

VERIFIKASI MODEL PERANGKAT BAHAN BAKAR REAKTOR DAYA PWR-1000

Sukmanto Dibyo dan M. Darwis Isnaeni

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310

e-mail: sukdibyo@batan.go.id

ABSTRAK

VERIFIKASI MODEL PERANGKAT BAHAN BAKAR REAKTOR DAYA PWR-1000.

Aanalisis verifikasi model termohidrolika perangkat bahan bakar berguna untuk mengetahui karakteristik desain termohidrolika teras reaktor. Paket program RELAP5 berhasil memodelkan satu perangkat bahan bakar dan diverifikasi dengan data desain. Data desain dari reaktor daya AP1000 digunakan sebagai data referensi. Pada perangkat bahan bakar ini terdapat 17x17 batang yang memiliki faktor daya yang bervariasi. Pemodelan membagi perangkat menjadi 4 kelompok kanal yaitu kelompok faktor daya 1,396, faktor daya rentang 1,203 sampai 1,394, rentang 1,198 kebawah dan kanal bypass. Secara aksial, perangkat dibagi menjadi 3 zona yaitu zona stand-off assembly di bagian bawah, zona panjang aktif dan zona plenum atas. Ssedangkan panjang aktif dibagi menjadi 10 node aksial. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa model yang dibuat masih perlu penyempurnaan, namun demikian secara kualitatif berada dalam batas yang realistis. Selanjutnya pemutakhiran model akan dilakukan untuk mendapatkan hasil verifikasi yang lebih baik.

Kata kunci: Perangkat Bahan Bakar PWR-1000, Pemodelan, Desain Termohidrolika, RELAP5

ABSTRACT

FUEL BUNDLE MODEL VERIFICATION OF PWR-1000 POWER PLANT. Verification analysis of the fuel thermal-hydraulic model is useful to know the characteristics of the reactor core thermal-hydraulic design. Package RELAP5 program succeeded in modeling a set of fuel and verified with design data. Design data on the ap1000 power reactor is used as the references. On the fuel bundle, there are 17x17 fuel rods that have a radial factor the power varies. Modeling of fuel bundle are divided into 4 channel groups, ie. Power factor of 1.396, range power factor of 1.203 to 1.394, power factor of less then 1.198 down and bypass channel. Axially, the channel are divided into 3 zones there are stand-off assembly at the bottom, an active length of the channel and the zone of upper plenum. Verification results show that the model is made still need refinement, however qualitatively within realistic limits. Further updating of the model will be done to get a better verification results.

Keywords: PWR-1000 Fuel Bundle, Modeling, Thermalhydraulic Design, RELAP5

1. PENDAHULUAN

Teras reaktor (*reactor core*) merupakan komponen vital pada suatu reaktor nuklir PLTN, di mana terjadi pembangkitan energi (panas) dari reaksi fisi. Teras reaktor terdiri dari sejumlah perangkat bahan bakar yang tersusun menjadi konfigurasi teras. Pada desain reaktor daya AP1000, satu perangkat bahan bakar terdapat 17 x 17 batang bahan bakar, meskipun Perangkat bahan bakar ini serupa dengan yang sudah ada (PWR1000 tipikal) tetapi upaya untuk menguasai penggunaan model yang diverifikasi perlu dilakukan. Data desain PBB ini dapat dimodelkan dengan menggunakan paket program komputer, sehingga dari model ini dapat dilakukan analisis yang berkaitan dengan karakteristik termohidrolika perangkat bahan bakar tersebut. Untuk itu verifikasi model harus dikerjakan dalam rangka keberlakuan model yang dibuat untuk analisis, oleh karena itu data desain konsep AP1000

dapat digunakan sebagai sumber acuan. AP1000 didesain berdasarkan kinerja yang sudah proven pada PLTN yang memiliki daya 1154 MWe^[1].

Program komputer yang dalam hal ini adalah paket RELAP5.Scrap.M3.4 merupakan salah satu versi paket program RELAP5 yang dapat digunakan untuk melakukan analisis termohidrolika teras reaktor berpendingin air ringan (H₂O). Perangkat bahan bakar AP1000, dapat dipakai sebagai obyek untuk dimodelkan dengan menggunakan paket program yang mana model ini terdiri dari model *volume*, *junction*, *heat structure* dan *time dependent junction* pada nodalisasi untai terbuka dan dilengkapi dengan kondisi batas sebagai *time-dependent volume (tmdpvol)*^[2]. Untuk memperoleh model yang valid maka analisis dapat difokuskan pada satu perangkat bahan bakar yang dimodelkan sesuai dengan ketentuan yang berlaku pada paket RELAP5. Satu perangkat memiliki sejumlah batang bahan bakar, batang kendali dan subkanal pendingin^[3].

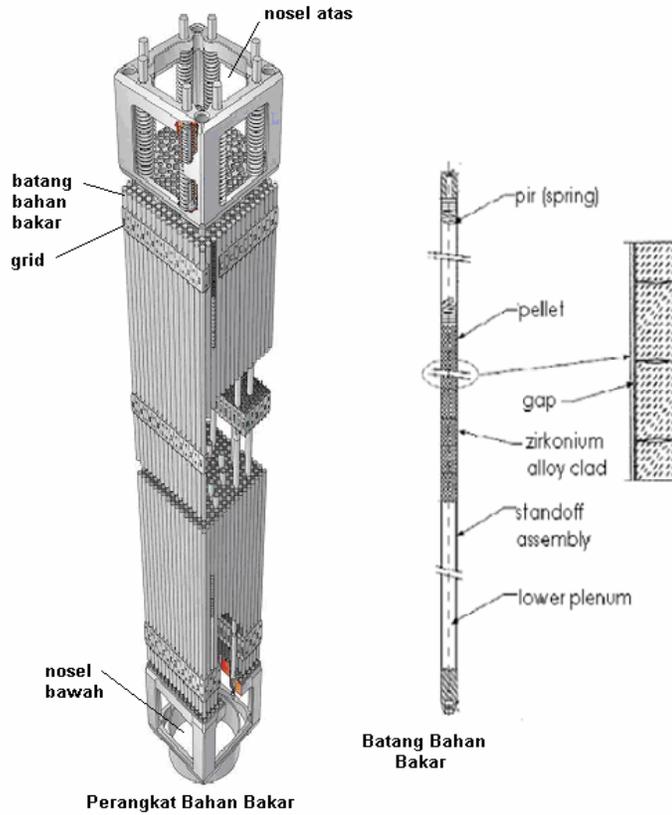
Diharapkan dari hasil analisis verifikasi ini diperoleh model satu perangkat bahan bakar untuk paket RELAP5 yang dalam analisis kedepan dapat dimanfaatkan untuk simulasi desain konfigurasi termohidrolika pada suatu perangkat bahan bakar reaktor AP1000 atau melakukan *review* terhadap karakteristik desain termohidrolika perangkat bahan bakar reaktor AP1000.

2. TEORI

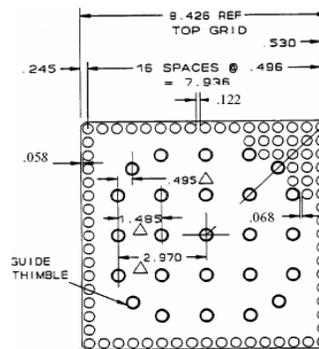
2.1. Deskripsi Perangkat Bahan Bakar

Perangkat bahan bakar AP1000 terdiri dari 289 batang yang terdiri dari 264 batang bahan bakar berisi uranium oksida, 1 *thimble* dan 24 batang kendali. Perangkat tersusun dalam rangkaian 17x17 *square array*. Bagian tengah PBB memiliki *guide thimble* yang menjaga integritas kelengkapan instrumentasi untuk monitoring temperatur air dan fluks neutron di dalam teras. *Guide thimble* dihubungkan dengan nosel atas dan bawah yang juga dilengkapi dengan struktur penyangga untuk *fuel grids*. Setiap batang bahan bakar terdapat per (*spring*) untuk menahan *pellet* berada pada posisi yang stabil sementara itu juga terdapat ruang di dalam batang tersebut untuk memungkinkan ekspansi volume karena deformasi yang disebabkan oleh panas, radiasi neutron, dan dampak produk fisi gas. Jadi batang bahan bakar ini senantiasa mengakomodasi *thermal expansion* dan *swelling* yang lebih baik, dan juga meningkatkan kemampuan menampung volume *void* untuk produk fisi.

Desain perangkat bahan bakar AP1000, mempunyai panjang aktif 4,267 m dan dilengkapi dengan *grid* pencampur aliran (*flow mixing grids*). Di dalam perangkat bahan bakar terdapat *ceramic pellets* dengan perkayaan rendah uranium dioxide (UO₂). *Pellets* tersebut dimuatkan pad tabung Zirlo, yang mana batang ini ditutup dengan *seal-welded* di kedua ujungnya. Zirlo merupakan *advanced zirconium* berbasis *alloy*^[3]. Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan satu perangkat bahan bakar pada AP1000 dan Tabel 1 adalah ringkasan data desain spesifikasinya.



Gambar 1. Perangkat dan Batang Bahan Bakar



Gambar 2. Penampang Perangkat Bahan Bakar

Tabel 1. Data Desain Perangkat Bahan Bakar AP1000.

No.	Parameter	Data Desain
1.	Panjang aktif bahan bakar (m)	4,2672
2.	Diameter batang (m)	0,0095
3.	Diameter ekuivalen sub-kanal (m)	0,011179
4.	Rod pitch (m)	0,01260
5.	Plenum atas (m)	0,164465

6.	Luas Aliran sub-kanal (m ²)	0,0000878
7.	Luas Aliran 1 PBB (m ²)	0,003176
8.	<i>Stand-off assembly</i> (m)	0,143129
9.	Kecepatan efektif pendingin (m/s)	4,85
10.	Temperatur inlet pendingin (K)	552,40
11.	Temperatur keluar pendingin teras (K)	597,81
12.	Jumlah batang bahan bakar (-)	264
13.	Jumlah batang kendali (-)	25
14.	Fluk aliran rerata perangkat (kg/jam.m ²)	12,45
15.	Penurunan Tekanan Aliran Teras (Pa)	271429

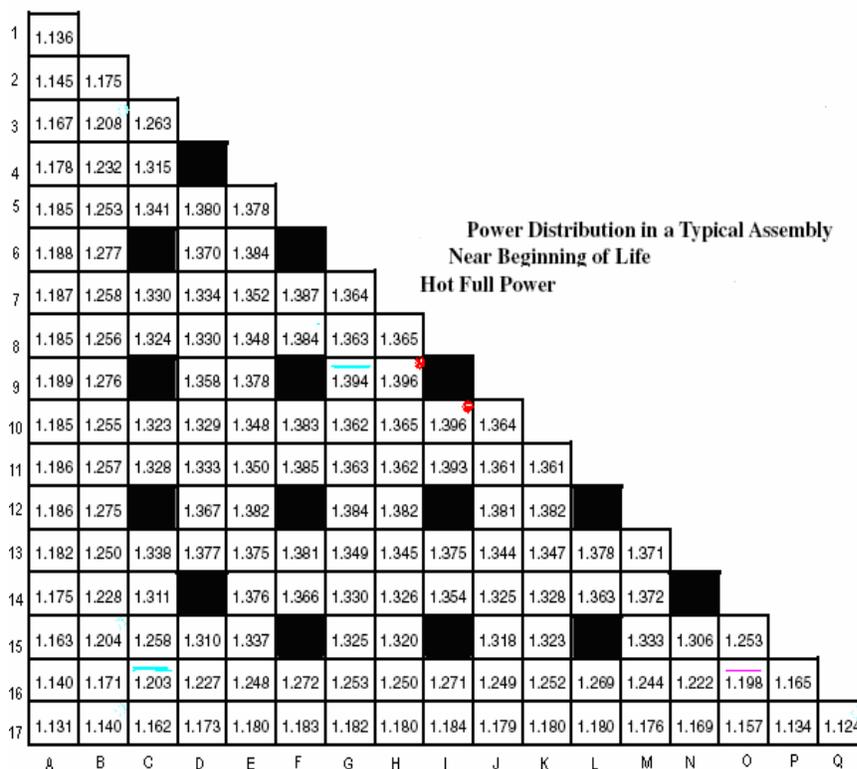
2.2. Deskripsi RELAP5

RELAP5 adalah paket program komputer termohidrolika satu dimensi yang telah digunakan secara luas untuk melakukan simulasi *steady-state* maupun transien pada suatu sistem termal dan pendingin air ringan pada reaktor nuklir. Paket ini dikembangkan oleh U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC). Versi Scdap dari Innovative Software System, Idaho Falls dilengkapi dengan paket analisis kecelakaan teras terparah.

Paket program ini menggunakan model *node* dan *junction multi-dimensional* untuk menghitung keseluruhan perilaku termohidrolika sistem pendingin. Model yang digunakan merupakan sistem hidrodinamika *nonequilibrium* dan *nonhomogenous* fluida dua-fasa termasuk untuk gas-gas tak terkondensasi, transfer panas secara konveksi, konduksi satu dimensi pada struktur sistem, kinetika reaktor, sistem kontrol dan logika *trip*. Paket program juga mengandung model komponen sistem pada reaktor pendingin air ringan (*Light Water Reactor, LWR*) seperti pompa, katup, turbin, separator dan sebagainya. Struktur yang melingkupi suatu kanal aliran yang memodelkan dinding bejana reaktor, *rod* bahan bakar, dan *U-tubes* dari pembangkit uap dapat digunakan model *heat structure*. Data kinetika reaktor, digunakan untuk mewakili perilaku daya reaktor berdasarkan pendekatan kinetika titik^[4]. Pada setiap Komponen hidrodinamika yang dimodelkan, saling terhubung dengan model *junction* baik berupa *time-dependent junction, single / multiple junction* ataupun katup. Komponen ini memiliki korelasi persamaan satu dimensi untuk fluida tunggal maupun aliran dua fasa air-uap air di mana persamaan dasarnya terdiri dari persamaan kekekalan massa, momentum dan energi yang dikembangkan dari persamaan kontinuitas. Persamaan konservasi tersebut mensimulasikan kondisi dua fase, air dan uap yang saling berkaitan satu sama lain dan diselesaikan untuk setiap tahap. 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 termohidrolika RELAP5^[5].

2.2. Model Perangkat Bahan Bakar

Dalam pemodelan satu perangkat bahan bakar, dapat dibagi menjadi beberapa kelompok kanal yang tiap kelompok memuat kanal volume pendingin dan struktur panas (pembangkit panas). Dalam hal ini setiap posisi batang bahan bakar memiliki faktor pembangkitan daya radial yang berbeda menyebar pada 17x17 batang bahan bakar sebagaimana ditunjukkan pada gambar setengah penampang Perangkat (Gambar 3). Oleh karena itu berdasarkan data dari faktor pembangkitan daya radial, pemodelan ini membagi menjadi 4 kanal berdasarkan pengelompokan dari faktor daya yaitu daya terbesar (kanal terpanas), daya menengah, daya rendah dan kanal *by-pass*. Kanal I mewakili posisi kanal dengan faktor daya terbesar yaitu 1,396 (Posisi H9, I10), kanal II mewakili posisi kanal pada rentang faktor daya 1,203 sampai 1,394 (Posisi B15, G9), kanal III mewakili posisi lain yang lebih kecil dari 1,198 (posisi O16), kanal IV adalah lintasan aliran yang disimulasikan bilamana terjadi aliran *by-pass* (aliran pendingin yang tidak melalui bagian di mana terjadi transfer panas). Fraksi aliran *bypass* ini dapat diinputkan sesuai dengan asumsi yang digunakan pada sistem aliran pendingin teras reaktor^[6]. Oleh karena 4 kelompok kanal fiktif ini aliran airnya tidak saling berinteraksi sebagai sub-kanal terdekat (*adjacent subchannel*), maka interkoneksi antar kanal (*cross-flow*) tidak digunakan. Pemodelan ini merupakan penyederhanaan model tahap awal yang mana meskipun penggunaan *cross-flow* antar subkanal yang berdekatan akan berdampak hasil yang lebih baik^[5,7]. Angka faktor daya radial pada Gambar 3, digunakan untuk mendapatkan faktor *heating-multiplier* daya untuk ketiga struktur panas di kanal I, II dan III.



Gambar 3. Potongan Diagonal Penampang Faktor Daya Radial Perangkat Bahan Bakar

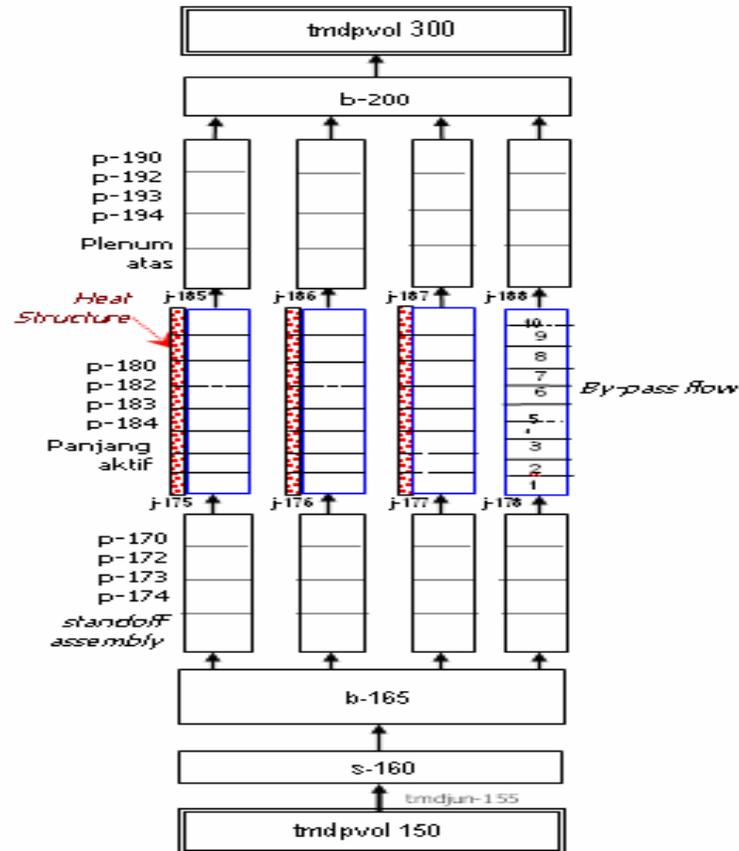
Pada model satu perangkat bahan bakar ini digunakan dua *tmdpvol* (*time-dependent volume component*) untuk menetapkan kondisi pendingin masuk sebagai *boundary condition* dan pendingin keluar sebagai volume pelepasan panas (*heat sink*). Model *branch* (percabangan) dipasang untuk membagi aliran masuk menjadi 4 kanal yang dimodelkan, setiap kanal diinputkan data sesuai kondisi yang diwakili dalam pemodelan. Pendingin dialirkan dari *tmdpvol* masuk kemudian mengalir melalui 4 kanal dan keluar pada *tmdpvol heat sink*. Model *tmdjunc* (*time dependent junction*) sebagai pengalir pendingin secara *up-flow* diletakkan pada aliran masuk. Struktur panas (*heat structure*) hanya terdapat pada komponen yang terjadi transfer panas yang dihubungkan dengan komponen hidrodinamika yaitu panjang aktif (*active length*) pada kanal I, II, dan III.

Secara aksial, setiap kanal ditetapkan menjadi 10 node, di mana pembagian tersebut sudah cukup untuk merepresentasikan kurva pola distribusi daya aksial, sedangkan model pada *stand-off* dan plenum atas hanya dibagi menjadi 4 node. Jadi secara keseluruhan, model perangkat ini memiliki 2 *tmdpvol*, 1 *tmdjunc*, 13 volume, 1 single volume dan 2 model *branch*. Gambar 4 menunjukkan gambar nodalisasi pada model perangkat.

Tabel 2 menyajikan data kompilasi untuk mendukung dalam penyusunan *input deck*, Tabel ini disusun kembali berdasarkan data referensi yang tersedia.

Tabel 2 Data kompilasi Untuk Penyusunan *Input Deck*

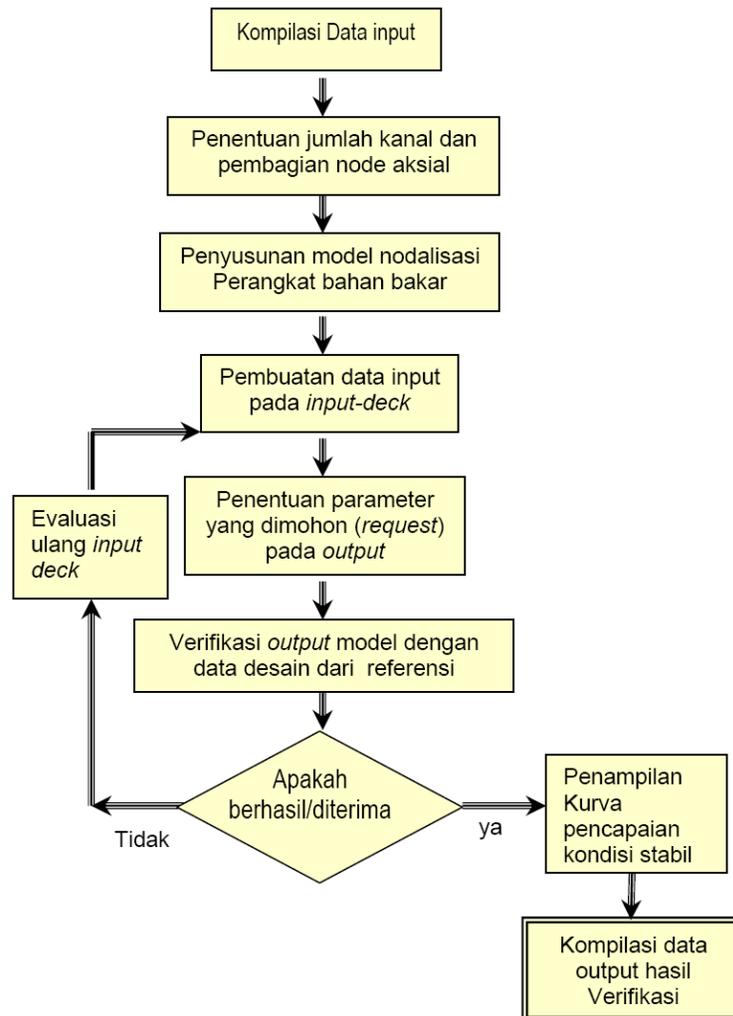
Parameter	Kanal I	Kanal II	Kanal III	Kanal IV
Panjang aktif bahan bakar (m)	4,267200	4,2672	4,2672	0
Panj. Stand-off assembly (m)	0,143129	0,143129	0,143129	0,143129
Panj. Plenum atas (m)	0,164465	0,164465	0,164465	0,164465
Panj. / Node St.Assembly (m)	0,035782	0,035782	0,035782	0,035782
Panj. / Node Kanal Aktif (m)	0,426720	0,42672	0,42672	0,42672
Panj. / Node Plenum Atas (m)	0,041116	0,041116	0,041116	0,041116
Volume-angle (°)	90	90	90	90
Diameter hidrolik (m)	0,011179	0,011179	0,011179	-
Luas Aliran kanal (m ²)	0,0001756	0,0540848	0,0093068	0,000000001
Laju Aliran Pendingin (kg/s)	1,16	44,66	30,74	0,00001
Panjang Plenum atas (m)	4,267200	4,2672	4,2672	0
Kekasaran Permukaan (m)	1,5E-5	1,5E-5	1,5E-5	1,5E-5
Temperatur inlet pendingin (K)	552,4000	552,40	552,40	552,40
Tekanan inlet pendingin (MPa)	148,80+5	148,80+5	148,80+5	148,80+5
Jumlah batang bahan bakar (-)	4	154	106	0
Faktor daya radial (-)	1,3960	1,227	1,188	0



Gambar 4. Nodalisasi Model Perangkat Bahan Bakar

3. TATA KERJA

Tahap pertama dalam pemodelan perangkat bahan bakar adalah inventarisasi data input yang kemudian dikompilasi parameter yang diperlukan dalam menyusun input. Selanjutnya penentuan kelompok kanal berdasarkan data faktor daya dari Gambar 3. dan dibuat gambar nodalisasi seperti pada Gambar 4. *Input deck* disusun berdasarkan data input dan nodalisasinya. Parameter temperatur, laju aliran pendingin, tekanan aliran dan fluk panas dipilih sebagai kondisi yang diminta (request). Pekerjaan akan dievaluasi ulang bilamana tidak mendapatkan hasil verifikasi yang memadai. Hasil verifikasi dapat disajikan dalam bentuk tabel dan pencapaian kondisi stabil ditampilkan dalam bentuk kurva-kurva. Alur skema tata kerja ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Langkah Verifikasi Pemodelan

4. PEMBAHASAN

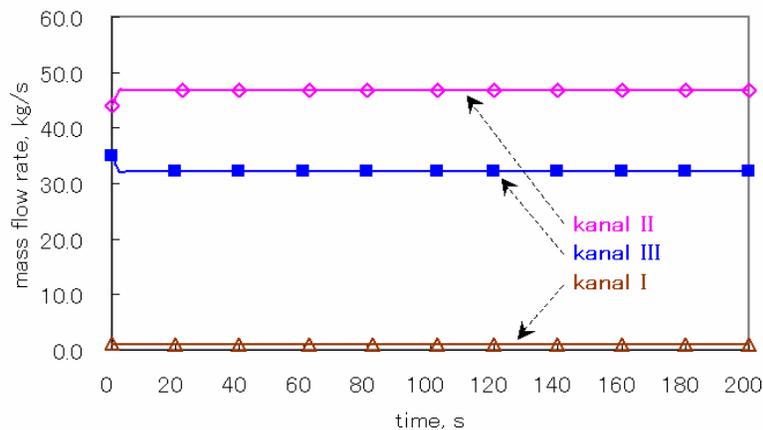
Dalam pembahasan ini didiskusikan tentang pengembangan nodalisasi dan problem yang dijumpai dalam penggunaan data verifikasi dari fitur model yang dibuat. Parameter termohidrolika yang dikemukakan disini adalah temperatur, laju aliran pendingin, tekanan aliran dan fluks panas.

Pada hakekatnya proses *running* program RELAP5 adalah untuk mendapatkan kurva evolusi pencapaian *steady-state*, dalam hal ini tidak membutuhkan waktu yang lama^[8], kualifikasi *steady-state* yang stabil telah ditetapkan sampai 200 detik di mana perolehan kondisi *steady-state* sangat memadai.

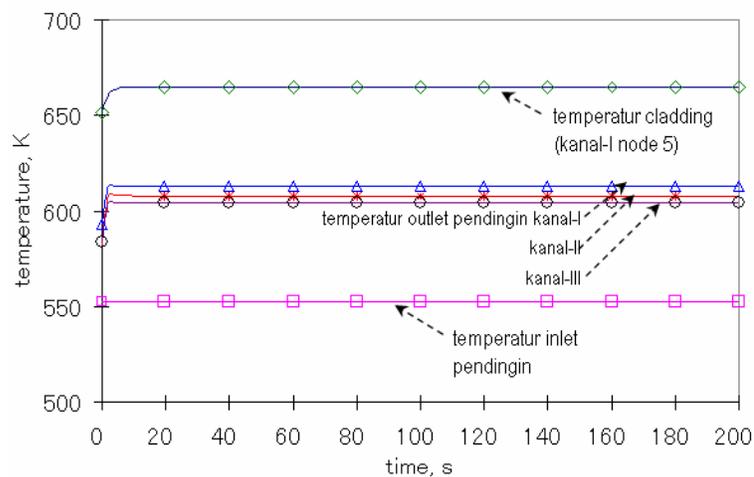
Pencapaian kondisi stabil parameter laju aliran pendingin ditunjukkan pada Gambar 6. Besarnya laju aliran pendingin ditiap kanal ini dipengaruhi oleh luas aliran dan entalpi pendingin yang mengalir tersebut. Laju aliran masing-masing adalah 1,0255 kg/s (Kanal-I), 46,8693 kg/s (Kanal-II), 32,0948 kg/s (Kanal-III) dan 0,0 kg/s (Kanal-IV). Kanal IV merupakan model untuk aliran *by-pass* yang dalam analisis ini luas alirannya diinputkan sama dengan nol. Parameter berikutnya adalah temperatur yaitu temperatur pendingin dan temperatur kelongsong yang

disampaikan pada Gambar 7. Temperatur masuk pendingin kanal-I ini adalah data input yang sekaligus merupakan temperatur pendingin masuk ke teras reaktor. Oleh karena itu kurva ini temperatur ini (552,4 K) tidak berubah fungsi waktu. Adapun temperatur pendingin keluar perangkat bahan bakar yang dihitung oleh RELAP5 bervariasi untuk masing-masing kanal. Temperatur pendingin keluar kanal (setelah melewati kanal), dipilih untuk ditampilkan dalam kurva ini karena merupakan temperatur terbesar di masing-masing kanal. Hasilnya adalah 613,2 K (kanal-I), 608,0 K (kanal-II), dan 604,2 K (kanal-III). Temperatur ini masih di atas temperatur pendingin rerata keluar teras dari data desain (597.67 K)^[2]. Data desain ini tidak secara langsung dapat dibandingkan karena temperatur pendingin keluar teras merupakan temperatur gabungan dari 264 perangkat bahan bakar di teras reaktor, sementara itu setiap perangkat bahan bakar memiliki faktor daya radial yang berbeda-beda.

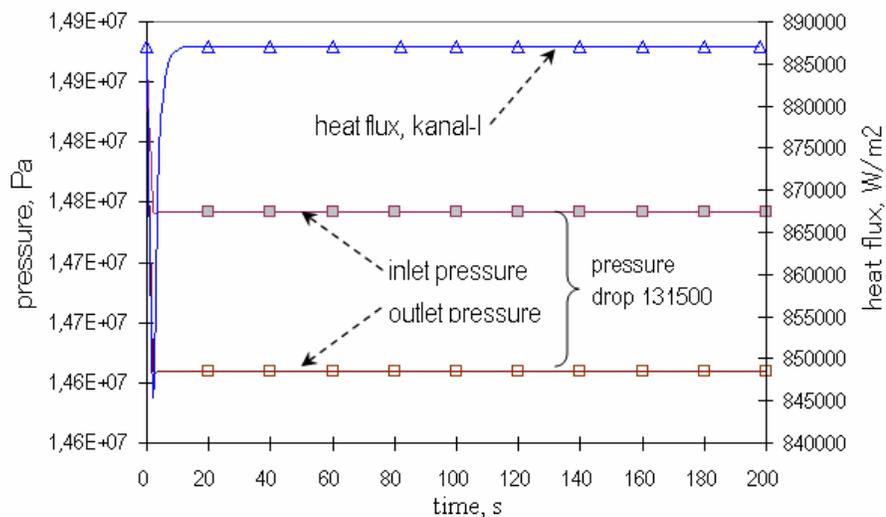
Untuk penelusuran temperatur kelongsong, dalam hal ini dipilih kanal terpanas (kanal-I node no-5) di mana pada lokasi ini faktor daya radial dan aksial adalah maksimum. Kondisi *steady* diperoleh pada temperatur 664,98 K. Meskipun tidak tercantum data referensi pada desain AP1000 namun temperatur kelongsong ini cukup realistis.



Gambar 6. Kurva Pencapaian Steady-state Laju Aliran Pendingin



Gambar 7. Kurva Steady-state Temperatur Keluar Pendingin dan Kelongsong



Gambar 8. Kurva *Steady-state* tekanan Aliran dan Fluks Panas

Gambar 8. menampilkan kurva fluks panas yang terjadi pada lokasi terpanas (kanal-I node no-5) perangkat bahan bakar dari pemodelan sebesar 887120 W/m^2 . Sedangkan berdasarkan data desain dari referensi, fluks panas rerata diteras adalah 628710 W/m^2 . Penurunan tekanan aliran dari hasil model satu perangkat bahan bakar adalah 131500 Pa , meskipun tidak dapat dibandingkan secara langsung namun sebagai referensi penurunan tekanan aliran diteras adalah 271429 Pa .

Hasil analisis verifikasi model termohidrolika perangkat bahan bakar telah diperoleh, di mana data desain referensi dari AP1000 digunakan sebagai pembandingan. Meskipun belum dapat dikatakan telah diperoleh hasil yang sempurna, namun secara kualitatif parameter termohidrolika hasil analisis pemodelan telah menunjukkan kecenderungan hasil yang dapat diterima.

Langkah kedepan, pemodelan ini akan dilakukan pemutakhiran model dengan menambahkan jumlah kanal termasuk penambahan aliran menyilang (*cross flow*) disetiap kanal untuk mendapatkan hasil ketelitian yang secara kuantifikasi lebih memadai. Dengan demikian akan dapat digunakan untuk *review* atau kegiatan analisis desain termohidrolika pada perangkat bahan bakar AP1000.

5. KESIMPULAN

Verifikasi dan pemodelan perangkat bahan bakar reaktor AP1000 telah dikerjakan. Meskipun belum dapat dikatakan telah diperoleh hasil yang sempurna, namun secara kualitatif parameter termohidrolika hasil analisis pemodelan telah menunjukkan kecenderungan hasil yang dapat diterima dalam batas angka yang realistis, yaitu temperatur kelongsong terpanas $664,98 \text{ k}$ dan fluks panas lokal terbesar 887120 w/m^2 . Perolehan *steady-state* dapat dicapai sampai 200 detik.

Selanjutnya pemutakhiran model akan dilakukan kedepan untuk mendapatkan hasil verifikasi yang lebih sempurna. Dengan demikian akan dapat dimanfaatkan untuk simulasi desain konfigurasi termohidrolika pada suatu perangkat bahan bakar reaktor ap1000.

6. 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 Kesejahteraan Peneliti dan Perekayasa (PI-PKPP) Ristek dengan judul “Verifikasi dan Validasi Parameter Desain Termohidrolika Teras PLTN PWR 1000” Tahun 2011.

7. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. <http://www.ap1000.westinghousenuclear.com/>, AP1000 westinghouse 2009.
- [2]. Dokumen desain AP1000, United Kingdom AP-1000, Chapter 4, dan 5.
- [3]. RELAP5 Code Development Team, “RELAP5/MOD3. Code Manual “, User Guide and Input Requirements, NUREG/CR-5535-V2. Idaho National Engineering Laboratory, Washington DC 1995.
- [4]. Dokumen desain AP1000, Chapter.4, reactor Core flow design basis, Rev.14 page 4.4-3.
- [5]. VINCENT J.P. ROUX, “Evaluation Of RELAP5 Reactor Core Modeling Capability”, A Thesis Presented To The Graduate School Of The University Of Florida, The Requirement for the degree Of Master of Science University Of Florida 2001.
- [6]. <http://ocw.mit.edu/courses/nuclear-engineering/22-39-integration-of-reactor-design-operations-and-safety-fall-2006>, “ PWR Steady State Limits”.
- [7]. PATRÍCIA et.al” Sensitivity Analysis of the RELAP5 Nodalization to IPR-R1 TRIGA Research Reactor’, International Conference on Mathematics and Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2011) Rio de Janeiro, RJ, Brazil, May 8-12, 2011.
- [8]. TOMISLAV B, DAVOR G, VELIMIR Š, L ORIANI, LE.CONWAY, Development Of RELAP5 Nodalization For IRIS Non-LOCA Transient Analyses University of Zagreb, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2003).

DISKUSI/TANYA-JAWAB:

1. PERTANYAAN: (Piping Supriatna, PTRKN-BATAN)

- Apakah model sudah divalidasi?

JAWABAN: (Sukmanto Diby, PTRKN-BATAN)

- Model hanya diverifikasi pada asumsi tanpa cross-flow di tiap kanal.