

VERIFIKASI KECELAKAAN HILANGNYA ALIRAN AIR UMPAN PADA REAKTOR DAYA PWR MAJU

Andi Sofrany Ekariansyah, Surip Widodo, Susyadi, D.T. Sony Tjahyani, Hendro Tjahjono
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir, BATAN
Email: andi_se@batan.go.id

Diterima editor 12 Maret 2012
Disetujui untuk publikasi 02 Mei 2012

ABSTRAK

VERIFIKASI KECELAKAAN HILANGNYA ALIRAN AIR UMPAN PADA REAKTOR DAYA PWR MAJU. AP1000 adalah reaktor daya PWR maju dengan daya listrik 1154 MW yang didesain berdasarkan kinerja teruji dari desain PWR lain oleh *Westinghouse*. Untuk mempersiapkan peran Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir sebagai suatu *Technical Support Organization* (TSO) dalam hal verifikasi keselamatan, telah dilakukan kegiatan verifikasi keselamatan untuk AP1000 yang dimulai dengan verifikasi kecelakaan kegagalan pendingin sekunder. Kegiatan dimulai dengan pemodelan fitur keselamatan teknis yaitu sistem pendinginan teras pasif yang terdiri dari sistem *Passive Residual Heat Removal* (PRHR), tangki *core makeup tank* (CMT), dan tangki *In-containment Refueling Water Storage Tank* (IRWST). Kecelakaan kegagalan pendingin sekunder yang dipilih adalah hilangnya aliran air umpan ke salah satu pembangkit uap yang disimulasikan menggunakan program perhitungan RELAP5/SCDAP/Mod3.4. Tujuan analisis adalah untuk memperoleh sekuensi perubahan parameter termohidraulika reaktor akibat kecelakaan dimana hasil analisis yang diperoleh divalidasi dan dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan program perhitungan LOFTRAN di dalam dokumen desain keselamatan AP1000. Hasil verifikasi menunjukkan bahwa kejadian hilangnya suplai air umpan tidak berdampak pada kerusakan teras, sistem pendingin reaktor, maupun sistem sekunder. Penukar kalor PRHR telah terverifikasi kemampuannya dalam membuang kalor peluruhan teras setelah trip reaktor. Hasil validasi dengan dokumen perbandingan menunjukkan kesesuaian pada sebagian besar parameter termohidraulika. Secara umum, model PWR maju yang dilengkapi dengan sistem pendinginan teras ciri pasif yang telah dikembangkan tetap selamat ketika terjadi kecelakaan kehilangan aliran pendingin sekunder.

Kata kunci: Verifikasi, hilangnya aliran air umpan, AP1000

ABSTRACT

VERIFICATION ON LOSS OF MAIN FEEDWATER FLOW ACCIDENT OF ADVANCED PWR. AP1000 is a PWR power reactor with 1154 MW of electrical power that is designed based on the proven performance of the other *Westinghouse* PWR designs. To prepare the role of Center for Reactor Technology and Nuclear Safety as a *Technical Support Organization* (TSO) in terms of reactor safety verification, the verification activities have been carried out for the AP1000 that begins with failure of secondary coolant accident verification. The activity started with the technical safety features modeling such as passive core cooling system consisting of a *Passive Residual Heat Removal* system (PRHR), *Core Makeup Tank* (CMT), and *In-containment Refueling Water Storage Tank* (IRWST). The failure of secondary coolant accident selected is the loss of main feedwater flow to one of the steam generator simulated using the calculation program RELAP5/SCDAP/Mod3.4. The objective of analysis is to obtain sequences of changes in the thermalhydraulic parameters in the reactor due to the selected event. Analysis results obtained are validated and compared with the analysis results using the calculation program LOFTRAN in the AP1000 safety design document. The verification results show that the loss of feed-water supply has no impact on core damage, the reactor coolant system, as well as secondary systems. The ability of heat exchanger PRHR has been verified to dissipate decay heat of the core after reactor trip. Validation with the AP1000 safety design document shows compliance on most thermal hydraulic parameters. In general, the advanced PWR model equipped with passive core cooling system that has been developed remains safe in the event of loss of secondary coolant flow accident.

Keywords: Verification, loss of feed water flow, AP1000

PENDAHULUAN

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) adalah tipe PLTN yang paling banyak dibangun saat ini. Dari total 435 PLTN di dunia, 270 di antaranya (61 %) adalah tipe PWR (data aktual tanggal 02 Februari 2012) dengan kontribusi output daya listrik sekitar 67 % [1]. Seluruh tipe PWR yang beroperasi saat ini adalah dari Generasi II yang dibangun hingga akhir tahun 1990 an. Pengembangan dari Generasi II adalah Generasi III yang menitikberatkan perbaikan pada teknologi bahan bakar, efisiensi termal, penggunaan sistem keselamatan pasif dan desain terstandarisasi.

Saat ini terdapat hanya satu tipe PWR Generasi III yaitu *Advanced PWR* (APWR) yang dikembangkan oleh Mitsubishi Heavy Industries dan direncanakan akan dibangun di tapak Tsuruga, Jepang. Pengembangan PWR Generasi III adalah Generasi III+ dengan perbaikan pada aspek keselamatan dan keekonomian dimana saat ini terdapat lima tipe PWR Generasi III+ yaitu AP1000, *European Pressurized Reactor* (EPR), APR-1400, US-APWR, dan VVER-1200. AP1000 dari *Westinghouse Electric Company* yang telah menerima persetujuan desain akhir dari US-NRC [2] dan telah memperoleh kontrak pembangunan di Cina untuk konstruksi 12 unit hingga tahun 2015 [3, 4]. APR-1400 dari Korea juga telah memperoleh kontrak pembangunan di Uni Emirat Arab sebanyak 4 unit.

AP1000 adalah PWR dengan dua untai pendingin yang didesain untuk menghasilkan energi listrik 1154 MWe dan didesain berdasarkan kinerja teruji dari PWR lain yang dibuat oleh *Westinghouse*. Desain AP1000 berdasarkan kinerja teruji dan dalam proses konstruksi 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. Untuk menguji tingkat keselamatan desain AP1000 terutama untuk mendukung fungsi *Technical Support Organization* (TSO) dalam hal verifikasi keselamatan, sejak tahun 2010 ini telah dilakukan tahapan kegiatan verifikasi di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN yang dimulai pengembangan model AP1000 dengan tujuan untuk verifikasi parameter termohidraulika pada kondisi tunak [5]. Model tersebut merupakan model termohidraulika yang dikembangkan menggunakan perangkat lunak RELAP5/SCDAP/Mod3.4. Kegiatan selanjutnya adalah modifikasi model tersebut dengan pemodelan beberapa sistem keselamatan pasif untuk dapat digunakan dalam simulasi kecelakaan kegagalan pendingin [6].

Makalah ini disusun berdasarkan kegiatan yang dilakukan pada referensi [6] dengan fokus pada pemodelan sistem keselamatan pasif dan kegiatan analisis kecelakaan yaitu kecelakaan hilangnya aliran air umpan pendingin sekunder pada reaktor daya maju AP1000. Kejadian hilangnya aliran air umpan ke salah satu pembangkit uap pada AP1000 adalah salah satu dari dua kejadian yang termasuk dalam kategori kegagalan pendingin yang menyebabkan penurunan pembuangan panas oleh sistem sekunder. Kejadian lainnya adalah patahnya pipa suplai air umpan yang menyuplai dua pembangkit uap. Simulasi dan analisis yang berhubungan dengan pemodelan reaktor AP1000 dan sistem keselamatan pasifnya telah dilakukan oleh pihak lain namun pada kejadian berbeda yaitu kecelakaan hilangnya pendingin ukuran kecil (*small break* LOCA) seperti terlihat pada referensi [7]. Pada referensi tersebut, hasil simulasi yang diperoleh dari program perhitungan RELAP5 dibandingkan dengan hasil simulasi dari program perhitungan NOTRUMP.

Tujuan analisis adalah untuk memperoleh sekuensi perubahan parameter termohidraulika reaktor akibat kecelakaan dan perbandingan hasil dengan dokumen pembanding, terutama pada bagian analisis kecelakaan [8]. Untuk memperoleh sekuensi yang diharapkan, diperlukan penambahan pemodelan sistem keselamatan pasif pada model reaktor AP1000 yang sudah ada yang terdiri dari sistem pembuangan kalor peluruhan pasif (*Passive Residual Heat Removal System*/PRHR) dan sistem injeksi pendingin berupa injeksi dari tangki *makeup* teras (*Core Makeup Tank*/CMT) sebagai bagian dari fitur keselamatan teknis. Pemodelan dan simulasi kecelakaan dilakukan dengan paket program

termohidraulika yang sama dengan kegiatan sebelumnya yaitu RELAP5/SCDAP/Mod3.4 untuk dibandingkan dengan hasil simulasi dalam dokumen pembandingan menggunakan program perhitungan LOFTRAN. Kejadian hilangnya aliran air umpan dimodelkan dengan kondisi yang sama dengan analisis keselamatan dalam dokumen pembandingan yaitu terjadi pada salah satu untai pendingin sekunder. Selain itu sekuensi aktuasi sistem proteksi dan sistem keselamatan disesuaikan dengan sekuensi kejadian dalam dokumen pembandingan dimana nilai *setpoint* dan waktu tunda mengacu pada spesifikasi teknis yang tersedia. Diharapkan dengan penyamaan kondisi awal dan kondisi pemodelan di atas dapat diperoleh hasil simulasi dan hasil analisis yang mendekati dengan hasil analisis dalam dokumen pembandingan.

TEORI

Karakteristika Termohidraulika AP1000

Teras reaktor AP1000 menghasilkan daya termal 3400 MW, ditambah daya kerja yang dihasilkan dari pengoperasian empat pompa pendingin utama sebesar 15 MW. Keseluruhan daya tersebut digunakan untuk menaikkan temperatur pendingin teras di dalam bejana reaktor dari temperatur nominal (T_{in}) 279 °C ke temperatur outlet teras (T_{out}) 324 °C pada tekanan sistem nominal sebesar 15,513 MPa yang dikendalikan oleh satu pressurizer. Energi kalor yang terdapat dalam pendingin reaktor dengan volume total 271,8 m³ disirkulasikan melalui dua lengan panas (*hot leg*) dengan debit aliran nominal masing-masing sebesar 40347,57 m³/jam menuju ke dua pembangkit uap. Di dalam pembangkit uap, energi kalor tersebut digunakan seluruhnya untuk mengubah fase air pendingin sekunder menjadi fase uap sehingga temperatur pendingin primer turun ke nilai T_{cold} awal dan disirkulasikan oleh empat pompa pendingin utama melalui empat lengan dingin (*cold leg*) dengan debit aliran nominal masing-masing sebesar 17886 m³/jam kembali ke bejana reaktor. Di sisi sekunder dari setiap pembangkit uap, daya termal sebesar 1707,5 MW digunakan untuk mengubah fase pendingin sekunder dari fase cair pada temperatur nominal 226,67 °C ke fase uap dengan temperatur sama pada tekanan keluaran sebesar 5,76 MPa dan laju alir uap sebesar 3397,4 ton/jam untuk dialirkan ke turbin.

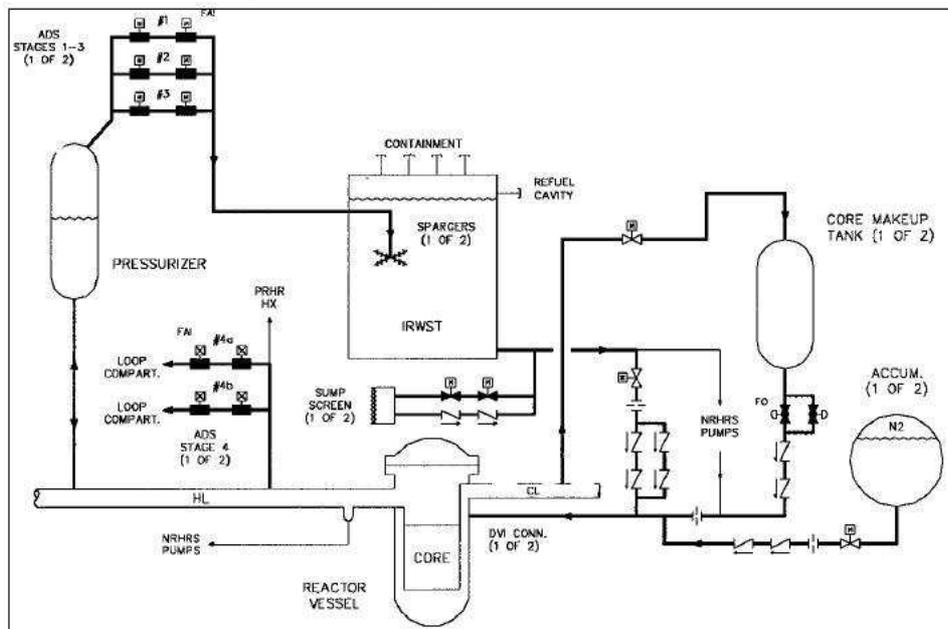
Berdasarkan karakteristik pada kondisi normal di atas, penurunan atau kehilangan kapasitas pendingin sekunder akan mempengaruhi kondisi sistem pendingin primer, dimana energi kalor yang tersedia pada sistem primer tidak dapat dibuang secara memadai. Pada kondisi teras reaktor terus membangkitkan kalor melalui proses fisi nuklir, kalor terbangkitkan tersebut akan semakin menghabiskan inventori pendingin sistem sekunder yang dapat dilihat antara lain dari penurunan level air sekunder pembangkit uap akibat produksi uap secara berkelanjutan ke turbin. Dari sisi teras reaktor, peningkatan pembangkitan kalor yang tidak terbuang secara memadai akan mempengaruhi perpindahan kalor dari bahan bakar ke pendingin, yang pada akhirnya meningkatkan temperatur bahan bakar. Batasan keselamatan yang harus diperhatikan adalah *Departure from Nucleate Boiling* (DNB) tidak boleh terjadi selama kondisi operasi normal maupun kondisi transien sehingga perpindahan kalor dari kelongsong bahan bakar ke pendingin reaktor harus tetap terjaga. Pada AP1000, Rasio DNB (DNBR) yang didefinisikan sebagai perbandingan antara fluks kalor DNB dengan fluks kalor aktual, nilai minimumnya pada kondisi nominal operasi dibatasi sebesar 2,8 sementara pada kondisi transien adalah 1,25. Batasan keselamatan lainnya adalah temperatur bahan bakar, dimana pada AP1000 temperatur leleh bahan uranium dioksida sebesar 2804 °C tidak boleh terlampaui pada kondisi normal maupun transien [9].

Karakteristika Sistem Pendinginan Teras Pasif AP1000

Untuk melindungi masyarakat dari kejadian pelepasan produk fisi radioaktif dari sistem pendingin reaktor, AP1000 dilengkapi dengan fitur keselamatan teknis (*Engineered Safety Features* /

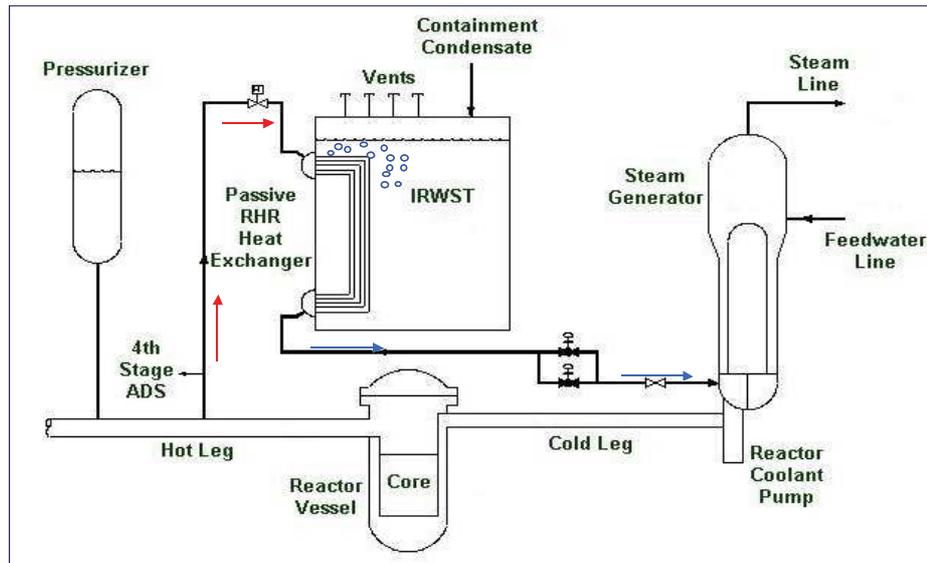
ESF) yang berfungsi untuk melokalisasi, mengendalikan, memitigasi, dan mematikan kejadian kecelakaan dan untuk menjaga tingkat paparan radiasi ke masyarakat tetap di bawah batasan dan panduan yang berlaku, seperti 10 CFR 50.34. Salah satu bagian dari ESF pada AP1000 adalah sistem pendinginan teras pasif (*Passive core cooling system/PXS*) yang berfungsi sebagai pendinginan teras darurat setelah kejadian dasar desain terpostulasi [10]. Pendinginan teras darurat dicapai dalam bentuk *makeup* dan borasi, injeksi keselamatan ke sistem pendingin reaktor, dan pembuangan kalor peluruhan teras saat kejadian transien atau kecelakaan [11].

Pada kejadian kecelakaan kehilangan pendingin sekunder, fungsi PXS yang diharapkan berperan adalah fungsi injeksi keselamatan dan fungsi pembuangan kalor peluruhan teras. Sebagai fungsi injeksi keselamatan, PXS menggunakan tiga sumber air untuk menjaga pendinginan teras yang terdiri dari dua tangki *makeup* teras (*Core makeup tanks/CMTs*), dua akumulator, dan satu tangki penampung air pengisian bahan bakar di dalam pengungkung (*In-containment refueling water storage tank/IRWST*). Sumber-sumber injeksi tersebut langsung terhubung ke dua nosel di bejana reaktor. Air injeksi untuk jangka panjang diperoleh melalui gaya gravitasi dari IRWST yang terletak di atas untai sistem pendingin reaktor. Gambar 1 menampilkan skema PXS dalam fungsinya sebagai penginjeksi keselamatan. Untuk kondisi transien kehilangan pendingin sekunder, injeksi air pendingin dari tangki IRWST dan akumulator diharapkan tidak bekerja.



Gambar 1. Skema PXS dalam fungsinya sebagai penginjeksi keselamatan [10]

Untuk memenuhi fungsi pembuangan kalor peluruhan teras, PXS dilengkapi dengan satu penukar kalor yang membuang kalor sisa dari teras secara pasif (*Passive residual heat removal heat exchanger/PRHR-HX*) dengan air pendingin di tangki IRWST berfungsi sebagai penerima energi kalor (*heat sink*). PRHR-HX terhubung ke salah satu untai pendingin primer baik pada jalur inlet maupun outletnya. Sistem tersebut terutama untuk memenuhi kriteria keselamatan terhadap kejadian transien yang mengganggu suplai air umpan pada pembangkit uap maupun sistem uap. Air pendingin IRWST akan menyerap kalor peluruhan selama lebih dari satu jam sebelum air tersebut mulai mendidih dan uap yang terbentuk dialirkan ke pengungkung. Uap tersebut akan terkondensasi oleh pendinginan pada baja bejana pengungkung dan kembali mengalir secara alami ke dalam IRWST. Gambar 2 menunjukkan skema PXS dalam fungsinya sebagai pembuangan kalor peluruhan teras.



Gambar 2. Skema PXS dalam fungsinya sebagai pembuang kalor peluruhan teras [10]

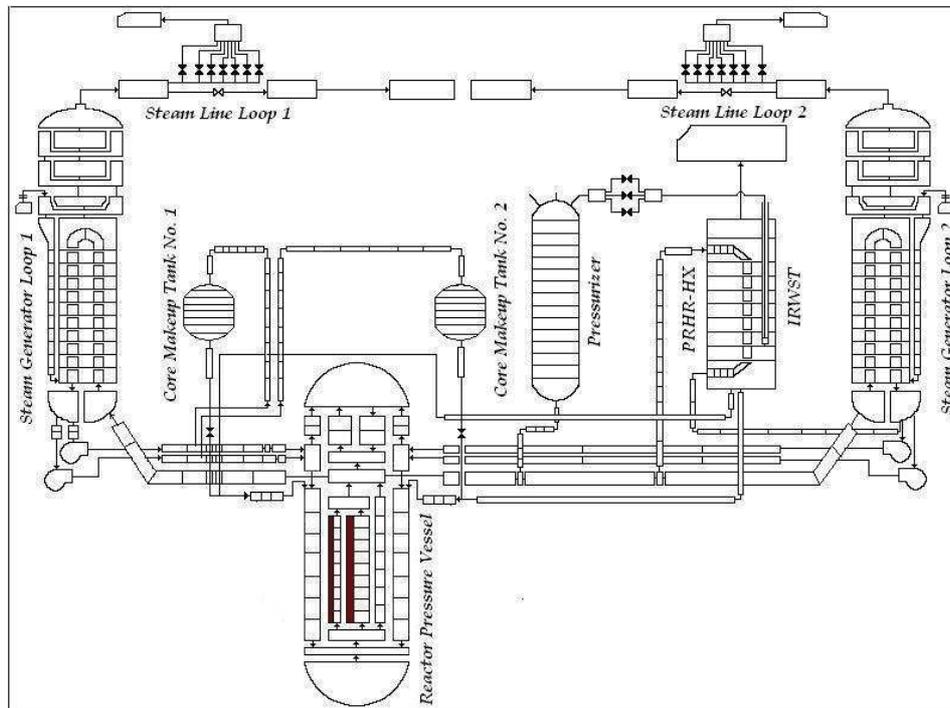
TATA KERJA SIMULASI KEJADIAN HILANGNYA ALIRAN AIR UMPAN

Pemodelan Sistem Pendinginan Teras Secara Pasif (PXS)

Untuk keperluan simulasi kejadian hilangnya aliran air umpan, dua komponen sebagai bagian dari PXS harus dimodelkan dan ditambahkan ke dalam model dasar AP1000 yang diperoleh dari penelitian sebelumnya [5]. Kedua model tambahan itu adalah sistem PRHR, satu tangki IRWST, dan dua tangki CMT, dimana nodalisasi AP1000 dengan tambahan sistem pendingin teras pasif tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. Sistem PRHR terdiri dari penukar kalor tipe *C-Tube* yang terendam di dalam tangki IRWST yang berisi air pendingin ber kandungan asam borat (*borated cooling water*). Penukar kalor PRHR menyediakan pembuangan kalor pendingin primer melalui jalur sirkulasi alam. Air temperatur tinggi mengalir secara alami melalui jalur inlet PRHR yang terhubung ke salah satu lengan panas dan memasuki *tubesheet* dari penukar kalor PRHR pada tekanan dan temperatur sistem primer reaktor. Pembuangan kalor terjadi dengan cara pendidihan pada permukaan luar *tubes*. Pendingin primer bertemperatur rendah mengalir kembali ke untai primer melalui bagian bawah dari pembangkit uap. Karena terhubung dengan sistem primer reaktor, maka PRHR beroperasi pada tekanan sistem reaktor dimana terjadi aliran sirkulasi alam fase tunggal. Pada kondisi operasi normal reaktor, pipa keluar (*outlet*) penukar kalor diisolasi oleh dua katup berbasis operasi udara tekan (*air-operated valve/AOV*) untuk mencegah interaksi air pendingin dalam pipa dengan sistem reaktor. Salah satu katup tersebut baru akan membuka secara otomatis saat hilangnya tekanan udara katup yang terjadi ketika level air pembangkit uap turun melampaui nilai tertentu. Saat beroperasi, penukar kalor PRHR akan mendinginkan sistem pendingin reaktor hingga temperatur 215,56 °C dalam waktu 36 jam dengan atau tanpa pompa primer. Pemodelan PRHR serta uji fungsinya telah divalidasi pada referensi [11]

Komponen lainnya adalah dua tangki CMT yang didesain untuk menggantikan sistem injeksi keselamatan tekanan tinggi pada PWR konvensional (Generasi II). Setiap tangki baja CMT dengan volume besar memiliki jalur penghubung dari salah satu lengan dingin sistem pendingin reaktor ke bagian atas tangki sebagai jalur inlet dan dari bagian bawah tangki ke nosel injeksi bejana secara langsung (*direct vessel injection/DVI*) sebagai jalur *outlet*. Nosel DVI merupakan jalur injeksi langsung ke bagian *downcomer* dari bejana reaktor. Setiap tangki berisi air dingin berborat dengan katup inlet yang dijaga pada posisi terbuka sehingga tekanan tangki sama dengan tekanan sistem pendingin primer. Katup outlet tangki CMT dijaga pada kondisi tertutup untuk mencegah terjadinya

sirkulasi alam saat operasi normal reaktor. Dengan demikian aliran sirkulasi alam hanya akan terjadi bila katup outlet dibuka, dimana air dingin borat mengalir langsung ke dalam bejana reaktor dan fluida primer lengan dingin mengalir ke atas masuk ke bagian atas tangki CMT.



Gambar 3. Nodalisasi AP1000 dengan sistem pendinginan teras pasif

Penetapan Kondisi Awal Simulasi dan Asumsi Yang Digunakan.

Kondisi awal simulasi diperlukan untuk menentukan sekuensi kejadian setelah kejadian pemicu dan hasil output dari simulasi. Asumsi dan kondisi awal yang digunakan dalam simulasi adalah:

- Terjadi kegagalan pompa air umpan utama (*main feedwater pump*) pada salah satu untai sekunder yang menyuplai air umpan ke satu pembangkit uap.
- Pada kondisi normal, pompa air umpan *startup* akan langsung bekerja untuk menggantikan fungsi pompa air umpan utama, namun pada kejadian selanjutnya pompa air umpan *startup* diasumsikan mengalami kegagalan.
- Reaktor beroperasi pada daya 102 % dari daya termal nominal.
- Trip reaktor dari sinyal level celah sempit (*narrow range*) pembangkit uap rendah.
- Pembuangan uap melalui *bypassing* ke kondenser tidak tersedia.
- Fungsi keselamatan untuk membuang kalor peluruhan teras adalah penukar kalor PRHR.
- Pelepasan uap sistem sekunder dicapai melalui katup keselamatan pembangkit uap.
- Pompa pendingin reaktor utama tetap berfungsi sampai berhenti otomatis bersamaan dengan aktuasi tangki CMT.

Simulasi dengan penetapan kondisi awal dan asumsi di atas bertujuan untuk menunjukkan kemampuan sistem proteksi dan pemantauan keselamatan AP1000 dan kemampuan sistem keselamatan pasif dalam membuang kalor peluruhan teras reaktor secara jangka panjang.

Aktuasi Sistem Proteksi dan Fitur Keselamatan Teknis.

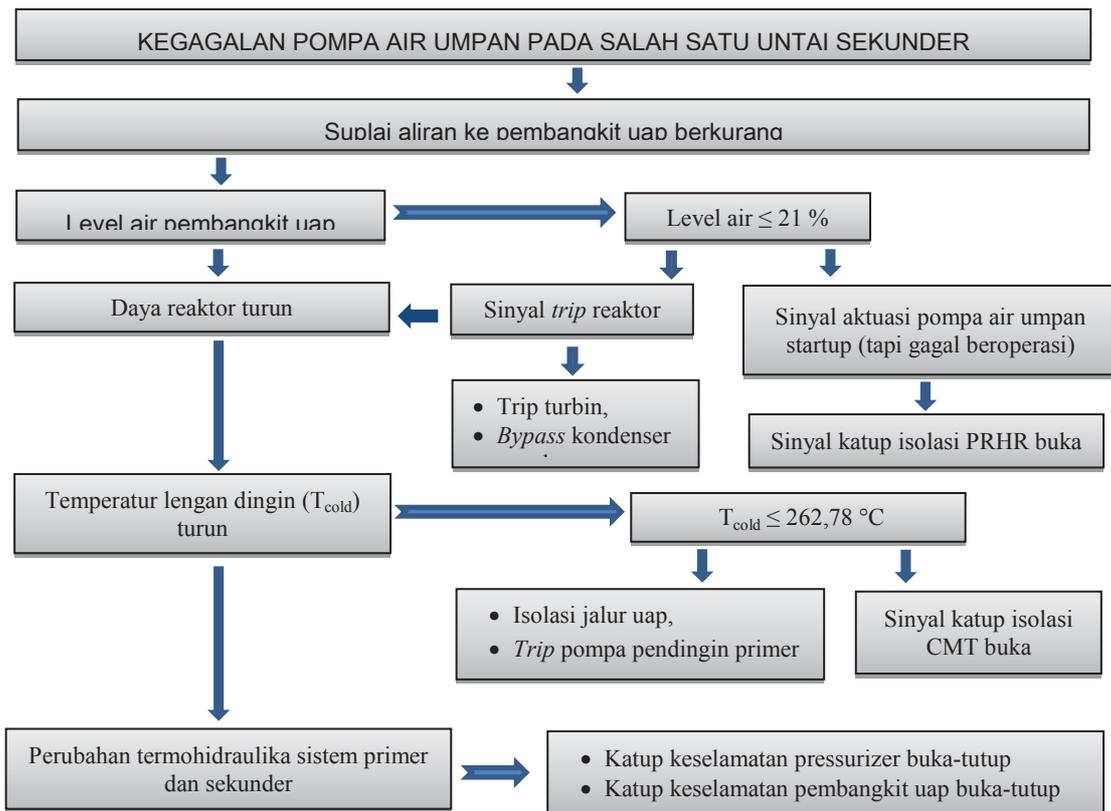
Sistem proteksi dan pemantauan keselamatan AP1000 berfungsi untuk mendeteksi kondisi instalasi di luar batas normal dan mengaktuasi fungsi keselamatan yang diperlukan untuk mencapai dan menjaga instalasi pada kondisi padam aman (*safe shutdown condition*). Aktuasi sistem proteksi reaktor, seperti trip reaktor, dan fitur keselamatan teknis dilakukan melalui sistem proteksi dan

pemantauan keselamatan bila *setpoint* sistem keselamatan dicapai untuk parameter instalasi tertentu. Tabel 1 berisi rincian *setpoint* sistem proteksi dan pemantauan keselamatan AP1000 yang harus ditambahkan dalam data masukan untuk menentukan sekuensi kecelakaan hilangnya aliran air umpan. Pada tabel tersebut, waktu tunda atau *delay time* untuk aktuasi katup jalur penukar kalor PRHR sebesar 62 detik dan katup isolasi tangki CMT sebesar 17 detik disesuaikan dengan hasil analisis sekuensi kejadian berdasarkan referensi [8].

Tabel 1. Rincian *setpoint* sistem proteksi dan pemantauan keselamatan

Fungsi Proteksi	Sinyal Aktuasi	Variabel Aktuasi (Trip Setpoint)
Trip reaktor	Level celah sempit pembangkit uap (<i>narrow range</i>) rendah	$\leq 21\%$ (2 detik waktu tunda) [8]
Trip pompa air umpan (selain untai yang gagal)	Trip reaktor	-
Trip pompa pendingin primer	Aktuasi <i>safeguard</i> : Temperatur lengan dingin sistem primer (T_{cold}) rendah	$\leq 262,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ [11] (15 detik waktu tunda) [8]
Aktuasi MSIV (tutup)	T_{cold} rendah	$\leq 262,78\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]
Trip turbin	Trip reaktor	-
Katup keselamatan <i>pressurizer</i> buka-tutup	Tekanan <i>pressurizer</i>	$\geq 17.133\text{ MPa}$ (buka) $\leq 17.098\text{ MPa}$ (tutup) [13]
Katup keselamatan uap utama buka-tutup	Tekanan pembangkit uap	$\geq 8.17\text{ MPa}$ (buka) $\leq 8.10\text{ MPa}$ (tutup) [14]
Katup jalur PRHR buka	Level celah sempit pembangkit uap (<i>narrow range</i>) rendah dan aliran pompa air umpan <i>startup</i> rendah	$\leq 21\%$ [12] (asumsi 62 detik waktu tunda dari kegagalan pompa air umpan <i>startup</i>)
Katup isolasi CMT buka	Aktuasi <i>safeguard</i> : Temperatur lengan dingin sistem primer (T_{cold}) rendah	$\leq 262.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12] (17 detik waktu tunda)

Gambar 4 menunjukkan diagram alir rencana simulasi yang menggambarkan sekuensi kejadian yang diharapkan dan aktuasi sistem proteksi dan sistem keselamatan yang berkaitan.



Gambar 4. Diagram alir sekuensi kejadian dan aktuasi sistem proteksi dan sistem keselamatan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Simulasi Kondisi Tunak

Sebelum dilakukannya simulasi kondisi kecelakaan, dilakukan simulasi kondisi tunak selama waktu tertentu untuk menunjukkan kestabilan parameter kondisi awal. Tabel 2 menunjukkan parameter kondisi awal setelah 100 detik simulasi berupa daya reaktor, temperatur inlet dan outlet teras, tekanan sistem pendingin reaktor, laju alir lengan panas dan dingin per untai, laju alir uap total, tekanan uap pada outlet pembangkit uap, temperatur air umpan pada inlet pembangkit uap, dan kalor total yang dipindahkan dari sistem primer ke sistem sekunder.

Tabel 2. Nilai operasi nominal parameter reaktor kondisi tunak

Parameter Reaktor	Nilai Operasi Nominal	
	RELAP5	Data Desain
Daya reaktor (MWth)	3473,8	3400
Temperatur inlet/outlet teras (°C)	292,22/327,98	280,67/323,33
Tekanan sistem pendingin reaktor (MPa)	15,935	15,45
Laju alir lengan panas / dingin (kg/detik)	8809,9/4404,8	7696,10/3848,0
Laju alir uap total (kg/detik)	1930,35	1887,44
Tekanan uap pembangkit uap (MPa)	6,077	5,76
Temperatur air umpan (°C)	226,67	226,67
Laju alir air umpan (kg/detik)	966,0	943,72
Perpindahan kalor total dari primer ke sekunder (daya teras dan daya pompa primer) (MWt)	3490,4	3415

Keluaran simulasi juga menghitung rasio fluks kalor kritis dan fluks kalor aktual pada kanal kalor di bagian teras reaktor. Pada model AP1000, kanal kalor teras mewakili kanal-kanal pendingin di antara satu perangkat bahan bakar teras. Hasil rasio fluks kalor kritis dan fluks kalor aktual digunakan untuk mengetahui nilai DNBR pada kondisi tunak maupun transien dan hasil perhitungan awal menunjukkan nilai DNBR minimum adalah 1,32. Hasil tersebut belum divalidasi karena belum mempertimbangkan faktor teknis lainnya dalam perhitungan DNBR namun tetap akan dianalisis perubahannya selama simulasi kondisi kecelakaan.

Hasil Simulasi Kondisi Kecelakaan

Tabel 3 menunjukkan sekuensi kejadian per waktu untuk kasus hilangnya suplai air umpan ke salah satu pembangkit uap dihitung setelah 100 detik simulasi kondisi tunak. Sekuensi kejadian hasil perhitungan menggunakan RELAP5 dibandingkan dengan data desain AP1000 berupa hasil perhitungan menggunakan LOFTRAN seperti terdapat pada dokumen pembandingan [8]. Hasil analisis dalam dokumen pembandingan diperoleh menggunakan versi termodifikasi dari LOFTRAN code [15] dan ditulis dalam WCAP-15644 [16].

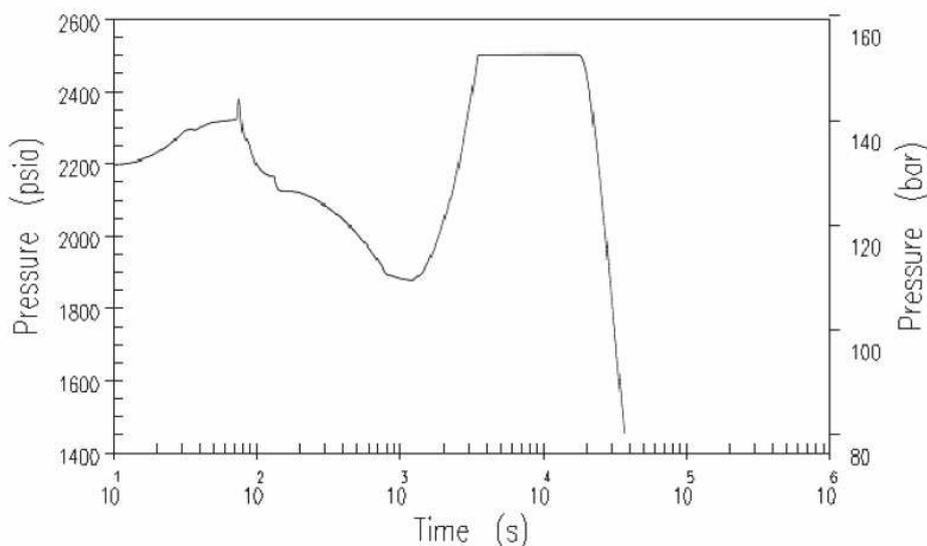
Tabel 3. Sekuensi waktu untuk kejadian hilangnya suplai air umpan

No.	Kejadian	Waktu (detik)	
		LOFTRAN	RELAP5
1.	Air umpan hilang	0,0	0,0
2.	Sinyal level air celah sempit pembangkit uap rendah untuk trip reaktor	60,4	66,5
3.	Batang kendali turun	62,4	68,5
4.	Katup keselamatan pembangkit uap membuka	80,0	76,0
5.	Aktuasi penukar kalor PRHR dari sinyal air pembangkit uap rendah (62 detik waktu tunda dari sinyal level air pembangkit uap rendah)	122,4	128,5
6.	Katup keselamatan pembangkit uap menutup	134,0	299,0
7.	Temperatur lengan dingin mencapai <i>setpoint</i> T_{cold} rendah	1144,6	2061,9
8.	Trip pompa pendingin reaktor dari sinyal "S" T_{cold} rendah	1150,6	2076,9
9.	Isolasi jalur uap dari sinyal "S" T_{cold} rendah	1156,6	2073,9
10.	Aktuasi CMT dari sinyal "S" T_{cold} rendah	1161,6	2078,9
11.	Katup keselamatan <i>pressurizer</i> membuka	3490,0	39143,0
12.	Katup keselamatan <i>pressurizer</i> menutup	17702,0	58711,0
13.	Kesetimbangan pembuangan kalor oleh penukar kalor PRHR dengan kalor peluruhan	~ 17620,0	~ 43000,0
14.	Volume air <i>pressurizer</i> maksimum tercapai	19548,0	~ 43000,0

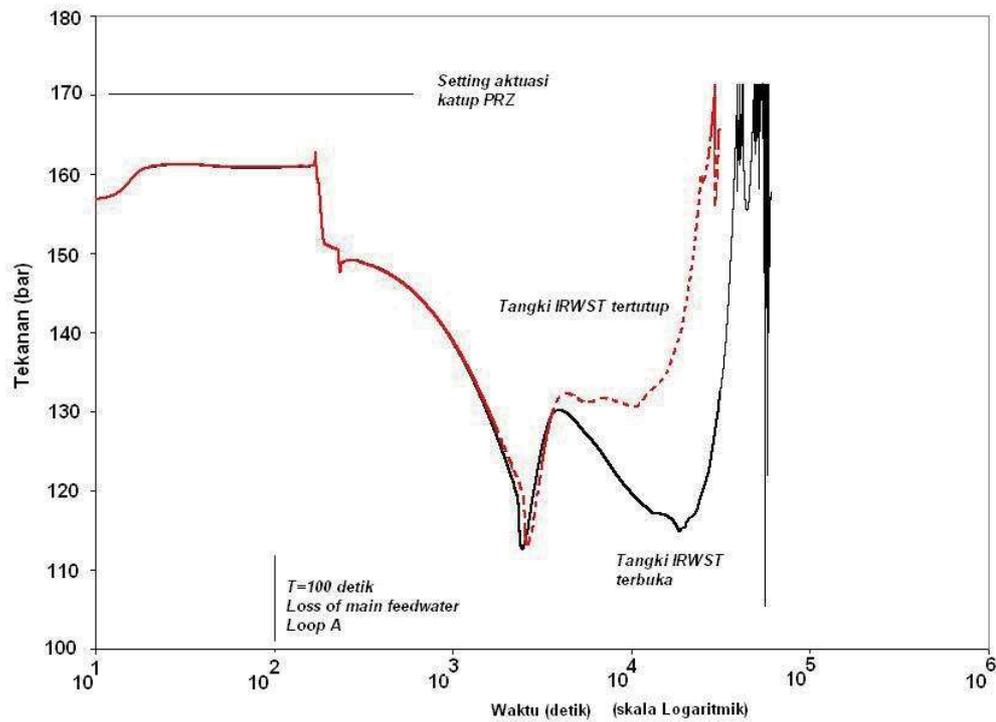
Dari Tabel 3 terlihat bahwa sekuensi waktu untuk aktuasi sistem proteksi dan fitur keselamatan teknis setelah kejadian hilangnya aliran air umpan antara hasil simulasi menggunakan LOFTRAN dan RELAP5 menunjukkan kemiripan. Kemiripan waktu terutama terlihat pada waktu turunnya level air umpan di pembangkit uap yang mempengaruhi terpicunya sinyal trip reaktor (No. 2 dan 3). Walaupun demikian penurunan temperatur lengan dingin untuk mencapai nilai sinyal T_{cold} rendah setelah trip reaktor terlihat berbeda (No.7) dimana pada RELAP5 lebih lambat. Perbedaan tersebut diperkirakan dari perbedaan kemampuan pengambilan kalor peluruhan oleh model penukar kalor PRHR yang berbeda dengan data desain teknis. Hal tersebut kemungkinan juga mempengaruhi pencapaian kesetimbangan kalor antara produksi kalor peluruhan teras dan pembuangan kalor melalui penukar kalor PRHR yang terjadi lebih lama. (No. 13). Dari sisi aktuasi sistem proteksi dan fitur keselamatan teknis, kenaikan tekanan uap pada pembangkit uap setelah trip reaktor mencapai nilai aktuasi katup keselamatan pembangkit uap sebesar 8,17 MPa pada kisaran detik ke-76 (No. 4). Kenaikan tekanan uap tersebut disebabkan oleh pemanasan berlebihan karena berhentinya suplai air umpan akibat trip reaktor dan ditutupnya katup penghenti turbin, dan tidak berfungsinya pengalihan (*bypassing*) uap ke

kondensor. Bekerjanya katup keselamatan pembangkit uap dari hasil perhitungan RELAP5 menunjukkan kesesuaian asumsi dengan perhitungan LOFTRAN setelah kejadian yaitu tidak berfungsinya katup *bypass* ke kondenser setelah trip reaktor.

Tekanan primer di *pressurizer* sesuai perhitungan RELAP5 juga menunjukkan kenaikan hingga nilai bukaan katup keselamatan *pressurizer* seperti juga terlihat dari hasil perhitungan LOFTRAN. Namun penyebab peningkatan tekanan primer dari kedua perhitungan kemungkinan berbeda. Gambar 5 menunjukkan perubahan tekanan primer hasil perhitungan LOFTRAN, sedangkan Gambar 6 menunjukkan perubahan tekanan primer hasil perhitungan RELAP5. Dari hasil perhitungan RELAP5, kenaikan tekanan primer tertinggi hanya terjadi sebelum trip reaktor, untuk kemudian turun setelah trip reaktor akibat terjadinya pendinginan sistem dari pengambilan kalor oleh penukar kalor PRHR dan turun drastis ketika pompa pendingin primer berhenti bekerja. Kenaikan tekanan primer terjadi lagi setelah masuknya injeksi pendingin dari tangki CMT ketika tekanan sistem primer turun di bawah tekanan tangki CMT. Perubahan tersebut berbeda dengan hasil perhitungan LOFTRAN pada Gambar 5, dimana tekanan primer masih naik hingga ke nilai bukaan katup keselamatan *pressurizer*, sementara pada Gambar 6 tekanan primer turun secara berkelanjutan. Kenaikan tekanan primer hingga ke nilai aktuasi katup keselamatan *pressurizer* terjadi bila tangki IRWST dibuat tertutup pada model RELAP5. Hal itu disebabkan oleh terjadinya saturasi tekanan udara IRWST yang mengakibatkan penurunan kemampuan pengambilan kalor sistem primer oleh penukar kalor PRHR (Gambar 6 garis terputus). Bila tekanan udara IRWST dihubungkan dengan ruang pengungkung, peningkatan tekanan IRWST yang mengarah ke penurunan pengambilan kalor oleh penukar kalor PRHR terjadi lebih lambat yang mengakibatkan peningkatan tekanan sistem primer (Gambar 5 garis penuh). Kejadian tersebut menunjukkan perlunya proses resirkulasi pendingin pada sistem IRWST secara berkelanjutan agar tidak terjadi peningkatan tekanan udara IRWST yang menghalangi fungsi pengambilan kalor oleh penukar kalor PRHR secara jangka panjang dan mencegah keluarnya inventori sistem primer melalui katup keselamatan *pressurizer*. Hasil di atas juga menunjukkan pentingnya peranan pengungkung (sungkup) sebagai buangan akhir perpindahan kalor dari tangki IRWST. Fungsi pengungkung sebagai bagian dari fitur keselamatan terekayasa AP1000 diaplikasikan sebagai sistem pendinginan pengungkung pasif (*passive containment cooling system/PCS*), namun tidak dimodelkan dalam analisis ini [17].

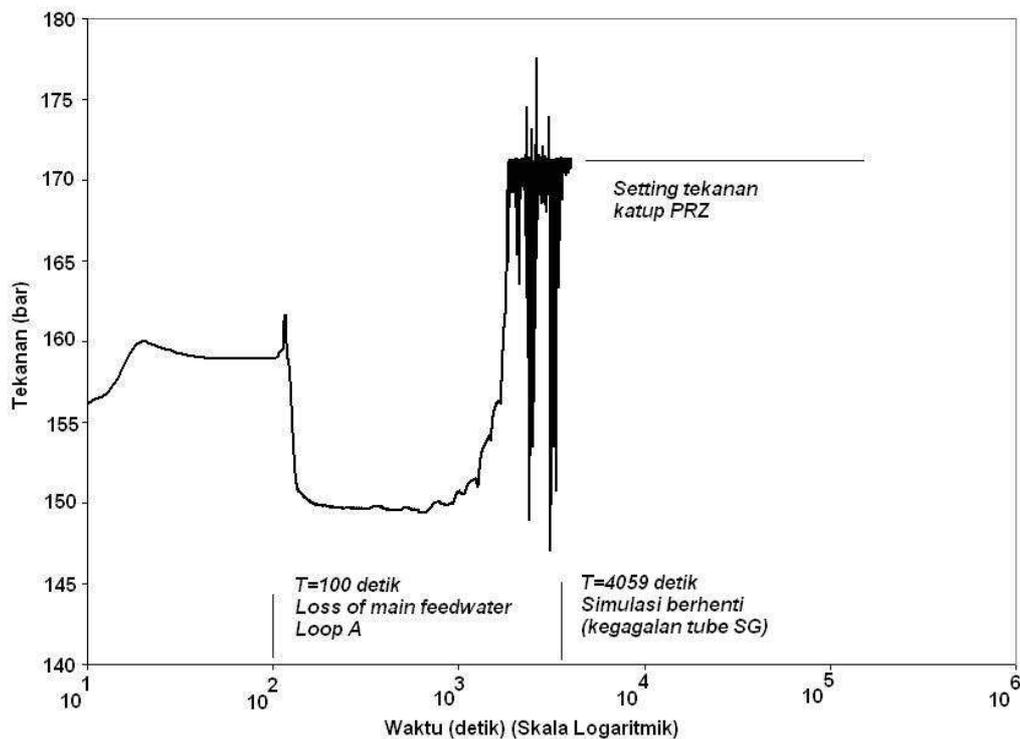


Gambar 5. Perubahan tekanan primer hasil perhitungan LOFTRAN [8]



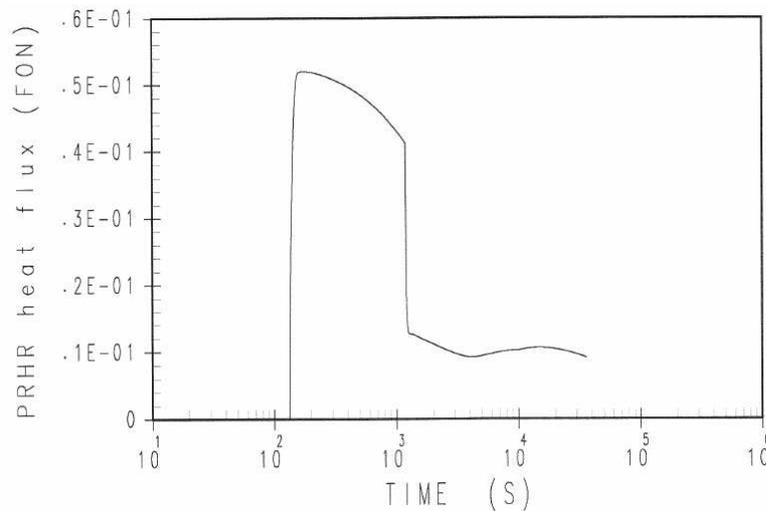
Gambar 6. Perubahan tekanan primer hasil perhitungan RELAP5

Untuk mengetahui kontribusi penukar panas PRHR dan resirkulasi tangki CMT terhadap panas peluruhan teras, dilakukan simulasi tambahan dengan kasus yang sama namun tanpa aktivasi kedua sistem di atas. Gambar 7 menampilkan grafik perubahan tekanan primer yang diperoleh bila penukar panas PRHR dan resirkulasi tangki CMT tidak bekerja. Dari grafik tersebut terlihat kesamaan perubahan tekanan primer hingga pada kisaran detik ke-100, dimana batang kendali mulai jatuh untuk men-trip reaktor. Reaktivitas negatif dari batang kendali menurunkan daya termal reaktor dan juga tekanan primer hingga ke level tertentu. Namun tekanan primer cenderung tidak berubah karena pengaruh panas peluruhan yang tidak terbuang secara maksimal akibat tidak bekerjanya penukar panas PRHR. Akibatnya temperatur pendingin sistem primer juga tidak dapat turun ke setting sinyal untuk menghentikan pompa pendingin primer. Panas peluruhan teras yang tidak terbuang tersebut pada awalnya masih bisa dibuang melalui air pendingin sekunder yang masih tersisa di pembangkit uap. Namun ketika kapasitas pembuangan panas peluruhan tidak memadai, tekanan primer akan mengalami kenaikan yang pada akhirnya mencapai setting aktivasi katup keselamatan *pressurizer*. Simulasi terhenti pada kisaran detik ke-4000 ketika air pendingin sekunder di salah satu pembangkit uap habis hingga menaikkan temperatur material *tube* penukar panas.

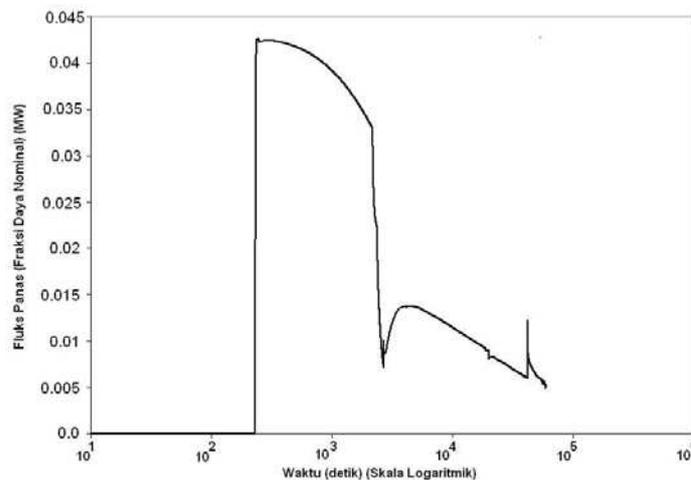


Gambar 7. Perubahan tekanan primer tanpa aktuasi PXS

Aktuasi penukar kalor PRHR dengan membukanya katup isolasi PRHR terjadi setelah tercapainya sinyal level pembangkit uap rendah dengan asumsi terjadi kegagalan operasi pompa air umpan *startup* setelah 62 detik. Kapasitas penukar kalor PRHR ketika pompa pendingin reaktor masih bekerja lebih besar dari kalor peluruhan, sehingga sistem pendingin reaktor mengalami pendinginan dan terjadi penurunan tekanan primer. Karena pompa pendingin utama berhenti otomatis bersamaan dengan tercapainya sinyal T_{cold} rendah, penukar kalor PRHR beroperasi pada kondisi sirkulasi alam. Sinyal T_{cold} rendah juga membuka katup isolasi jalur injeksi dari tangki CMT, dan langsung menginjeksi pendingin ke anulus bejana tekan reaktor ketika tekanan reaktor lebih rendah dari tekanan pendingin tangki CMT. Ketika sistem primer mengalami pendinginan, kapasitas pembuangan kalor penukar kalor PRHR juga menurun. Laju pembuangan kalor dari sistem pendingin reaktor juga menurun di bawah kalor peluruhan akibat injeksi dari tangki CMT dan aliran sirkulasi penukar kalor PRHR. Akibatnya sistem pendingin reaktor mengalami peningkatan temperatur kembali yang menyebabkan peningkatan pembuangan kalor dari PRHR. Peningkatan temperatur sistem pendingin primer tersebut berlanjut hingga laju pembuangan kalor PRHR menyamai produksi kalor peluruhan yang masih ada yang terjadi pada kisaran 43000 detik setelah kejadian seperti terlihat pada Tabel 2. Gambar 8 menunjukkan perubahan fluks kalor melalui penukar kalor PRHR sebagai fraksi daya reaktor nominal hasil perhitungan LOFTRAN dan pada Gambar 9 diberikan hasil perhitungan perubahan fluks kalor tersebut menggunakan RELAP5. Dari perbandingan kedua grafik terlihat kecenderungan perubahan yang hampir sama terutama ketika pompa pendingin primer masih bekerja, ketika terjadi trip pompa pendingin primer yang bersamaan dengan injeksi pendingin dari tangki CMT.



Gambar 8. Perubahan fluks kalor PRHR hasil perhitungan LOFTRAN [8]



Gambar 9. Perubahan fluks kalor PRHR hasil perhitungan RELAP5

Hasil perhitungan DNBR minimum untuk kondisi kecelakaan tidak menunjukkan penurunan berarti dari kondisi tunak yaitu pada kisaran 1,3. Hasil perhitungan menggunakan LOFTRAN menunjukkan penurunan nilai DNBR dari nilai kondisi tunak 2,9 hingga ke nilai 2,6 untuk kemudian naik kembali setelah *trip* reaktor sementara nilai minimum DNBR adalah 1,25 untuk kondisi kecelakaan. Dengan demikian masih dibutuhkan pemodelan RELAP5 secara lebih rinci terutama pada bagian teras pada kondisi tunak untuk dapat menghasilkan perubahan DNBR minimum yang lebih tepat pada kondisi tunak dan kondisi kecelakaan.

KESIMPULAN

Analisis dari hasil simulasi hilangnya aliran air umpan ke pembangkit uap sebagai bagian dari kategori kegagalan pendingin yang menyebabkan penurunan pembuangan panas oleh sistem sekunder menunjukkan bahwa teras, sistem pendingin reaktor, dan sistem sekunder masih berada dalam kondisi aman. Kapasitas pembuangan kalor melalui penukar kalor PRHR telah terverifikasi kemampuannya dalam membuang kalor peluruhan teras dan mencegah keluarnya pendingin sistem primer melalui katup keselamatan *pressurizer*. Namun untuk perhitungan DNBR minimum, masih dibutuhkan

pemodelan lebih baik pada kondisi tunak untuk dapat memperoleh hasil yang tepat pada kondisi kecelakaan. Secara umum, model PWR maju yang dilengkapi dengan sistem pendinginan teras ciri pasif yang telah dikembangkan tetap selamat ketika terjadi kecelakaan hilangnya aliran air umpan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Makalah ini merupakan bagian dari hasil kegiatan penelitian dan pengembangan Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN dengan judul Verifikasi Kecelakaan Kegagalan Pendingin pada Reaktor Daya PWR Maju menggunakan Visual Plant Analyzer berbasis ViSA-RELAP5. Untuk itu kami mengucapkan terima kasih kepada Kementerian Riset dan Teknologi yang telah mensponsori kegiatan ini melalui Program Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa Tahun Anggaran 2011.

DAFTAR PUSTAKA

1. European Nuclear Society. Nuclear power plants, world-wide, reactor types. Available from: <http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/n/npp-reactor-types.htm>. Accessed Februari 08, 2012.
2. T.L. Schulz. Westinghouse AP1000 advanced passive plant. Nuclear Engineering and Design. 2006; 236: 1547–1557.
3. Wikipedia. Generation III Reactors. Available from: http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_III_reactor#Generation_III_reactors. Accessed Februari 08, 2012.
4. Wikipedia. AP1000. Available from: <http://en.wikipedia.org/wiki/AP1000>. Accessed Februari 08, 2012.
5. Andi Sofrany E, Surip Widodo, Susyadi, D.T. Sony Tjahjani, Hendro Tjahjono. Pengembangan Model untuk Simulasi Keselamatan Reaktor PWR 1000 MWe Generasi III⁺ menggunakan Program Komputer RELAP5. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2011;13:50-62
6. Surip Widodo, dkk. Verifikasi kecelakaan kegagalan pendingin pada reaktor daya PWR maju menggunakan visual plant analyzer berbasis ViSA-RELAP5. Laporan Teknis Program Peningkatan Kemampuan Peneliti dan Perekayasa. PTRKN-BATAN; 2011
7. J.YANG, et al. Simulation and analysis on 10-in. cold leg small break LOCA for AP1000. Annals of Nuclear Energy. 2012.
8. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document, Chapter 15: Accident Analyses. EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
9. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document, Chapter 4: Reactor. EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
10. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document, Chapter 6: Engineered Safety Features”, EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
11. Andi Sofrany, Surip Widodo. Pemodelan sistem pembuangan kalor sisa secara pasif menggunakan RELAP5. Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar IPTEK Nuklir, Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPB); 2011.
12. Westinghouse Electric Co, “AP-1000 European design control document, chapter 16: Technical Specifications”, EPS-GW-GL-700 Revision 0, 2009
13. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document, chapter 5: Reactor Coolant System and Connected Systems. EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009

14. Westinghouse Electric Co. AP-1000 European design control document, chapter 10: Steam and Power Conversion. EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
15. BURNETT, T.W.T, et al. LOFTRAN code description. WCAP-7907-P-A (Proprietary) and WCAP-7907-A (Nonproprietary); 1984
16. AP1000 code applicability report. WCAP-15644-P (Proprietary) and WCAP-15644-NP (Nonproprietary), Revision 2; 2004
17. Farzad Choobdar Rahim, et al. Numerical modeling of LOCA accident in AP1000 reactor containment. Australian Journal of Basic and Applied Sciences. 2011; 5(5): 482-495