


PENGEMBANGAN MODEL UNTUK SIMULASI KESELAMATAN REAKTOR PWR 1000 MWe GENERASI III⁺ MENGGUNAKAN PROGRAM KOMPUTER

RELAP5

View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk

brought to you by  CORE

provided by Badan Tenaga Nuklir

Hendro Ijanjono,
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN
Email: ace158@centrin.net.id

Diterima editor 11 Desember 2010
Disetujui untuk publikasi 2 Februari 2011

ABSTRAK

PENGEMBANGAN MODEL UNTUK SIMULASI KESELAMATAN REAKTOR PWR 1000 MWe GENERASI III⁺ MENGGUNAKAN PROGRAM KOMPUTER RELAP5. Reaktor daya PWR AP1000 yang didesain oleh *Westinghouse* adalah reaktor Generasi III⁺ pertama yang telah menerima persetujuan desain dari *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC). Saat ini utilitas China telah memulai pembangunan beberapa unit AP1000 di dua tapak terpilih untuk rencana operasi pada 2013-2015. AP1000 sebagai desain PWR berdasarkan teknologi teruji dari desain PWR lainnya yang dibuat oleh *Westinghouse* dengan penguatan pada sistem keselamatan pasif dengan demikian dapat dipertimbangkan untuk dibangun di Indonesia bila mengacu pada persyaratan pada PP 43/2006 mengenai Perijinan Reaktor Nuklir. Namun demikian, desain tersebut perlu diverifikasi oleh *Technical Support Organization* (TSO) independen sebelum dapat dibangun di Indonesia. Verifikasi dapat dilakukan menggunakan paket program RELAP5 dalam bentuk analisis kecelakaan. Selama ini analisis kecelakaan PLTN dilakukan untuk tipe PWR 1000 MWe dari generasi II atau tipe konvensional. Mengingat saat ini referensi yang menggambarkan teknologi AP1000 yang menyertakan teknologi keselamatan pasif sudah tersedia maka dilakukan kegiatan pemodelan yang nantinya dapat digunakan untuk melakukan analisis kecelakaan. Metode pengembangan model mengacu pada pedoman IAEA yang terdiri dari pengumpulan data instalasi, pengembangan *engineering* data dan penyusunan *input deck*, verifikasi dan validasi *data input*. Model yang berhasil dikembangkan secara umum telah mewakili sistem AP1000 secara keseluruhan dan dianggap sebagai model dasar. Model tersebut telah diverifikasi dan divalidasi dengan data desain yang terdapat pada referensi dimana respon parameter termohidraulika menunjukkan perbedaan hasil $\pm 3\%$ selain untuk parameter penurunan tekanan teras yang lebih rendah 13%. Sebagai model dasar, *input deck* yang diperoleh dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan pemodelan sistem keselamatan, sistem proteksi, dan sistem kendali yang spesifik AP1000 untuk keperluan simulasi keselamatan yang lebih rinci.

Kata kunci: pemodelan, Generasi III⁺, RELAP5.

ABSTRACT

MODEL DEVELOPMENT FOR SAFETY SIMULATION OF III⁺ GENERATION PWR 1000 MWe USING RELAP5. *Westinghouse's AP1000 reactor design is the first Generation III⁺ nuclear power reactor to receive final design approval from the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC). Currently, the China's utilities are starting construction several units of AP1000 on two selected sites for scheduled operation in 2013-2015. The AP1000, based on proven technology of Westinghouse-designed PWR with enhancement on the passive safety system, could be considered to be built in Indonesia referring to the requirements of government regulation No. 43/2006 regarding the Nuclear Reactor Licensing. To be accepted by the regulation agency, the design needs to be verified by independent Technical Support Organization (TSO), which can be done using RELAP5 computer code as accident analyses. Currently, NPP safety accident analysis is performed for PWR 1000 MWe of generation II or conventional type. Considering that nowadays references about the technology of AP1000 that includes passive safety technology has been available and assessed, a modeling activity used for future accident analyzes is introduced. Method*

for developing the model refers to IAEA guide consisting of plant data collection, engineering data and input deck development, and verification and validation of input data. The model developed should be considered preliminary but has been generally representing the AP1000 systems as the basic model. The model has been verified and validated by comparing thermalhydraulic parameter responses with design data in references with $\pm 13\%$ deviation except for core pressure drop with 13% lower than design. As a basic model, the input deck is ready for further development by integrating safety system, protection system and control system model specified for AP1000 for purposes of safety simulation in detailed way.

Keywords: Modeling, Generation III⁺, RELAP5.

PENDAHULUAN

Desain reaktor AP1000 dari *Westinghouse Electric Company* adalah reaktor Generasi III⁺ pertama yang menerima persetujuan desain akhir dari *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (NRC). AP1000 adalah PWR dengan dua untai pendingin yang didesain untuk menghasilkan energi listrik 1154 MWe dan didesain berdasarkan kinerja teruji dari desain PWR lain yang dibuat oleh *Westinghouse*. Kelebihannya dari desain konvensional adalah penggunaan sistem keselamatan pasif dan kesederhanaan desain untuk meningkatkan keselamatan dan operasi serta pengurangan biaya konstruksi. Pada tanggal 24 Juli 2007, *Westinghouse Electric Company* dan rekan konsorsiumnya, *Shaw Group*, menandatangani kontrak dengan beberapa utilitas China yaitu *State Nuclear Power Technology Corporation Ltd* (SNPTC), *Sanmen Nuclear Power Company Ltd*, *Shandong Nuclear Power Company Ltd*, dan *China National Technical Import & Export Corporation* (CNTIC) untuk pembangunan empat AP1000 di China. Kontrak tersebut merupakan yang pertama untuk reaktor Generasi III⁺[1]. Pada tahun berikutnya, kontrak tersebut telah berkembang sehingga 6 unit akan dibangun di tapak Sanmen dengan 2 unit pertama dimulai pembangunannya pada Februari 2008 untuk beroperasi pada tahun 2013–2015 dan 6 unit lainnya juga akan dibangun di tapak Haiyang dengan 2 unit pertama akan mulai dibangun pada Juli 2008 untuk rencana operasi tahun 2014–2015[2].

Desain AP1000 yang telah teruji tersebut di atas tentu akan menjadi pertimbangan bila dikaitkan dengan PP No. 43/2006 mengenai Perijinan Reaktor Nuklir dimana salah satu syarat reaktor daya nuklir yang akan dibangun di Indonesia adalah berdasarkan teknologi teruji. Bila PWR Generasi III⁺ ditetapkan sebagai salah satu tipe PWR yang akan dibangun di Indonesia, beberapa kegiatan verifikasi keselamatan harus dilakukan baik oleh badan pengawas yang kemungkinan bekerja sama dengan *Technical Support Organization* (TSO) yang merupakan organisasi independen yang berfungsi untuk melakukan pengkajian terhadap sistem keselamatan PLTN yang akan dibangun di Indonesia. Salah satu obyek kajian adalah verifikasi dokumen Laporan Analisis Keselamatan (LAK) untuk keperluan perizinan di badan pengawas. Pada LAK terdapat beberapa hal yang berkaitan dengan rincian deskripsi desain, sistem keselamatan, dan respon reaktor untuk berbagai jenis kejadian kecelakaan yang dipostulasikan. Evaluasi kejadian kecelakaan dasar desain pada LAK dapat dilakukan antara lain dengan RELAP5 *Computer Code* yang didesain untuk menghitung respon termohidraulik sistem pendingin reaktor secara keseluruhan.

Pemodelan reaktor daya yang selama ini dilakukan di Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor (PTRKN)-BATAN baru sebatas pada reaktor daya Generasi II seperti PWR Standar Jepang dan PWR Standar Korea yang umumnya diperoleh dari pelatihan yang diselenggarakan oleh negara-negara pemilik PLTN. Model-model tersebut telah

dimanfaatkan untuk melakukan verifikasi keselamatan pada kondisi kecelakaan maupun transien dengan menggunakan paket program RELAP5 [3,4].

Melalui situs jejaring resmi [5] yang memuat dokumen referensi PWR Generasi III+ yaitu “AP-1000 European Design Control Document” yang disiapkan oleh Westinghouse Electric Company pada tahun 2009 untuk tujuan sertifikasi desain kepada US-NRC, data desain AP1000 dapat diunduh secara bebas karena merupakan “non-proprietary class 3 document” yang secara keseluruhan terdiri dari 21 Bab. Dengan adanya dokumen tersebut, maka pemodelan PWR Generasi III+ menggunakan program perhitungan termohidraulika RELAP5 dapat dilakukan terutama mengacu pada desain reaktor daya Westinghouse AP1000. Pemodelan AP1000 menggunakan RELAP5 telah dilakukan oleh pihak lain terutama oleh ANSALDO[6] yang juga terlibat dalam pengembangan PWR dengan sistem keselamatan pasif yang merupakan ciri dari PWR Generasi III+. Namun *input deck* yang telah dibuat tidak bisa diakses karena merupakan *proprietary data*. Dengan demikian pemodelan reaktor dalam bentuk penyusunan *input deck* hanya mengacu pada data desain yang terdapat pada dokumen AP1000 di atas tanpa pembandingan dengan *input deck* dalam referensi lain.

Pengembangan model dilakukan melalui tahapan-tahapan seperti yang ditunjukkan dalam pedoman IAEA [7]. Melalui kegiatan pemodelan tersebut diharapkan akan meningkatkan kemampuan sumber daya manusia BATAN dalam bidang verifikasi dan validasi keselamatan nuklir khususnya dalam analisis kecelakaan dan transien pada PLTN khususnya PLTN PWR Generasi III+.

TINJAUAN PUSTAKA

Deskripsi AP-1000 [8]

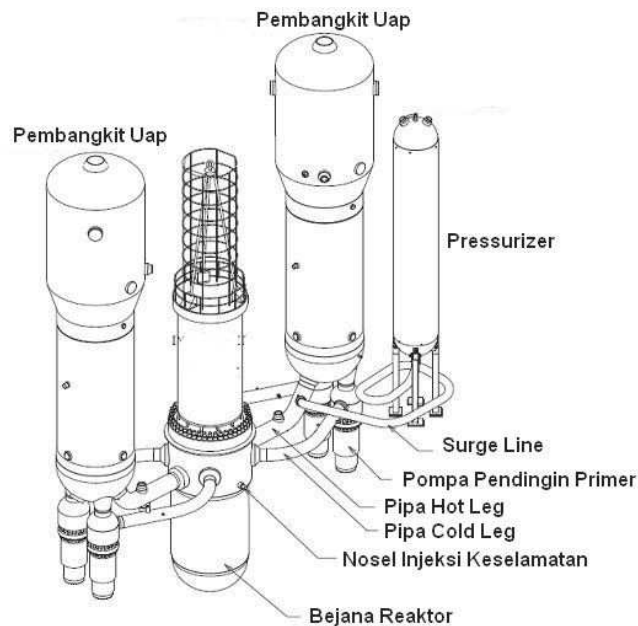
Desain AP1000 termasuk dalam desain PWR Generasi III+ yang memiliki fitur khusus yaitu penggunaan sistem keselamatan pasif untuk meningkatkan keselamatan instalasi dan untuk memenuhi kriteria dan persyaratan keselamatan yang ditetapkan oleh USNRC dalam hal kinerja dan biaya operasi. Tujuan utama pengembangan AP1000 adalah untuk menjaga tujuan desain, rincian desain dan dasar perijinan yang terdapat pada AP600 sebagai dasar pengembangannya dengan mengoptimalkan output daya sehingga mengurangi biaya pembangkitan listrik.

AP1000 dibuat berdasarkan teknologi PWR teruji pada umumnya, tetapi menekankan fitur keselamatan berdasarkan gaya gerak secara alami seperti aliran gravitasi, aliran sirkulasi alami, dan nitrogen bertekanan. Dengan demikian tidak menggunakan komponen aktif seperti pompa, fan, atau generator diesel. Sistem keselamatan pasif AP1000 terdiri dari sistem pendinginan teras pasif (*Passive Core Cooling System/PXS*), sistem isolasi pengungkung (*Containment Isolation System*), sistem pendinginan pengungkung pasif (*Passive Containment Cooling System/PCS*), dan sistem layak-huni darurat ruang kendali utama (*Main Control Room Emergency Habitability System*). Sebagai perbandingan dengan desain sistem keselamatan Generasi II, PXS menggantikan fungsi sistem pendinginan teras darurat (*Emergency Core Cooling System/ECCS*) pada PWR konvensional. PXS bersifat pasif karena sistem-sistem di dalamnya tidak memerlukan suplai daya AC dan aktuasi sistem berlangsung otomatis. Katup-katup penggerak biasanya berfungsi secara fail-safe dan digerakkan melalui baterai, pegas, atau gas terkompresi.

Hal tersebut akan meminimalkan pengendalian sistem keselamatan sehingga akan berdampak pada pengurangan jumlah dan tingkat kerumitan tindakan operator. Kondisi ini juga berdampak terhadap jumlah komponen serta persyaratan perawatan dan surveilans.

Karena AP1000 berdasarkan teknologi PWR yang teruji, maka komponen yang digunakan telah terstandarisasi sehingga mengurangi suku cadang, perawatan serta pelatihan.

Gambar 1 menunjukkan desain AP-1000 yang terdiri dari bejana reaktor, untai pendingin primer dan untai pendingin sekunder. Sistem pendingin AP1000 terdiri 2 untai perpindahan panas dengan masing-masing untai mempunyai satu lengan panas (*hot leg*) dan dua lengan dingin (*cold leg*), pembangkit uap dan 2 pompa yang dipasang secara langsung terhadap pembangkit uap.



Gambar 1. Desain AP-1000 [8]

Deskripsi Relap5[9]

RELAP5 adalah program perhitungan termohidraulika yang dikembangkan untuk menganalisis keseluruhan perilaku termohidraulika sistem pendingin reaktor dan teras secara keseluruhan, interaksi sistem kendali, kinetika reaktor, dan perpindahan gas *non-condensable*. Versi SCDAP/RELAP5 merupakan hasil penggabungan program RELAP5 dan SCDAP. Model di dalam SCDAP (*Severe Core Damage Analysis Package*) menghitung penyebaran kerusakan ke teras reaktor. Model tersebut menghitung peningkatan panas, oksidasi dan pelelehan batang bahan bakar dan batang kendali, pengelembungan dan pecahnya kelongsong batang bahan bakar, pelepasan produk fisi dari batang bahan bakar, dan disintegrasi batang bahan bakar menjadi debris dan bahan leleh.

Program perhitungan SCDAP/RELAP5/Mod3.2 dapat memodelkan banyak komponen secara umum untuk mensimulasikan suatu sistem. Model komponen mencakup batang bahan bakar, batang kendali, pompa, katup, perpipaan, bejana reaktor, simulator batang bahan bakar elektrik, pompa jet, turbin, separator, akumulator, dan komponen sistem kendali. Selain itu, juga termasuk pemodelan proses tertentu seperti form loss, aliran pada

abrupt area change, percabangan, *choked flow*, *boron tracking*, dan perpindahan gas *non-condensable*, termasuk juga pemodelan untuk kinetika reaktor.

RELAP5 memodelkan komponen dan sistem sebagai komponen maupun gabungan komponen hidrodinamika satu dimensi, fluida multifasa dalam bentuk *single volumes*, *time-dependent volumes*, pipa, anulus, percabangan, akumulator, maupun pompa. Setiap model hidrodinamika saling terhubung dengan model junction, baik berupa *time-dependent junction*, *single/multiple-junction*, atau katup. Struktur panas (*heat structure*) terdapat pada komponen pembangkit panas, seperti teras dan heater, maupun pada bagian dimana terjadi perpindahan panas yang dihubungkan dengan komponen hidrodinamika seperti pembangkit uap.

METODOLOGI

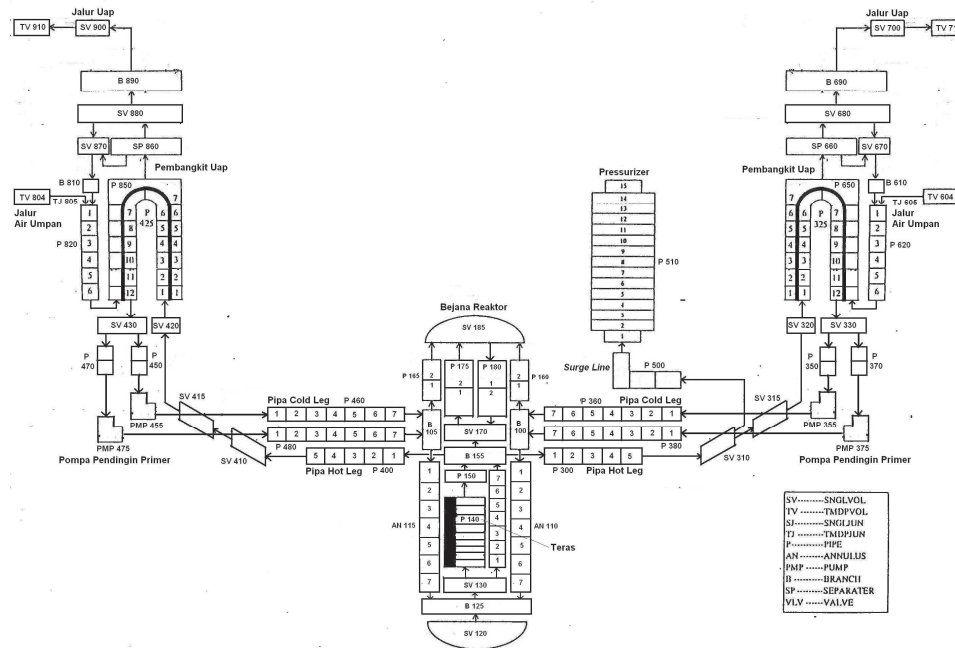
Pedoman IAEA dalam referensi [7] menguraikan tahapan-tahapan kegiatan yang harus dilakukan untuk menyusun *input deck* yang sesuai dengan bahasa pemrograman RELAP5. Pada intinya terdapat 4 kegiatan yang harus dilakukan yaitu:

- Pengumpulan data instalasi
Pada tahap awal data yang harus tersedia adalah data desain dan spesifikasi teknis bejana reaktor beserta struktur internal, desain bahan bakar, desain teras, desain sistem primer dan sistem sekunder. Spesifikasi teknis yang harus diketahui antara lain geometri, parameter termohidraulika seperti tekanan, temperatur, dan laju alir sistem.
- Pengembangan *engineering* data dan penyusunan *input deck*
Pengembangan *engineering* data dilakukan bersamaan dengan penyusunan *code input deck* untuk RELAP5. *Engineering* data meliputi catatan bagaimana data teknis yang terkumpul dikonversi ke dalam bentuk *input deck* melalui perhitungan, asumsi penyederhanaan, dan konversi satuan. Termasuk di dalamnya juga skema nodalisasi yang menggambarkan komponen tunggal maupun sistem reaktor yang ingin dimodelkan. Secara spesifik, data *engineering* untuk komponen hidrodinamika dalam RELAP5 meliputi *flow area*, panjang, volume, *elevation change*, dan diameter hidraulik.
- Verifikasi data input
Input deck yang telah dibuat harus diverifikasi untuk mengetahui ada tidaknya kesalahan yang timbul dari pengembangan data *engineering* sampai penyelesaian data input. Verifikasi meliputi kegiatan mereview dan cek silang dari *input deck* untuk mengonfirmasi tidak adanya kesalahan penulisan.
- Validasi data input
Validasi dilakukan setelah *input deck* selesai diverifikasi dan merupakan persyaratan sebelum *input deck* dapat dijalankan untuk kegunaan analisis keselamatan. Kegunaan validasi adalah untuk menunjukkan bahwa model yang diperoleh telah cukup mewakili fungsi-fungsi dari sistem reaktor yang dimodelkan dan apakah parameter operasi penting sesuai dengan data pembanding. Pada tahapan awal pengembangan model, kegiatan validasi meliputi pemeriksaan kondisi *steady state* operasi normal untuk dibandingkan dengan data operasi instalasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Engineering Untuk Model Hidrodinamika

Komponen hidrodinamika hasil pengembangan data *engineering* untuk AP1000 terdiri dari 17 komponen untuk bejana reaktor, 14 komponen untuk perpipaan sistem primer, 2 komponen untuk sistem *pressurizer*, 4 komponen untuk sistem pompa, dan 14 komponen untuk pembangkit uap sisi primer dan sekunder. Gambar 2 menunjukkan model AP1000 dalam bentuk nodalisasi komponen hidrodinamika di atas.



Gambar 2. Nodalisasi AP1000

Model Bejana Reaktor dan Struktur Internal

Tabel 1 berisi rincian data *engineering* untuk setiap komponen hidrodinamika yang memodelkan sistem bejana reaktor dan struktur internal dalam AP1000. Data *engineering* diperoleh berdasarkan perhitungan dari dimensi komponen utama bejana reaktor, dimensi inlet dan outlet nosel, dimensi *core barrel*, dimensi struktur pendukung teras, dimensi batang kendali, dan dimensi teras. Dimensi teras terutama untuk menghitung luas aliran melalui subkanal bahan bakar menjadi luasan kanal teras rerata (*average core channel*) dan untuk mengetahui panjang teras aktif.

Tabel 1. Data *engineering* untuk bejana reaktor dan struktur internal

Bejana Reaktor dan Struktur Internal	Luas aliran (m ²)	Panjang (Perubahan elevasi), (m)	Diameter hidraulika (m)	Tipe komponen hidrodinamika
Bagian inlet	1,60	1,1496 (-)	0,5398	<i>Branch</i>
<i>Downcomer annulus</i>	1,60	6,0291 (-)	0,5398	<i>Annulus</i>
Tutup bejana bawah	*	1,2469 (+0,7782)	3,7174	<i>Single volume</i>

Plat penyangga aliran bawah	12,81	0,381 (+)	4,0386	Branch
Plat penopang teras bawah	4,1448	0,3810 (+)	**	Single volume
Kanal teras rerata	4,1268	4,2672 (+)	0,0138	Pipe
Kanal <i>bypass</i> melalui <i>core shroud</i>	1,8033	5,5909 (+)	1,5153	Pipe
Aliran <i>bypass</i> di dalam struktur penopang teras atas	3,0135	1,3238 (+)	0,1269	Single volume
Volume bejana ke nosel lengan panas	4,8168	0,3810 (+)	**	Branch
<i>downcomer upper section</i>	1,6	1,0127 (+)	0,5398	Pipe
Penutup bejana atas	*	1,7993 (+1,1522)	**	Single volume
Volume bejana di atas plat penopang atas di luar <i>guide tubes</i>	5,6193	1,3552 (-)	0,3487	Pipe
Volume bejana dari <i>guide tubes</i> atas di atas plat penopang atas	3,2223	1,3552 (+)	**	Pipe
Volume bejana di bawah plat penopang atas dan di atas nosel lengan panas	4,8168	0,4831(+)	**	Single volume

* dihitung oleh RELAP5 berdasarkan input panjang dan volume

** dihitung oleh RELAP5

Model Perpipaan Sistem Primer dan *Pressurizer*

Perpipaan sistem primer terdiri dari dua untai pendingin, dimana setiap untai terdiri dari satu lengan panas tunggal (*hot leg*) dan dua lengan dingin (*cold leg*) untuk mensirkulasikan pendingin reaktor melalui pembangkit uap. Perpipaan *hot leg* terdiri dari nosel dengan panjang 0,635 m, diameter 0,999 m (39,36 inch) dan pipa primer horizontal dengan panjang 4,012 m dan membentuk sudut 45° mengarah ke bagian bawah pembangkit uap dengan panjang 1,355 m. Perpipaan *cold leg* terdiri dari pipa vertikal ke bawah dari pembangkit uap dengan panjang 1,262 m menuju ke pompa primer dan mengarah horizontal ke nosel inlet bejana reaktor dengan panjang pipa 7,974 m, diameter 0,558 m (22 inch) dan panjang nosel inlet 1,170 m, diameter 1,149 m (45,26 inch).

Geometri perpipaan *surge line* menuju *pressurizer* diperoleh dengan mengukur panjang *surge line*, sudut kemiringannya, dan elevasinya dan mengkonversinya berdasarkan skala. Hasil konversi menghasilkan perkiraan panjang *surge line* adalah 26,996 m dengan elevasi 3,423 m diukur dari ujung *surge line* di pipa primer ke nosel bagian bawah *pressurizer*. Skema nodalisasi untuk *surge line* terdiri dari satu komponen hidrodinamika yang dibagi menjadi beberapa segmen dengan kemiringan bervariasi. Skema nodalisasi untuk *pressurizer* terdiri dari satu komponen hidrodinamika dengan tipe *pipe*. Dari basis data yang ada diketahui tinggi keseluruhan *pressurizer* adalah 12,78 m, diameter dalam 2,54 m, volume keseluruhan 59,465 m³ dengan volume air 28,317 m³. Tabel 2 menunjukkan data hidrodinamika untuk perpipaan sistem primer, *surge line*, dan *pressurizer*.

Tabel 2. Data *engineering* untuk perpipaan sistem primer dan *pressurizer*

Perpipaan Sistem Primer dan <i>Pressurizer</i>	<i>Flow area</i> (m ²)	Panjang (Perubahan elevasi), (m)	Diameter hidraulika (m)	Tipe komponen hidrodinamika
Lengan panas sampai belokan	0,4869	5,6505	0,7874	<i>Pipe</i>
Lengan panas sampai ke surge line dan plenum pembangkit uap	0,4869	2,7114 (+1,9174)	0,7874	<i>Single volume</i>
Lengan dingin vertikal dari plenum pembangkit uap	0,3425	0,6315 (-)	0,5588	<i>Pipe</i>
Lengan dingin horizontal sampai nosel inlet reaktor	0,2452	9,1455	0,5588	<i>Pipe</i>
<i>Pressurizer surge line</i>	0,1642	26,9919 (+3,423)	0,5588	<i>Pipe</i>
<i>Pressurizer</i>	5,0671	10,2157	2,5400	<i>Pipe</i>

Model Sistem Pembangkit Uap

Data *engineering* untuk pemodelan sistem pembangkit uap diperoleh berdasarkan basis data mengenai dimensi pembangkit uap, ruang pendidih, separator, penampung uap dan penyuplai air umpan. Perhitungan data *engineering* diperoleh dari data tinggi keseluruhan pembangkit uap, diameter dalam cangkang atas dan cangkang bawah, volume air sisi primer, volume air sisi sekunder, luas permukaan perpindahan panas, data teknis lain terkait *tube* pembangkit uap, data sistem air umpan, jalur uap, dan *steam boundary volume*.

Tabel 3. Data *engineering* untuk sistem pembangkit uap

Sistem pembangkit uap	<i>Flow area</i> (m ²)	Panjang (Perubahan elevasi) (m)	Diameter hidraulika (m)	Tipe komponen hidrodinamika
<i>Inlet plenum</i>	3,7721	2,207 (+)	2,1921	<i>Single volume</i>
<i>U-tube</i>	1,8916	20,8332 (+10,1624)	0,0155	<i>Pipe</i>
<i>Outlet plenum</i>	3,7721	2,4199 (-)	2,1921	<i>Single volume</i>
Sisi sekunder	7,4885	11,7625 (+)	0,0543	<i>Pipe</i>
<i>Separator</i>	17,2544	2,8566 (+)	4,572	<i>Separator</i>
<i>Downcomer</i> atas	2,0592	2,8566 (-)	0,19	<i>Single volume</i>
<i>Downcomer ring</i>	1,2883	1,3459 (-)	0,19	<i>Branch</i>
<i>Downcomer</i> bawah	1,2883	10,4166 (-)	0,19	<i>Pipe</i>
Bagian atas	17,2544	2,8566 (+)	4,572	<i>Single volume</i>
Kubah uap	17,2544	2,8566 (+)	4,572	<i>Branch</i>
Pompa air umpan	0,0683	-	-	<i>Time-dependent junction</i>
Sumber air umpan	92,903	0,3048	15,24	<i>Time-dependent volume</i>
Jalur uap	0,4115	2,0	0,724	<i>Single volume</i>
<i>Steam boundary volume</i>	92,903	0,3048	15,24	<i>Time-dependent volume</i>

Model Pompa Sirkulasi Utama

Untuk pemodelan pompa sirkulasi utama, tidak ada data mengenai *head pompa* dan kurva torsi dari pompa yang digunakan AP1000. Sebagai gantinya, digunakan karakteristik pompa Westinghouse yang terintegrasi dalam RELAP5. Parameter terkait operasi pompa diambil dari basis data dan dimasukkan sebagai data input pompa seperti terlihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Karakteristika pompa utama dan nilai desain

Parameter	Nilai desain	Data input RELAP5
Kecepatan pompa	1800 rpm	188.4 rad/detik
Laju alir desain	17886.07 m ³ /hr	4.968 m ³ /detik
<i>Developed head</i>	365 feet	111.25 m
Torsi	-	33043 Nm
Momen inersia	-	3110 kg m ²
Densitas	-	747.65 kg/ m ³
Diameter dalam nosel discharge / suction	22/26 inches	<i>Juntion area discharge/ suction</i> : 0.3425/0.2452 m ²
Tekanan desain unit (psia)	2500 (17,237 abs MPa)	-

Model Heat-Structure di Teras dan Pembangkit Uap

Heat-structure diperlukan untuk memodelkan pembangkitan panas oleh perangkat bahan bakar (*fuel assembly*) ke kanal pendingin di dalam teras. Pada tahapan ini pemodelan dibatasi pada kanal pendingin rerata dimana sumber panas diasumsikan berasal dari rerata keseluruhan panas yang dibangkitkan dari batang bahan bakar di dalam teras. Secara aksial, *heat-structure* dibagi menjadi 9 bagian sesuai dengan pembagian kanal rerata. Secara radial, satu batang bahan bakar dibagi menjadi 12 segmen yang memodelkan geometri pelet bahan bakar, gap, dan kelongsong. Luasan permukaan bahan bakar keseluruhan dihitung dari tinggi bahan bakar (teras) aktif dikalikan jumlah batang bahan bakar di dalam teras. Sebagai sumber daya diambil dari perhitungan kinetika reaktor yang dimasukkan sebagai input daya atau dari tabel daya. Setiap pembagian aksial dari *core heat-structure* juga memiliki faktor daya aksial sebagai *internal source multiplier* yang nilainya diambil dari kurva distribusi daya aksial pada basis data. Tabel 5 menampilkan input data *heat-structure* di dalam teras.

Tabel 5. Data masukan *heat-structure* di dalam teras

Pembagian aksial	9		
Pembagian radial	13		
Radius pelet, gap, dan kelongsong (m)	0,00409	0,00827	0,01302
Panjang per segmen aksial (m)	0,47413		
Luas permukaan bahan bakar per segmen aksial (m ²)	19651,87		
Faktor daya aksial	Sesuai kurva distribusi daya aksial		
Diameter hidraulika pertukaran panas (m)	0,0138 m		

Heat-structure lain juga terdapat pada pembangkit uap yaitu untuk memodelkan tube penukar panas. Tube pembangkit uap berbentuk U dibagi menjadi 12 segmen axial dan 4 segmen radial serta masukan data diameter dalam dan luar dari tube penukar panas. Tabel 6 berisi input data *heat-structure* untuk memodelkan tube penukar panas.

Tabel 6. Data masukan *heat-structure* tube pembangkit uap

Pembagian aksial	12	
Pembagian radial	4	
Radius dalam, luar <i>tube</i> (m)	0,00775	0,00875
Panjang per segmen aksial (m)	1,7361	
Luas permukaan bahan bakar per segmen aksial (m ²)	17405,308	
Diameter hidraulika pertukaran panas sisi primer, sekunder (m)	0,0154	0,0543

Verifikasi dan Validasi Model

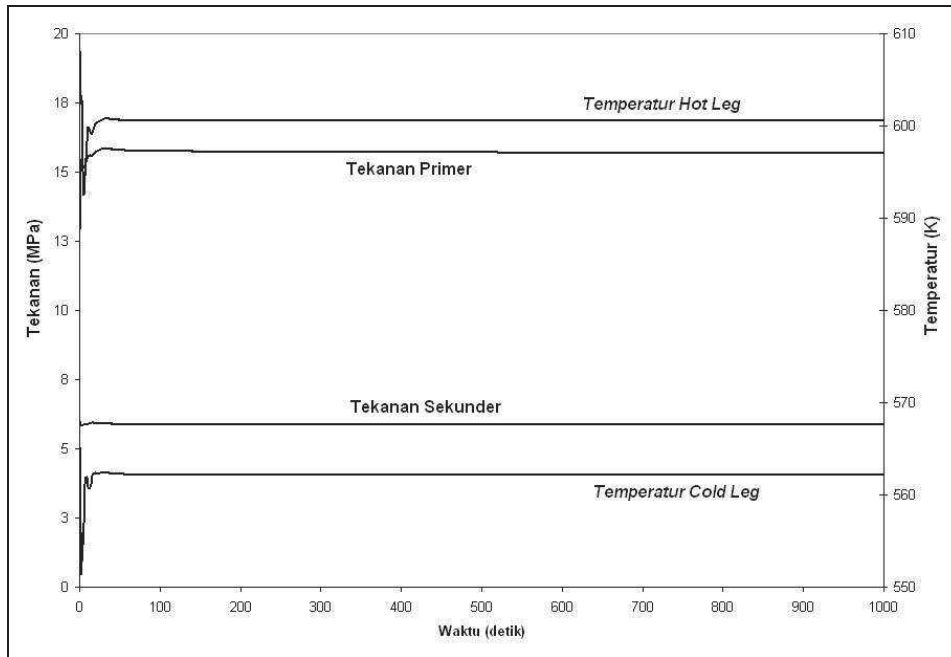
Verifikasi dan validasi model dilakukan dengan menjalankan program RELAP5 pada kondisi tunak selama 1000 detik perhitungan. Verifikasi dilakukan untuk mengetahui ada tidaknya kesalahan dalam penulisan *input deck* dan tidak dibahas secara rinci dalam makalah ini karena lebih merupakan proses *trial and error*. Kondisi awal (*initial condition*) sebagai penentu perubahan parameter termohidraulika sistem reaktor adalah daya teras, tekanan primer, laju alir air umpan, dan tekanan uap pada kondisi operasi normal, daya penuh. Input daya teras sesuai desain adalah 3400 MW, tekanan primer di ruang udara *pressurizer* 15,41 MPa, laju alir air umpan pada satu pembangkit uap 943,75 kg/detik, dan tekanan uap sebesar 5,76 MPa. Tabel 6 di bawah ini berisi hasil perhitungan RELAP5 untuk beberapa parameter operasi dan termohidraulika reaktor dan nilai pembandingnya sesuai data desain AP1000.

Tabel 6. Hasil perhitungan RELAP5 kondisi tunak, daya penuh dan daya lebih

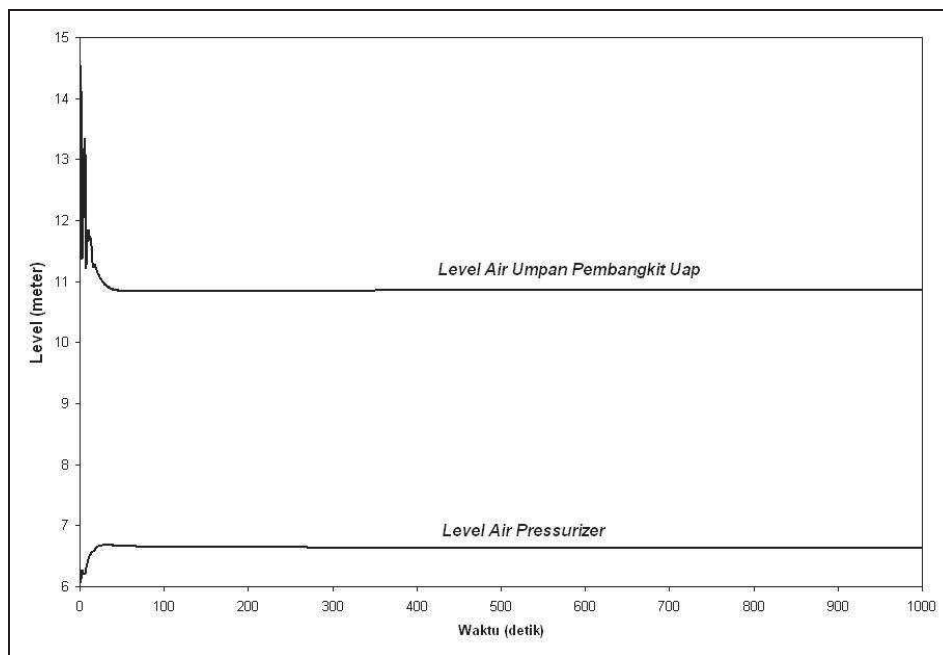
Parameter sistem reaktor	Output RELAP5	Data desain [10]
Teras		
Daya teras (MWt)	3400,00	3400,00
Tekanan inlet/outlet teras (Pa)	1,601E+07 / 1,577E+07	ΔP : 0,275±0.028 MPa
Temperatur inlet/outlet teras (°C)	289,21 / 329,32	280,67 / 323,33
Sistem Primer		
Tekanan PRZ (ruang udara) (Pa)	1,570E+07	1,545E+07
Tekanan lengan dingin (Pa)	1,596E+07	1,592E+07
Level PRZ (m)	6,6363	6,39
Tekanan lengan panas (Pa)	1,571E+07	1,549E+07
Laju alir lengan dingin (kg/detik)	3848,0 (rho=748,84 kg/ m ³) (18499,01 m ³ /jam)	17886,07 m ³ /jam
Laju alir lengan panas (kg/detik)	7696,10 (rho=658,13 kg/m ³) (42098.00 m ³ /jam)	40347,57 m ³ /jam
Daya NSSS (MWt)	3413,63	3415,0
Pompa Primer		
Temperatur <i>suction</i> (K)	561,786	Q pompa = 15 MW
Temperatur <i>discharge</i> (K)	562,143	
Steam Generator		
Laju alir uap (kg/detik)	943,91	943,72
Level air pembangkit uap (m)	10,851	-
Tekanan uap (Pa)	5,890E+06	5,764E+06
Daya per unit (MWt)	1706,8	1707,5

Dari hasil output terlihat bahwa sebagian besar parameter termohidraulika yang dibandingkan sesuai dengan data desain. Pada sisi teras, perbedaan tekanan antara inlet dan

outlet teras sebesar 0,239 Mpa atau bila dibanding dengan data desain 0,275 MPa berarti lebih rendah 13 %. Meskipun demikian hasil yang lebih baik terlihat pada hasil perhitungan temperatur inlet dan outlet teras dengan perbedaan ± 3 %. Dari daya termal teras 3400 MW akan dihasilkan daya termal untuk dibuang ke sistem sekunder sebesar 3413,63 MW. Tambahan daya 13,63 MW diperoleh dari panas yang dihasilkan dari 4 pompa primer seperti terlihat pada kenaikan temperatur fluida antara inlet pompa dan outlet pompa, yang berarti hampir sama dengan data desain yaitu 15 MWt. Laju alir lengan panas dan lengan dingin bila dikonversikan ke satuan debit sedikit lebih besar dari data desain karena perbedaan massa jenis fluida pada temperatur dan tekanan sistem terkait. Selain itu model hidrodinamika lengan panas dan dingin masih tanpa masukan *form loss coefficient*. Hal tersebut juga berpengaruh pada perhitungan tekanan primer di lengan dingin dan lengan panas yang sedikit lebih besar dari tekanan desain. Perbedaan tekanan sistem primer antara inlet dan outlet bejana reaktor terhitung sebesar 0,256 MPa yang berarti lebih kecil dari data desain sebesar 0,430 MPa. Tekanan sistem primer yang diukur pada ruang udara *pressurizer* juga terlihat sama dengan data desain pada kisaran 15,5 MPa. Pada *input data deck*, nilai tekanan awal harus dimasukkan lebih kecil dari tekanan desain yaitu 13,9 MPa. Pada proses pemasukan energi dari daya termal teras, tekanan sistem primer naik secara *gradual* dan mencapai kesetimbangan pada tekanan desain di atas. Pada sistem pembangkit uap dari daya termal yang terbangkitkan sebesar 3413,6326 MW, perhitungan RELAP5 juga menghasilkan perhitungan daya pada dinding luar tube pemanas yang tersedia untuk memanaskan sistem sekunder sebesar 3413,6324 MW. Daya tersebut terlihat memadai untuk memanaskan dan menguapkan air umpan di dalam pembangkit uap. Pada laju alir air umpan sesuai desain yaitu 943 kg/detik dihasilkan uap pada laju alir yang sama pada kapasitas air umpan yang tetap. Kapasitas air umpan yang tetap dapat dilihat dari level air umpan pada pembangkit uap yang juga tetap yaitu pada kisaran 10 m. Gambar 3 menampilkan grafik tekanan primer dan tekanan uap di pembangkit uap serta temperatur lengan dingin dan panas pada daya termal teras nominal 3400 MW, sementara Gambar 4 menampilkan grafik level air *pressurizer* dan level air umpan di pembangkit uap. Level *pressurizer* terlihat identik dengan nilai data desain. Data desain untuk level air umpan pada kondisi operasi tidak disebutkan nilai nominalnya, namun bila dihitung dari tinggi komponen hidrodinamika yang memodelkan ruang penampung air umpan di dalam pembangkit uap dengan asumsi keseluruhan komponen hidrodinamika berisi air, maka diperoleh tinggi air umpan maksimal sebesar 11,763 m. Bila dilihat dari tinggi *U-tube* pemanas sebesar 10,1628 m, maka hasil output level air umpan sebesar 10,851 m di atas telah memenuhi persyaratan desain karena *U-tube* telah terendam pendingin sekunder.



Gambar 3. Grafik parameter termohidraulika tekanan dan temperatur sistem primer dan sekunder pada daya teras 3400 MWt



Gambar 4. Grafik parameter termohidraulika level *pressurizer* dan level pembangkit uap pada daya teras 3400 MWt

KESIMPULAN DAN SARAN

Model yang diperoleh pada penelitian ini secara umum telah mewakili sistem suplai uap berbasis tenaga nuklir (*Nuclear Steam Supply System/NSSS*) dari PWR AP1000 secara keseluruhan yaitu bejana reaktor dan terasnya, untai pendingin primer dan *pressurizer*, dan untai pendingin sekunder dan pembangkit uap dan dianggap sebagai model dasar. Model tersebut telah diverifikasi dan divalidasi dengan data desain yang terdapat pada referensi dimana respon parameter termohidraulika menunjukkan deviasi $\pm 3\%$ kecuali pada parameter penurunan tekanan teras yang lebih rendah 13%. Sebagai model dasar, *input deck* yang diperoleh dapat dikembangkan lebih lanjut dengan mengintegrasikan pemodelan sistem keselamatan, sistem proteksi, dan sistem kendali yang spesifik AP1000 untuk keperluan simulasi keselamatan yang lebih rinci.

DAFTAR PUSTAKA

1. Chinese sign up for four AP1000s. Modern Power System, September 2007. Available from: URL <http://www.westinghousenuclear.com/docs/ContractChina.pdf>. Accessed: 2010.
2. The AP1000 features proven technology, innovative passive safety systems. Available from: URL: <https://www.ukap1000application.com/>. Accessed: January 2010.
3. Andi Sofrany, Surip Widodo. Analisis kejadian steam generator tube rupture (SGTR) berdasarkan skenario Mihama Unit 2. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir-Tri Dasa Mega. 2010; 12:1-14.
4. Andi Sofrany. Analisis pemulihan sistem reaktor setelah kejadian transien *station blackout* pada PWR. Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Surabaya; 28 Juli 2010.
5. Westinghouse. AP100. Available from: URL: <http://www.ukap1000application.com/>. Accessed: February 01, 2010.
6. A. Lo Nigro. AP1000 RELAP5 Mod. 3.2.2 Input Deck. ANSALDO Nucleare, EPG-GG-GSC-060, Rev. 0; 2001
7. Safety Report Series No. 23. Accident analysis for nuclear power plants. International Atomic Energy Agency, Vienna; 2002
8. Westinghouse Electric Co. The Westinghouse AP1000 advanced nuclear power plant: Plant Description; 2003
9. The SCDAP/RELAP5 Development Team. SCDAP/RELAP5/MOD3.2 Code Manual, NUREG/CR-6150, INEL-96/0422, Revision 1, Volume 1; 1997
10. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document. EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009