data desain yang terkait dengan parameter termohidrolika dan data geometri sub-kanal dipakai sebagai acuan. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk validasi pemodelan sub-kanal elemen bakar AP 1000 dan PWR 1000 tipikal dan mendapatkan perbandingan karakteristik termohidrolikanya. Investigasi kondisi steady dilakukan untuk menganalisis data termohidrolika sub-kanal elemen bakar dan simulasi transient untuk mengetahui awal pembangkitan fraksi void dengan cara pengurangan laju aliran pendingin. Hasil analisis meliputi distribusi temperatur aksial kelongsong, temperatur pendingin, heat flux dan fraksi void. Pada kondisi steady, model ini diverifikasi dengan data parameter desain termohidrolika AP-1000 dan PWR 1000 yang mana secara umum telah menunjukkan kesesuaian. Hasil simulasi yang dilakukan terhadap transien laju alir menunjukkan bahwa fraksi void terbentuk lebih dahulu pada PWR 1000 dari pada AP-1000. Hal ini penting untuk dikaji karena berkaitan dengan kondisi keselamatan termohidrolika teras reaktor.

Kata kunci: pemodelan sub-kanal, elemen bakar AP-1000, PWR 1000, RELAP5

ABSTRACT

COMPARATIVE EVALUATION OF THERMAL-HYDRAULIC PERFORMANCE SUB-CHANNEL CORE TYPICAL PWR 1000 WITH AP-1000. Investigation of fuel element thermal-hydraulic characteristic is important step related to aspect of reactor core design. This paper analyzes of the AP-1000 and PWR 1000 fuel element sub-channel thermal-hydraulic using RELAP5 code. Discussed on the sub-channel model approach is usual utilized in the fuel element thermal-hydraulic analysis. The RELAP5 code could be utilized for analyze the core and reactor system thermal-hydraulic, used the nodalization that consists of pipe model, time dependent junction, time dependent volume and heat structure. Therefore design data relates thermal-hydraulic parameter and sub-channel geometry is applied as references. The purpose of this study is to modeling validation of sub-channel fuel AP 1000 and PWR 1000 typical and to get comparison of thermal-hydraulic characteristics. The analysis is carried out in case of steady-state and transient simulation for the coast down flow of coolant. The steady state investigation is used to analyze the sub-channel thermal-hydraulic of fuel and transient simulation to know the beginning of void fraction appear by decreasing of coolant flow rate. The analysis result including axial temperature distribution of cladding, cooling temperature, heat flux and void fractions. In steady condition, the model was verified with the parameter of AP-1000 and PWR 1000 thermal-hydraulic design in which shows a good agreement. Simulation results conducted on the transient flow rate indicates that the void fraction formed earlier on PWR 1000 than that of AP-1000. This is important for assessment in the future because it is relate to the thermal-hydraulic safety condition of the reactor core.

Keywords: sub-channel modeling, fuel element of AP-1000, PWR 1000, RELAP5.

1. PENDAHULUAN

Reaktor jenis *Pressurized Water Reactor (PWR)* adalah reaktor yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan jenis-jenis lainnya. Di dalam reaktor jenis PWR terdapat peralatan yang

berfungsi untuk membangkitkan panas yaitu teras reaktor. Teras reaktor terdiri dari susunan bahan bakar, moderator, dan batang kendali. Untuk mengetahui kinerja teras reaktor perlu dilakukan perhitungan-perhitungan. Pada makalah ini akan dilakukan analisis perbandingan kinerja sub-kanal teras reaktor PWR Tipikal daya 1000 MWe dengan AP-1000. Hasil analisis dilakukan untuk mendapatkan validasi pemodelan sub-kanal elemen bakar AP 1000 dan PWR 1000 tipikal dan mendapatkan perbandingan karakteristik termohidroliknya.

Dipilihnya AP-1000 dan PWR 1000 tipikal sebagai obyek penelitian, karena keduanya mempunyai daya yang hampir sama 3400 MWth dan 3410 MWth tetapi jumlah perangkat bahan bakar, tinggi teras aktif dan diameter *rod* berbeda. PWR 1000 tipikal merupakan tipikal PWR dengan daya listrik 1000 MW, sedangkan AP-1000 merupakan PWR-1000 maju yang dilengkapi sistem pasif dimana dokumen kontrol desainnya sedang dalam proses sertifikasi dari badan regulasi Inggris (Eropa)^[1]. Dengan adanya perbedaan jumlah perangkat bahan bakar, tinggi teras aktif dan diameter *rod* maka akan berbeda pula karakteristik termohidroliknya.

Perhitungan dilakukan dari segi termal dengan menggunakan program RELAP5 untuk kondisi *steady* dan *transient*. Paket program ini dapat digunakan untuk melakukan analisis termohidrolika teras reaktor PWR dan sangat penting sebagai perangkat lunak untuk mengetahui karakteristik termohidrolika teras dan sistem reaktor^[2].

Persamaan paket program membutuhkan pemodelan yang diverifikasi dengan data acuan sehingga keberlakuan model yang dibuat dapat dikonfirmasi. Oleh karena itu dalam evaluasi ini dititik-beratkan pada investigasi desain termohidrolika elemen bakar antara model dan data acuan. Masing-masing untuk parameter *heat flux*, temperatur pendingin dan temperatur kelongsong untuk kondisi *steady*. Sedangkan untuk kondisi *transient* divariasikan dengan pengurangan laju aliran pendingin. Pada variasi pengurangan laju aliran pendingin akan diketahui besarnya laju aliran pendingin dimana *void* mulai terbentuk. Hal ini penting dilakukan untuk mengetahui batas keselamatan operasi reaktor. Investigasi fraksi *void* pada sub-kanal PWR telah dimodelkan oleh Keiichi Hori dkk. yang menunjukkan bahwa akurasi model yang dibuat, diperoleh pada kisaran tekanan $9,8 \times 10^5$ Pa^[3].

Pada pemodelan sub-kanal elemen bakar ini, dilengkapi dengan model *volume*, *junction*, *heat structure* dan *time dependent junction* yang menggunakan nodalisasi untai terbuka dan dilengkapi dengan kondisi batas sebagai *time-dependent volume (tmdpvol)*^[4]. Sub-kanal (*sub-assembly*) merupakan model pendekatan yang dapat merepresentasikan kondisi termohidrolika desain teras reaktor^[5]. Pendekatan model sub-kanal, lazim dipakai sebagai pemahaman dasar dalam analisis termohidrolika elemen bakar. Hasil model termohidrolika sub-kanal ini adalah berupa pemodelan dan hasil verifikasi data sub-kanal desain termohidrolika elemen bakar yang sekaligus untuk keberlakuan model yang dibuat dengan menggunakan program RELAP5.

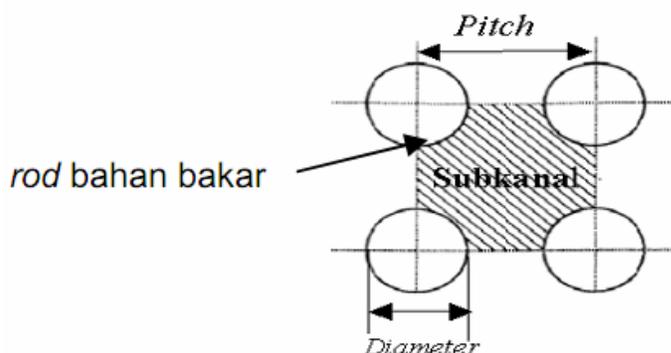
Diharapkan dari hasil evaluasi ini dapat meningkatkan kemampuan SDM untuk melakukan *review* terhadap karakteristik desain elemen bakar PWR 1000 tipikal dan PWR 1000 Maju, terutama analisis dari aspek termohidrolika yang sangat penting untuk menjaga integritas elemen

bakar. Disamping itu juga untuk mengetahui parameter yang berkaitan dengan termohidrolika ketika terjadi kondisi transien yang tidak diinginkan.

2. TEORI

2.1 Model Sub-kanal

Analisis sub-kanal adalah suatu metode yang dapat dipakai untuk menyelesaikan persoalan aliran di dalam banyak kanal yang terhubung secara kontinyu di sepanjang kanal di mana bundel elemen bakar dibagi dalam beberapa volume. Pada PLTN jenis PWR, aliran pendingin di dalam teras reaktor merupakan aliran satu fase, oleh karena itu dipergunakan pendekatan volume sub-kanal pendingin sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Sub-kanal

Dalam pendekatan volume sub-kanal terdapat beberapa penyederhanaan, antara lain karakteristik sub-kanal seperti kecepatan dan densitas ke arah aksial diwakili oleh satu harga rerata. Selain persamaan kekekalan massa, energi dan momentum, maka persamaan konstitutif (persamaan yang mempunyai hubungan matematik antara dua atau lebih fungsi keadaan dengan materi seperti temperatur, tekanan, volume dan energi dalam) juga digunakan dalam penyelesaian model sub-kanal pada RELAP5^[6].

2.2 RELAP5

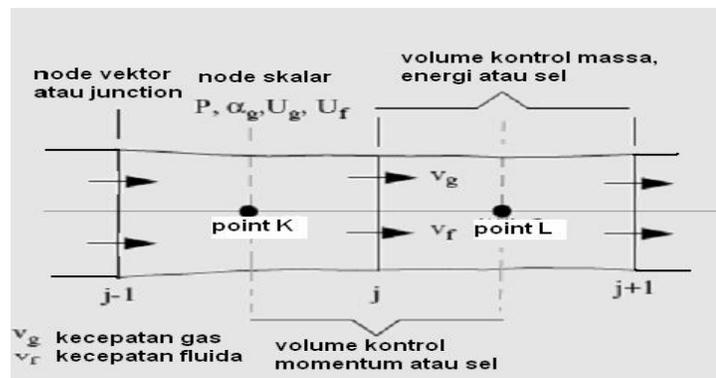
Program RELAP5 merupakan program komputer yang telah digunakan secara luas di seluruh dunia untuk melakukan analisis kondisi statik maupun transien pada suatu sistem termal dan hidrodinamika pendingin air ringan pada reaktor nuklir maupun non-nuklir.

Paket program ini dikembangkan dari model node dan junction multi-dimensional termohidrolika untuk menghitung watak keseluruhan termohidrolika sistem pendingin. Generasi fasa uap dalam perhitungan adalah hasil kondisi pada penguapan maupun kondensasi. Model yang digunakan merupakan sistem hidrodinamika non-equilibrium dan non-homogeneous dua-fluida termasuk perpindahan gas-gas tak terkondensasi, perpindahan kalor konvektif, konduksi kalor satu dimensi pada struktur sistem, kinetika reaktor, sistem kontrol dan logika trip. Paket program juga

mengandung model komponen/sistem yang ada pada reaktor pendingin air ringan (*Light Water Reactor*, LWR) seperti pompa, katup, separator dan sebagainya.

Komponen hidrodinamika dapat memodelkan *single volumes*, *time-dependent volumes*, pipa, anulus, separator, percabangan, akumulator dan pompa. Setiap model saling terhubung dengan model *junction* baik berupa *time-dependent junction*, *single/multiple junction* atau katup. Struktur kalor terdapat pada komponen pembangkit kalor maupun pada bagian yang terjadi perpindahan kalor yang dihubungkan dengan komponen hidrodinamika. Struktur kalor juga dapat mewakili struktur yang melingkupi suatu kanal aliran dan pada reaktor dapat digunakan untuk memodelkan dinding bejana reaktor, *rod* bahan bakar, dan *U-tubes* dari pembangkit uap. Data kinetika reaktor digunakan untuk mewakili perilaku daya reaktor berdasarkan pendekatan kinetika titik^[1].

Komponen hidrodinamika memiliki korelasi persamaan satu dimensi untuk fluida tunggal maupun aliran dua fasa air dan uap di mana persamaan dasarnya terdiri dari persamaan kekekalan massa, momentum dan energi. Model kesetimbangan dua fasa, diselesaikan secara numerik dalam persamaan implisit. Gambar 2. menunjukkan kecepatan pada batas (*boundary*) yang didefinisikan dengan menggunakan *momentum control volumes* di antara batas volume kontrol massa dan energi.



Gambar 2. Skematika nodalisasi volume kontrol massa, energi dan momentum

Komponen hidrodinamika tiap kontrol volume diselesaikan dengan persamaan satu dimensi untuk fluida tunggal maupun aliran dua fasa air-uap. Persamaan dasar terdiri dari kekekalan massa, momentum dan energi yang dikembangkan dari persamaan kontinuitas adalah sebagai berikut^[2].

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha \cdot \rho + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \alpha \cdot \rho \cdot v \cdot A = \Gamma \quad (1)$$

$$\alpha \cdot \rho \cdot A \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha \cdot \rho \cdot v \cdot A \frac{\partial v^2}{\partial x} = -\alpha \cdot \rho \cdot A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha \cdot \rho \cdot B \cdot A - \alpha \cdot \rho \cdot v \cdot v + \Gamma \cdot A(v) - C \cdot A \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} \alpha \cdot \rho \cdot U + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \alpha \cdot \rho \cdot U \cdot v \cdot A = -P \frac{\partial \alpha}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \alpha \quad (3)$$

dengan,

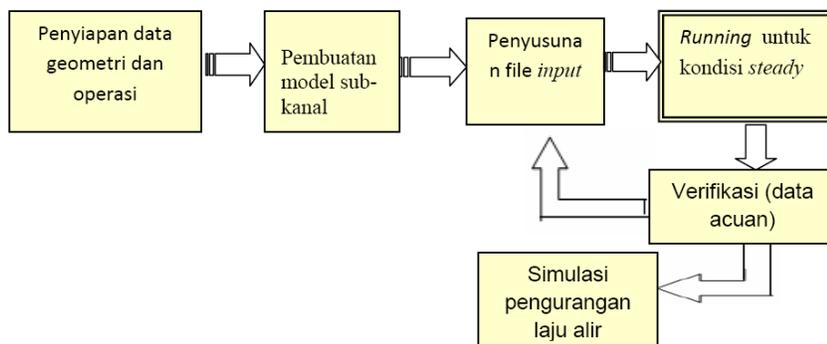
ρ : densitas (kg/m^3),
 A : luas penampang (m^2)
 v : kecepatan (m/detik),
 α : fraksi uap

Γ : Laju massa volumetrik ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}$),
 U : energi internal (J/kg),
 P : tekanan (Pa) dan
 h : entalpi (J/kg).

3. TATA KERJA

3.1 Sistematika alur tata kerja pemodelan

Sebagai ilustrasi, sistematika alur tata kerja pemodelan untuk evaluasi perbandingan desain termal kanal bahan bakar AP-1000 dan PWR 1000 menggunakan paket program RELAP5 ditampilkan pada Gambar 3. Secara garis besar ada 4 langkah pekerjaan yaitu penyiapan data geometri dan parameter operasi, pembuatan model sub-kanal, penyusunan file *input* dan *running*.



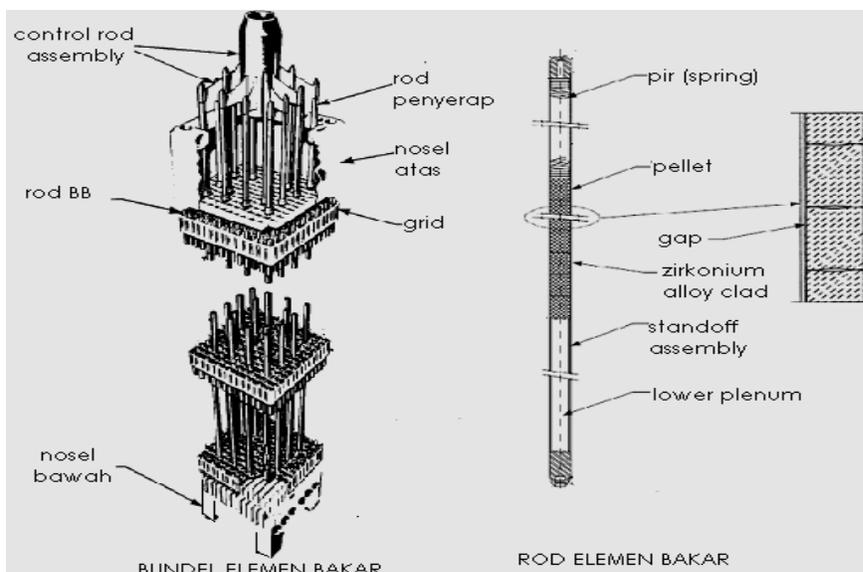
Gambar 3. Sistematika alur tata kerja pemodelan

3.2 Deskripsi Bundel Elemen Bakar AP-1000 dan PWR 1000

PWR 1000 dan AP-1000 memiliki susunan matriks *rod* bahan bakar yang sama yaitu 17x17 dan satu perangkat terdiri dari 264 *rod* bahan bakar tetapi keduanya mempunyai perbedaan ukuran diameter. AP-1000 diameternya 0,95 cm dan PWR 1000 diameter 0,914 cm. Data spesifikasi desain teras AP-1000 dan PWR 1000 tipikal diberikan pada Table 1, dan konstruksi bundel elemen bakar diberikan pada Gambar 4.

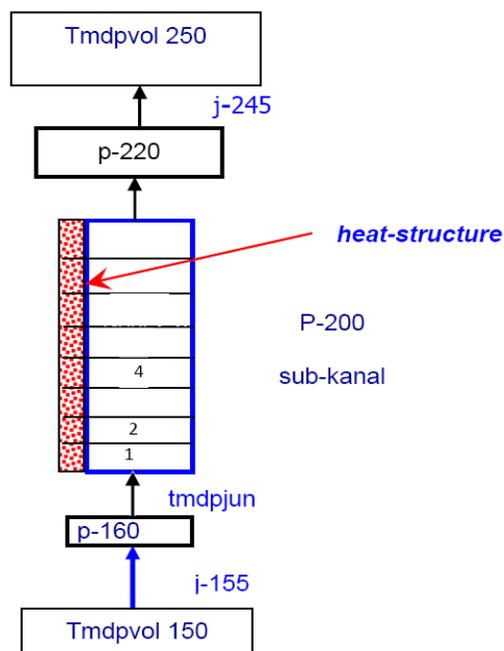
Tabel 1. Data spesifikasi desain teras AP 1000 dan PWR 1000 Tipikal^[1,6]

No.	Parameter	Keterangan	
		AP 1000	PWR 1000 tipikal
1.	Tipe PLTN	AP 1000	PWR 1000 tipikal
2.	Desainer/Vendor	Westinghouse	Westinghouse
3.	Daya termal (MW)	3400	3411
4.	Laju alir efektif (kg/jam)	48,44 x 10 ⁶	59,053 x 10 ⁶
5.	Tekanan operasi (MPa)	15,00	15,15,17
6.	Suhu inlet pendingin (°C)	279,44	292,00
7.	Suhu outlet pendingin (°C)	324,66	328,30
8.	Diameter teras (Cm)	304,04	337,06
9.	Tinggi teras aktif (Cm)	426,72	365,76
10.	Jumlah perangkat bahan bakar	157	193
11.	Tipe perangkat bahan bakar	17 x 17	17 x 17
12.	Ukuran perangkat bahan bakar (cm x cm)	21,40 x 21,40	21,40 x 21,40
13.	Jumlah <i>rod</i> /perangkat	264	264
14.	Jarak anatar pusat <i>rod</i> (cm)	1,26	1,26
15.	Diameter <i>rod</i> (cm)	0,950	0,914
16.	Dimeter pellet (cm)	0,819	0,874
17.	Fluks panas rata-rata (kW/m ²)	628,71	622,09
18.	Fluks panas maksimum (kW/m ²)	1634,71	1555,21



Gambar 4. Rod dan bunde elemen bakar^[1]

Pada evaluasi termohidrolika sub-kanal elemen bakar, untuk pendekatan model pembangkitan kalor dari *rod* elemen bakar dipakai model struktur kalor dan penyerapan kalor oleh model volume pendingin. Model pendingin sub-kanal dialirkan secara *up-flow* menggunakan model *time-dependent-junction* (tmdpjun). Gambar 5 menunjukkan pemodelan sub-kanal yang diaplikasikan pada RELAP5. Model ini terdiri dari 1 *heat-structure*, 1 volume sub-kanal aksial, dan 2 *time dependent volume* yang merepresentasikan kondisi plenum. Dalam pemodelan ini sub-kanal secara aksial ditetapkan menjadi 20 node, dimana pembagian tersebut dianggap cukup untuk merepresentasikan kurva aksial.

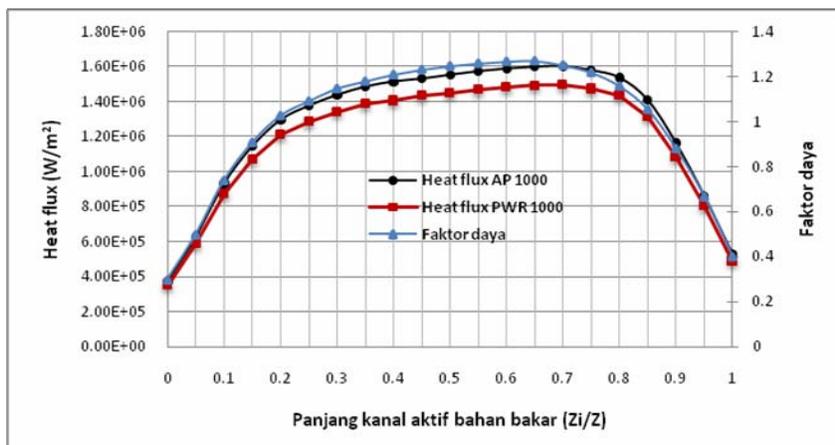


Gambar 5. Nodalisasi sub-kanal pada RELAP5

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian penggunaan program komputer untuk menganalisis kinerja teras reaktor air ringan AP 1000 dan PWR 1000 diberikan pada Gambar 6 sampai dengan 9. Hasil yang diperoleh meliputi faktor daya dan *heat flux* sepanjang kanal bahan bakar aktif, distribusi temperatur kelongsong, distribusi temperatur pendingin dan faktor daya sepanjang kanal bahan bakar aktif, masing-masing untuk kondisi *steady state*. Sedangkan untuk kondisi transien perhitungan dilakukan dengan variasi pengurangan laju aliran pendingin. Fraksi *void* yang terbentuk sebagai fungsi pengurangan laju alir pendingin diberikan pada Gambar 9.

Gambar 6. menunjukkan distribusi *heat flux* AP 1000 dan PWR 1000 dan faktor daya aksial sebagai fungsi panjang kanal elemen bakar aktif. Panjang kanal aktif bahan bakar AP-1000 MWe adalah 4,267 m dan panjang kanal aktif PWR 1000 adalah 3,672 m. Aliran pendingin di teras reaktor berlangsung dari bawah ke atas. Angka 0 pada panjang kanal bahan bakar menunjukkan posisi terbawah dan posisi tertinggi di ujung kanal dari teras aktif yang masing-masing dibagi ke dalam 20 node.



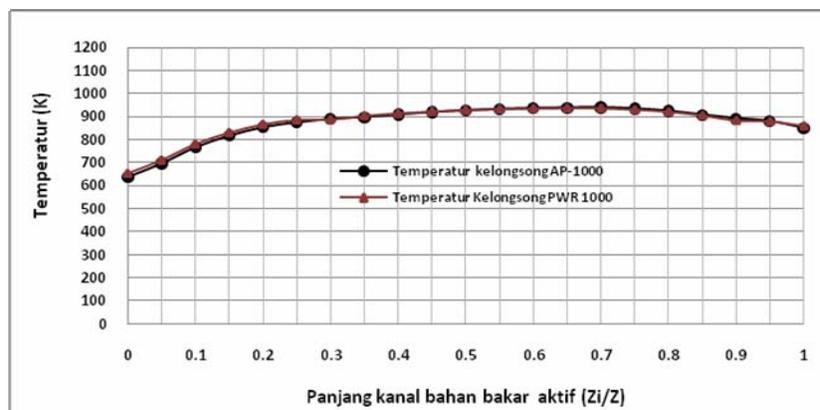
Gambar 6. Distribusi faktor daya aksial dan *heat flux* fungsi panjang kanal bahan bakar aktif AP-1000 dan PWR 1000

Distribusi faktor daya aksial sepanjang kanal bahan bakar tampak mengikuti fungsi Cosinus α , hal ini sesuai dengan distribusi aksial fluks neutron, demikian pula sesuai dengan pembangkitan panas yang terjadi pada bahan bakar arah aksial. Pola faktor daya ini diperoleh dari eksperimen dengan nilai tertinggi dari faktor daya yaitu sebesar 1,27^[1]. Hal ini berlaku baik untuk reaktor AP-1000 maupun PWR 1000. *Heat flux* yang diperoleh baik untuk AP-1000 maupun PWR 1000 dari perhitungan menunjukkan kecenderungan yang sama bahkan terlihat berimpit dan mengikuti pola distribusi faktor daya sepanjang kanal bahan bakar arah aksial. Hal ini juga menunjukkan bahwa telah sesuai antara faktor daya dan pembangkitan panas pada bahan bakar sepanjang kanal bahan bakar.

Nilai tertinggi *heat flux* baik untuk reaktor AP 1000 maupun PWR 1000 terjadi pada faktor daya tertinggi yaitu masing-masing sebesar 16010×10^3 kW/m² untuk AP 1000 dan 15002×10^3 kW/m² untuk PWR 1000. Kondisi nilai *heat flux* tertinggi dari data desain AP-1000 adalah 1634×10^3

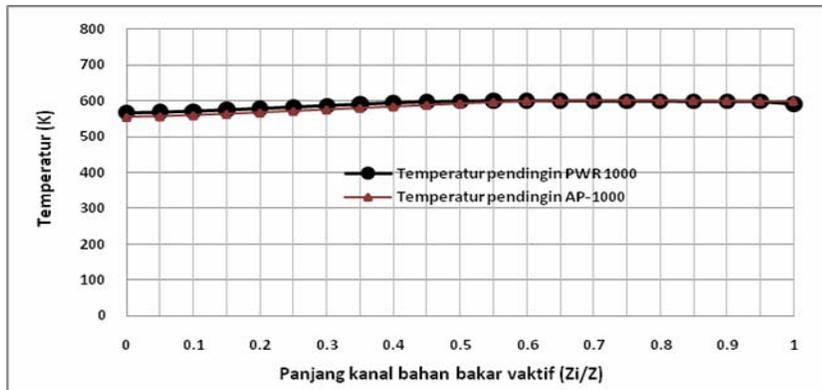
kW/m^2 dan PWR 1000 adalah $1555,21 \times 10^3 \text{ kW/m}^2$. Jadi terdapat perbedaan nilai *heat flux* tertinggi masing-masing sebesar 6,9 %, dan 1,5 %. Nilai perbedaan ini relatif kecil dan tidak signifikan.

Gambar 7 menunjukkan distribusi temperatur kelongsong sebagai fungsi panjang kanal bahan bakar aktif, sedangkan Gambar 8 menunjukkan distribusi pendingin. Distribusi temperatur kelongsong sepanjang kanal bahan bakar mula-mula naik pada awal masuk teras reaktor sampai node 5, kemudian relatif datar sampai node 17 dan turun lagi sampai dengan node 20. Penurunan dari node ke 17 sampai dengan node 20 tidak setajam kenaikan temperatur dari awal sampai ke node 5. Hal ini terjadi baik untuk AP-1000 maupun PWR 1000. Temperatur kelongsong untuk AP-1000 pada awal masuk teras sebesar 638,17 K dan keluar teras sebesar 850 K. Untuk PWR 1000 temperatur masuk teras sebesar 651,77 K dan keluar teras sebesar 860 K.



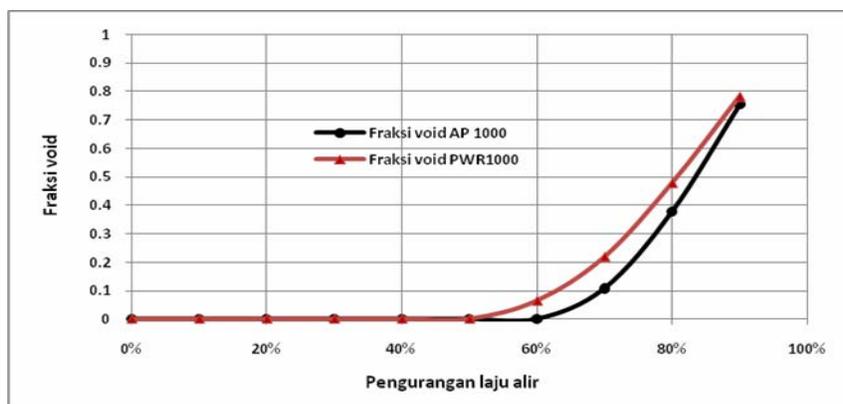
Gambar 7. Temperatur kelongsong sebagai fungsi panjang kanal bahan bakar aktif AP-1000 dan PWR1000

Berbeda dengan distribusi temperatur kelongsong, distribusi temperatur pendingin semakin naik dengan bertambahnya panjang kanal bahan bakar mengikuti arah aliran pendingin. Hal ini karena adanya akumulasi panas dari tiap node bahan bakar pada pendingin. Untuk AP-1000 desain temperatur pendingin masuk kanal bahan bakar kondisi desain adalah 552,4 K. Nilai temperatur ini digunakan sebagai *input* program. Temperatur keluar di ujung kanal bahan bakar diperoleh sebesar 597,66 K. Kondisi desain temperatur keluar AP 1000 adalah 597,6 K. Hasil perhitungan ini sesuai dengan kondisi desain dan tidak terdapat perbedaan. Pada PWR 1000 desain temperatur pendingin masuk teras sebesar 565,00 K dan keluar teras sebesar 601,30 K. Hasil perhitungan diperoleh 591 K, sehingga terjadi perbedaan untuk kondisi temperatur keluar teras yaitu sebesar 1,8 % lebih rendah dibandingkan dengan kondisi desain.



Gambar 8. Temperatur pendingin sebagai fungsi panjang kanal bahan bakar aktif AP-1000 dan PWR1000

Gambar 9 menunjukkan fraksi *void* sebagai fungsi pengurangan laju alir pendingin. Laju alir pendingin pada setiap sub-kanal masing-masing sebesar 0,32 kg/s untuk AP-1000 dan 0,30 kg/s untuk PWR 1000. Pengurangan laju alir pendingin pada perhitungan kondisi transien dilakukan sebesar 10 % dari laju alir nominal. Fraksi *void* yang terbentuk sebagai fungsi laju alir pendingin menunjukkan semakin besar dengan berkurangnya persentase pengurangan laju aliran pendingin. Hal ini terjadi baik untuk reaktor AP-1000 maupun PWR 1000. Kondisi ini terjadi karena kemampuan pendingin dalam mengambil panas semakin berkurang dengan berkurangnya laju alir. *Void* yang terbentuk terjadi lebih awal pada PWR 1000 yaitu ketika pengurangan laju alir sebesar 50 %, kemudian diikuti oleh AP-1000 ketika laju alir berkurang 60 % masing-masing terhadap laju alir nominalnya. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi desain termal teras reaktor AP-1000 relatif lebih baik dari pada PWR 1000.



Gambar 9. Fraksi *void* yang terbentuk sebagai fungsi pengurangan laju alir pendingin reaktor AP -1000 dan PWR 1000.

5. KESIMPULAN

Hasil perhitungan termohidraulika sub-kanal bahan bakar AP-1000 dan PWR 1000 menggunakan paket program RELAP5 yang meliputi distribusi *heat flux*, temperatur kelongsong, dan pendingin sepanjang kanal bahan bakar aktif berhasil dilakukan untuk validasi model sub-kanal pada RELAP5 dan tidak terdapat perbedaan yang signifikan terhadap data desain yang diacu. Hasil

simulasi yang dilakukan dengan pengurangan laju alir pendingin menunjukkan bahwa *void* terbentuk lebih awal pada PWR 1000 dari pada AP-1000. Dengan demikian telah diperoleh karakteristik termal teras AP -1000 dan PWR 1000 hasil pemodelan yang dihitung dengan menggunakan paket program RELAP5.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada RISTEK dan semua pihak yang telah membantu penelitian ini. Kegiatan penelitian ini dibiayai melalui Program Insentif Peningkatan Kesejahteraan Peneliti dan Perakayasa (PI-PKPP) Ristek dengan judul *Verifikasi dan Validasi Parameter Desain Termohidrolika Teras PLTN PWR 1000* tahun 2011.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. <http://www.ukap1000 application.com>. 2010.
- [2]. ANONIM,, RELAP5 Code Development Team, RELAP5/MOD3. Code Manual User Guide and Input Requirements, NUREG/CR-5535-V2. Idaho National Engineering Laboratory, Washington DC.1995.
- [3]. Keichii Hori dkk, "Void Fraction in a single Channel Simulation one Subchannel of a PWR Fuel Assembly", 2-Phase Flow Modeling and Exp, Celata Shah editor, 1995.
- [4]. KUNDO, MISAYA, (Practical Work of Relap5 Analysis, IAEA, NSRA, 2008.
- [5]. RALPH,A.NELSON,et al Phenomogical Thermal-hydraulic model of Hot Rod bundel experiencing and optimization methodology for closure development, Reflood completion report, DOE, USA, 1996
- [6]. KAZIMI, M.S and TODREAS, N.E., Nuclear System I, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1991.
- [7]. SUKMANTO, DIBYO. dkk., Validasi Pemodelan *Test-Section* Queen Menggunakan RELAP5, Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta FasilitasNuklir, PTRKN - ITS, Surabaya, 2010.

DISKUSI/TANYA JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Sudarno, PTRKN-BATAN)

- Bagaimana karakteristik termohidrolika dari reaktor yang di evaluasi?

JAWABAN: (Suroso, PTRKN-BATAN)

- Untuk kondisi tunaknya (*steady state*), tidak ada perbedaan yang signifikan. Tetapi pada kondisi transiennya relatif lebih baik untuk AP-1000 jika dibandingkan dengan PWR-1000 tipikal.

2. PERTANYAAN: (M. Dhandhang Purwadi, PTRKN-BATAN)

- Mengapa dibandingkan antara PWR-1000 tipikal dengan AP-1000?

JAWABAN: (Suroso, PTRKN-BATAN)

- Karena kedua reaktor tersebut mempunyai daya yang sama, tetapi mempunyai dimensi teras yang berbeda.