

PEMODELAN SISTEM PENDINGINAN SUNGKUP SECARA PASIF MENGGUNAKAN RELAP5

Andi Sofrany E, Susyadi, Surip Widodo
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir BATAN

Diterima editor 25 Juni 2012
Disetujui untuk publikasi 03 Agustus 2012

ABSTRAK

PEMODELAN SISTEM PENDINGINAN SUNGKUP SECARA PASIF MENGGUNAKAN RELAP5.

Semua reaktor daya maju (Generasi III+) memanfaatkan sistem pasif untuk membuang panas melalui sirkulasi alam. Salah satu fitur unik dari reaktor daya maju tipe PWR AP1000 adalah adanya sistem pendinginan sungkup secara pasif (*Passive Containment Cooling System / PCS*) yang didesain menjaga tekanan sungkup di bawah desain selama 72 jam tanpa tindakan operator. Selama kecelakaan dasar desain seperti kecelakaan hilangnya pendingin atau kecelakaan putusnya jalur uap, terjadi lepasan uap yang bersentuhan dengan dinding baja bejana sungkup yang lebih dingin. Perpindahan kalor dari lepasan uap melalui konveksi dan konduksi dinding baja bejana sungkup akan mengakibatkan perubahan densitas udara akibat pemanasan yang memicu aliran sirkulasi alam dari udara yang akan naik ke atas. Makalah ini bertujuan untuk memperoleh model sungkup AP1000 untuk menunjukkan fungsi PCS menggunakan RELAP5. Fungsi dasar PCS yang ingin diperoleh adalah fenomena perpindahan panas dari uap ke dinding bejana sungkup dan ke udara luar untuk menghasilkan aliran konveksi alam udara. Metodologi yang digunakan adalah pengumpulan data desain, nodalisasi dengan RELAP5, dan simulasi fungsi sungkup berdasarkan masukan kecelakaan dasar desain tertentu. Hasil pemodelan sungkup telah dapat menunjukkan fenomena perpindahan panas dari dalam sungkup ke udara luar dalam bentuk proses kondensasi dan konveksi alam. Hasil perhitungan RELAP5 terhadap model sungkup menunjukkan peningkatan tekanan sungkup yang melebihi tekanan desain sungkup sebesar 59 psig seperti dibandingkan dalam dokumen desain AP1000. Hal itu disebabkan belum dimodelkannya pendinginan sungkup melalui pembersihan tangki sungkup bagian luar dari tangki *Passive Containment Cooling Storage Tank (PCCWST)*. Hasil pemodelan akan digunakan untuk analisis kecelakaan AP1000 secara menyeluruh yang melibatkan fungsi PCS.

Kata kunci: pemodelan, sungkup, AP1000, pasif

ABSTRACT

MODELING ON PASSIVE CONTAINMENT COOLING SYSTEM USING RELAP5. All advanced power reactors (Generation III+) utilize passive system to transfer heat by natural convection. One of the unique features of advanced power reactor of AP1000 is the presence of passive containment cooling system (PCS) designed to maintain containment pressure below its design pressure for 72 hours without operator intervention. During a design bases accident, such as loss of coolant accident or main steam line break, steam is released into the containment atmosphere and in contact with cooler steel containment vessel. Heat transfer from steam by convection of steam and conduction of steel wall will initiate air heating in the outside space of containment vessel and initiate natural convection of air from the bottom of air baffle due to the change in the air density. This paper is objected to get a containment model of AP1000 for showing the PCS function using RELAP5. Basic function to be focused is heat transfer phenomena from the steam to the wall containment and to the outside air to obtain natural convection of air. The methodology utilized are collecting design data, containment nodalization using RELAP5, and simulation of containment function based on certain design bases event condition. The results of simulation have shown the heat transfer phenomena from inside containment into the outside air by steam condensation and natural convection of the air. RELAP5 calculation of containment model shows an increase in containment pressure above the containment design pressure of 59 psig as compared in the AP1000 design document. That is because the recent RELAP5 modelling did not include the additional cooling of external surface of containment vessel from the the Passive Containment Cooling Water Storage Tank (PCCWST). The result of modeling will be used for further accident analyses of AP1000 involving the PCS function.

Keywords: modeling, containment, AP1000, passive

PENDAHULUAN

Reaktor daya generasi III⁺ memiliki perbedaan dengan reaktor daya generasi lain yaitu pada pemanfaatan sistem pasif dalam memitigasi kecelakaan dasar desain dan kecelakaan parah. Insiden Fukushima yang menunjukkan kelemahan sistem keselamatan berbasis komponen aktif dalam memitigasi kecelakaan parah akibat kejadian eksternal semakin menunjukkan keunggulan reaktor daya Generasi III⁺ yang dianggap dapat menjamin pendinginan teras dan sungkup dalam jangka panjang [1]. Salah satu reaktor daya PWR Generasi III⁺ adalah AP1000 yang merupakan reaktor PWR dengan kelas daya 1000 MWe untuk setiap unit. AP1000 merupakan pengembangan dari AP600 dengan pertimbangan aspek harga pembangkitan daya yang lebih kompetitif [2]. Kelas daya 1000 MWe adalah kelas daya yang kemungkinan sesuai untuk dibangun di Indonesia di masa depan dalam menyediakan energi listrik alternatif.

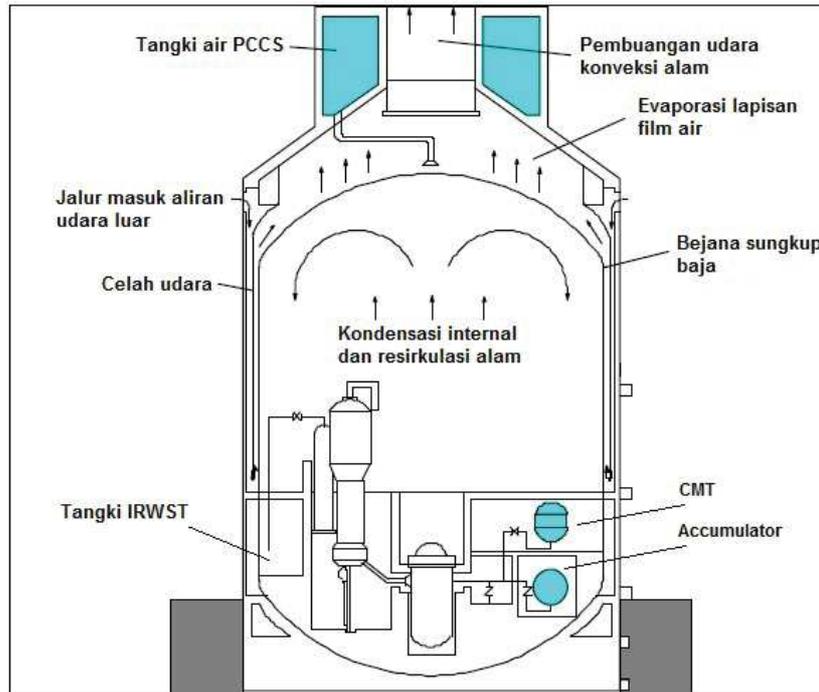
Kegiatan verifikasi keselamatan AP1000 di Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) telah dilakukan sejak tahun 2010 yang diawali dengan kegiatan pemodelan sistem suplai uap nuklir yang terdiri dari bejana reaktor, sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder [3]. Model AP1000 tersebut digunakan sebagai dasar untuk pengembangan model yang lebih lengkap untuk dapat digunakan dalam simulasi kecelakaan dasar desain. Untuk itu diperlukan tambahan model sistem keselamatan ciri pasif seperti sistem pembuangan panas peluruhan pasif (*Passive Residual Heat Removal (PRHR) System*), injeksi pendingin melalui sistem tangki *Core Makeup Tank (CMT)*, dan akumulator [4]. Salah satu hasil kegiatan di atas yaitu berupa verifikasi kecelakaan kegagalan pendingin yang menunjukkan peran dari sistem pendinginan sungkup pasif (*Passive Containment Cooling System / PCS*) yang saat itu belum dimodelkan walaupun telah menjadi bagian dari sistem keselamatan pasif dari AP1000.

Tujuan dari makalah ini adalah diperolehnya model sungkup AP1000 yang representatif untuk digunakan untuk simulasi sistem pasif yaitu PCS dalam memitigasi kecelakaan dasar desain menggunakan RELAP5/SCDAP/Mod3.4. Sebagai referensi digunakan penelitian mengenai fungsi PCS yang telah dilakukan namun baru terbatas pada reaktor daya AP600 [5] serta beberapa dokumen desain AP1000 terkait [6,7].

Metode penelitian yang digunakan adalah pengumpulan data desain sungkup untuk memperoleh data terekayasa (*engineering data*). Data tersebut digunakan untuk proses nodalisasi RELAP5 yang merepresentasikan sungkup, dan kemudian dilakukan simulasi fungsi sungkup dengan kejadian pemicu berupa kecelakaan dasar desain tertentu. Hasil simulasi yang diperoleh akan dibandingkan dengan hasil perhitungan yang ada dalam dokumen desain AP1000 [7].

DASAR TEORI

Sistem pendinginan sungkup secara pasif (*Passive Containment Cooling System/PCS*) adalah bagian dari fitur keselamatan teknis pada AP1000. Tujuan PCS adalah untuk mengurangi temperatur dan tekanan di dalam sungkup yang terjadi akibat kecelakaan hilangnya pendingin (*Loss of Coolant Accident/LOCA*) atau kecelakaan putusnya jalur uap (*Main Steam Line Break/MSLB*) di dalam sungkup dengan cara membuang energi termal dari atmosfer sungkup. PCS juga berperan sebagai pembuang panas ke heat sink akhir untuk kejadian lain yang menyebabkan peningkatan tekanan dan temperatur sungkup. PCS memanfaatkan penggunaan bejana sungkup baja dan bangunan penahan dinding beton yang melingkupi sungkup. Peranan PCS dalam memitigasi dampak kecelakaan akibat LOCA tersebut di atas juga telah dimodelkan secara numerik [8] maupun secara simulasi kecelakaan [9]. Gambar 1 menunjukkan skema sungkup AP1000 yang terdiri dari bejana baja yang melingkupi sistem suplai uap nuklir (*Nuclear Steam Supply System/NSSS*) dan semua sistem injeksi keselamatan pasif. Komponen utama dari PCS adalah tangki penyimpan air pendingin sungkup pasif (*Passive Containment Cooling Water Storage Tank/PCCWST*) yang berada dalam struktur di atas sungkup, satu saluran udara atau air baffle yang terletak di antara bejana sungkup baja dan bangunan penahan beton, inlet dan pembuang udara dan sistem distribusi air. *Air baffle* memungkinkan adanya aliran udara luar dengan temperatur lebih rendah sehingga dapat bersentuhan dengan permukaan luar bejana sungkup.



Gambar 1: Skema sungkup dan PCS AP1000 [1]

Pada kondisi LOCA atau MSLB, pengoperasian PCS diawali dengan sinyal tekanan sungkup tinggi yang mengaktuasi membukanya katup isolasi PCCWST. Dengan membukanya katup tersebut, air dari tangki PCCWST akan mengalir secara pasif ke bagian permukaan luar atas dari bejana sungkup baja. Aliran air tersebut membentuk lapisan film air di bagian kubah dan dinding struktur sungkup dan meningkatkan pendinginan sungkup. Uap yang terlepas dari sistem reaktor akan naik ke kubah sungkup dimana uap tersebut terkondensasi menjadi air melalui proses kondensasi dan konveksi ke dinding baja sungkup. Kalor yang diterima dinding baja sungkup akan mengalami proses konduksi melalui baja sungkup, konveksi dari permukaan sungkup ke lapisan film air, konveksi dan penguapan dari lapisan film air ke udara luar sungkup. Energi panas yang ditransfer ke udara luar di bagian luar sungkup akan mengalami proses pemanasan, dimana udara luar yang dipanaskan akan naik melalui saluran bawah dan mengalir sepanjang air baffle untuk menciptakan aliran sirkulasi alam. Pada proses itu, udara luar dengan temperatur lebih rendah akan tertarik melalui saluran inlet dan melepas udara dengan temperatur lebih tinggi melalui bagian atas struktur sungkup. Sementara itu, air kondensat hasil kondensasi uap di dalam sungkup akan mengalir ke bagian bawah sungkup dimana kembali ke tangki IRWST.

Pada kejadian yang tidak melibatkan LOCA atau MSLB seperti kejadian *Station Blackout* (SBO), fungsi pendinginan oleh sungkup akan bekerja berkaitan dengan fungsi pembuangan kalor peluruhan teras darurat oleh penukar kalor PRHR dan tangki *In-containment Refueling Water Storage Tank* (IRWST) [10]. Kalor peluruhan teras yang dibuang ke pendingin tangki IRWST akan menaikkan temperatur air tangki dan menaikkan tekanan udara di dalam tangki IRWST melalui pembentukan uap sehingga diperlukan proses venting ke atmosfer sungkup. Proses venting ke atmosfer sungkup akan memicu kondensasi uap melalui dinding baja bejana sungkup sebelum tekanan atmosfer sungkup meningkat dan memicu aktuasi katup isolasi PCCWST. Fenomena peningkatan tekanan tangki IRWST di atas telah diperoleh pada penelitian sebelumnya [3], yang menunjukkan perlunya pemodelan sungkup untuk memperoleh hasil evaluasi kecelakaan yang lebih tepat.

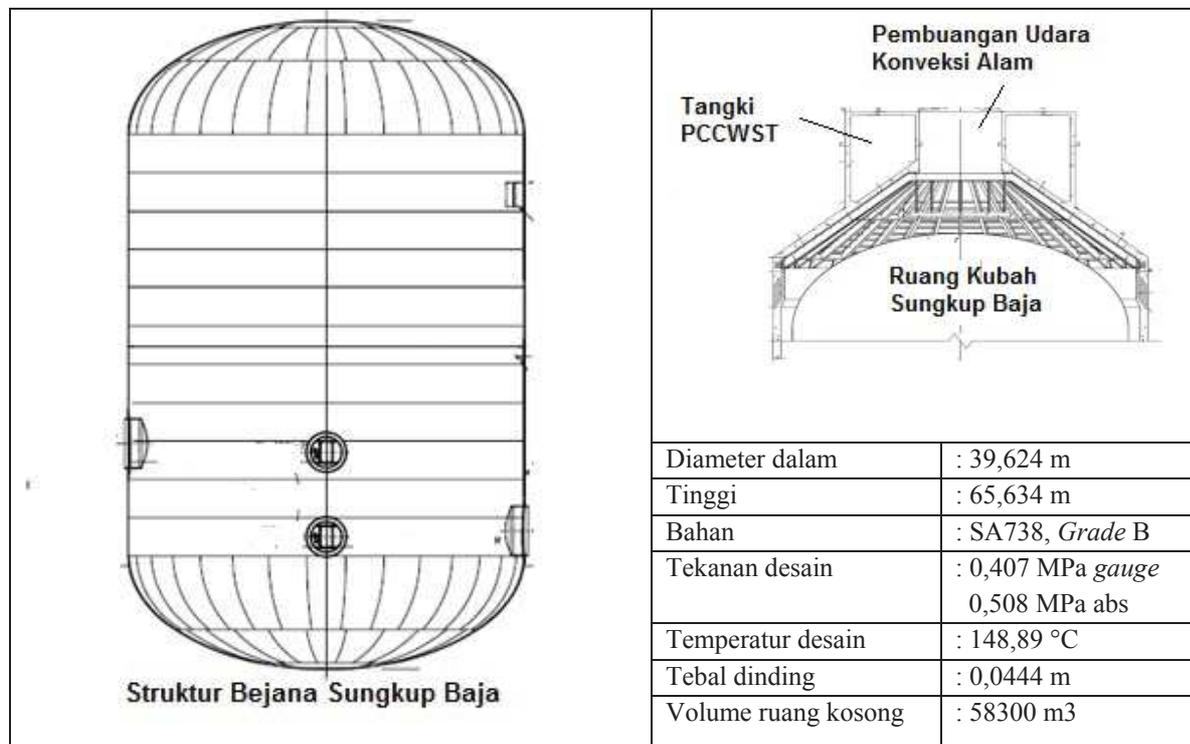
Pemodelan yang akan dilakukan pada penelitian ini adalah untuk menunjukkan kemampuan pendinginan sungkup oleh material baja dari bejana sungkup tanpa pendinginan lapisan air dari tangki PCCWST. Dengan demikian hasil analisis ini dapat digunakan untuk melihat kemampuan sungkup dalam menurunkan tekanan di dalam sungkup melalui perpindahan kalor melalui proses konveksi uap ke dinding baja sungkup yang mengakibatkan kondensasi, dilanjutkan dengan proses konduksi pada dinding baja dan proses konveksi untuk memanaskan udara di dalam celah udara (*air baffle*) yang akan

menyebabkan konveksi alam pada udara. Asumsi yang digunakan sebagai sumber uap untuk proses kondensasi adalah kebocoran uap atau MSLB yang diambil dari dokumen pembanding [7].

PEMODELAN

Data Teknis Bejana Sungkup

Data teknis bejana sungkup AP1000 diambil dari referensi 5 seperti terlihat pada Gambar 2. Sungkup AP1000 merupakan bejana baja silinder yang berdiri bebas dengan kubah atas dan dasar sungkup berbentuk elipsoidal. Silinder baja sungkup dikelilingi oleh struktur dinding beton dengan diameter berbeda untuk membentuk saluran udara. Struktur beton sungkup terdiri dari tangki PCCWST yang juga membentuk cerobong saluran udara di atas kubah bejana sungkup. Volume ruang dalam dari bejana sungkup merupakan volume ruang kosong yang dihitung dari volume bejana sungkup dikurangi volume komponen bejana reaktor, komponen sistem primer dan sistem sekunder dan komponen-komponen lain yang merupakan bagian dari nuclear island. Saluran udara sungkup dihitung berdasarkan diameter luar bejana baja sungkup dan diameter dalam dinding beton bejana sungkup. Data teknis diatas akan diolah untuk mendapatkan data terekayasa dalam nodalisasi model menggunakan RELAP5.



Gambar 2: Data teknis struktur bejana baja bagian dalam dan struktur kubah sungkup [5]

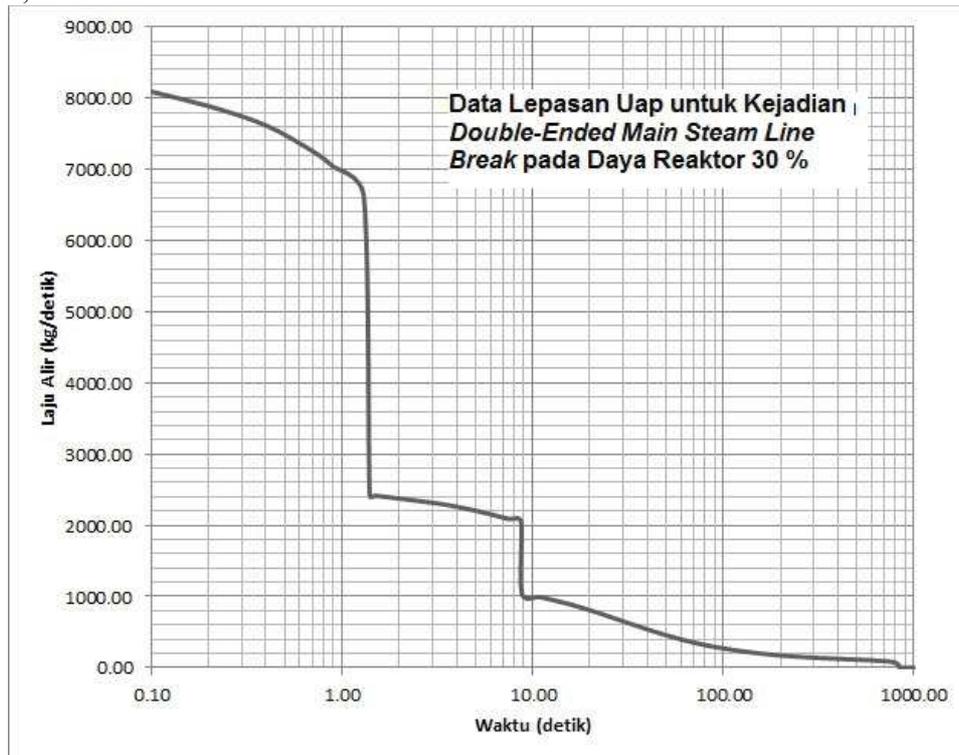
Nodalisasi RELAP5

Nodalisasi sungkup terdiri dari model hidrodinamika untuk komponen sungkup bagian dalam yang merepresentasikan atmosfer sungkup dan penampung kondensat, komponen dinding baja sungkup sebagai media perpindahan kalor, dan komponen saluran udara yang berhubungan dengan udara luar. Komponen sungkup bagian dalam dibagi menjadi ruang sungkup bawah, tengah, dan atas ditambah volume penampung kondensat dalam bentuk tangki IRWST yang diwakili model hidrodinamika pipe. Sebagai sumber lepasan bocoran uap ke atmosfer sungkup digunakan model *time-dependent volume* dengan model *time-dependent junction* untuk mensimulasikan aliran lepasan uap. Struktur pemindah kalor pada dinding baja sungkup dimodelkan sebagai heat structure dengan sifat bahan (*material properties*) *carbon steel*. Komponen saluran udara dimodelkan dengan model pipa

yang dihubungkan oleh model *time-dependent volume* pada kedua ujungnya sebagai *inlet* dan *outlet* udara.

Penetapan Kondisi Awal

Model sungkup akan divalidasi pada kejadian pecah dua sisi (*double ended rupture*) jalur uap utama pada daya reaktor 30% dengan kegagalan katup isolasi jalur uap utama. Data masukan kebocoran uap diambil dari dokumen desain AP1000 [6] berupa data pelepasan massa dan entalpi dalam bentuk tabel selama 1000 detik seperti ditunjukkan dalam bentuk grafik pada Gambar 3. Parameter yang akan dibandingkan adalah respon sungkup terhadap perubahan tekanan atmosfer sungkup. Kondisi awal untuk tekanan atmosfer sungkup adalah 0,108 MPa abs dengan temperatur internal 48,89 °C.

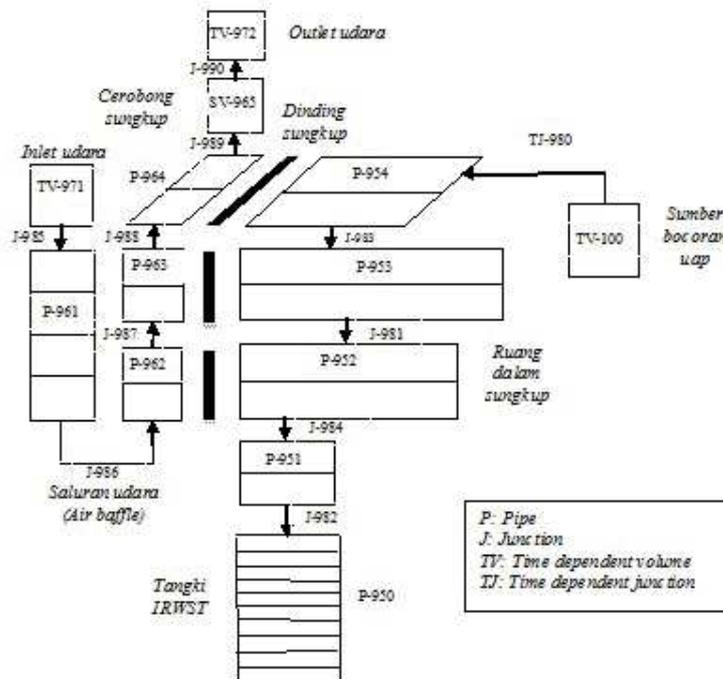


Gambar 3: Data lepasan uap ke atmosfer sungkup [7]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Nodalisasi Sungkup

Hasil pengolahan data teknis sungkup AP1000 ditunjukkan sebagai nodalisasi sungkup pada Gambar 4. Komponen hidrodinamika terdiri dari 6 komponen ruang bagian dalam sungkup dan 7 komponen bagian luar sungkup yang memodelkan saluran udara. Dinding baja sungkup sebagai struktur pemindah kalor dibagi menjadi 3 bagian sebagai media perpindahan kalor antara bagian dalam sungkup dan saluran udara yang mengalir ke atas. Saluran udara ke bawah dimodelkan secara adiabatik karena tidak ada perpindahan kalor dengan ruang dalam sungkup.



Gambar 4: Hasil nodalisasi sungkup AP1000 dengan bocoran uap

Data terekayasa yang memodelkan nodalisasi sungkup sebagian disajikan pada Tabel 1 yang terdiri dari tipe model hidrodinamika dan parameter kondisi awal (tekanan, temperatur, *thermodynamic state*) serta model struktur pemindah kalor pada dinding baja sungkup.

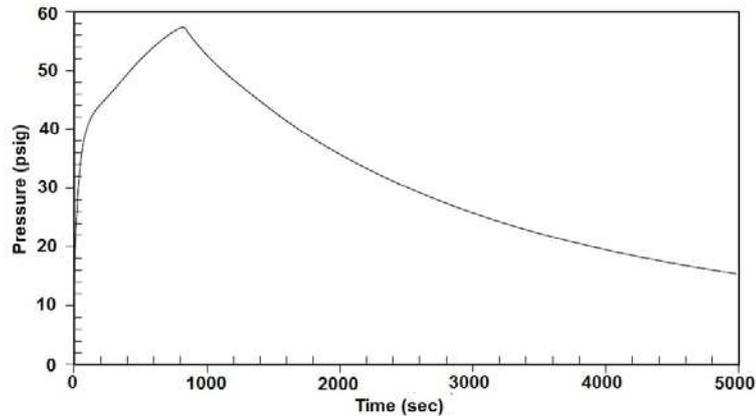
Tabel 1: Data terekayasa nodalisasi sungkup

Komponen sungkup	Tipe model hidrodinamika	Kondisi awal	
		Tekanan (MPa abs), temperatur (°C)	<i>Thermodynamic state</i>
Ruang sungkup kubah atas	P-954	0,108 / 48,89	Gas (udara)
Ruang sungkup tengah	P-953	0,108 / 48,89	Gas (udara)
Ruang sungkup bawah	P-952	0,108 / 48,89	Gas (udara)
Ruang sungkup dasar	P-951	0,108 / 48,89	Gas (udara)
Tangki IRWST	P-950	0,188 / 48,89	Air dan gas (udara)
Sumber bocoran uap	TV-100	6,7 / 283,32	Uap
Laju alir bocoran uap	TJ-980	-	Uap
<i>Inlet</i> udara	TV-971	0,1013 / 46,26	Gas (udara)
Saluran udara arah bawah	P-961	0,108 / 46,26	Gas (udara)
Saluran udara arah atas	P-962, P-963, P-964, SV-965	0,108 / 46,26	Gas (udara)
<i>Outlet</i> udara	TV-972	0,1011 / 46,26	Gas (udara)
	Model struktur pemindah kalor	Dimensi	
	bahan tipe	Tebal (m)	Temperatur awal (°C)
Dinding sungkup	baja karbon Silinder	0,0444	49,04

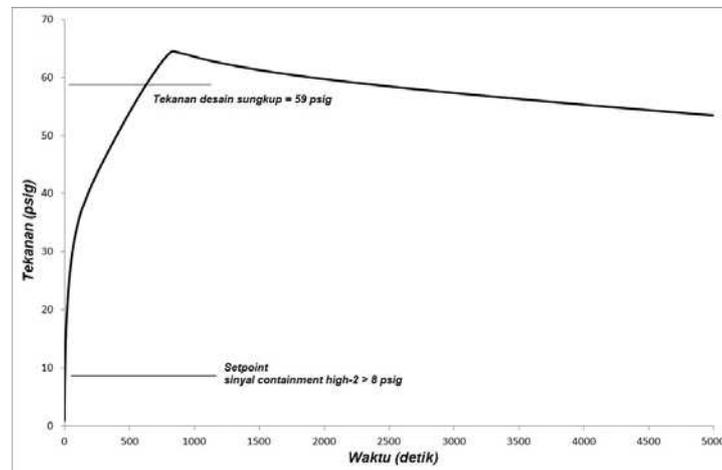
Validasi Hasil Perhitungan

Validasi atau perbandingan hasil dilakukan dengan menjalankan input deck menggunakan RELAP5 selama 10.000 detik. Parameter hasil perhitungan yang dibandingkan adalah respon sungkup AP1000 yang terdapat pada dokumen desain berdasarkan masukan data bocoran uap pada Gambar 3. Gambar 5 menunjukkan respon tekanan sungkup yang menghasilkan tekanan puncak pada kejadian

putusnya jalur uap berdasarkan perhitungan dengan WGOthic code [7], sementara Gambar 6 adalah hasil perhitungan RELAP5.



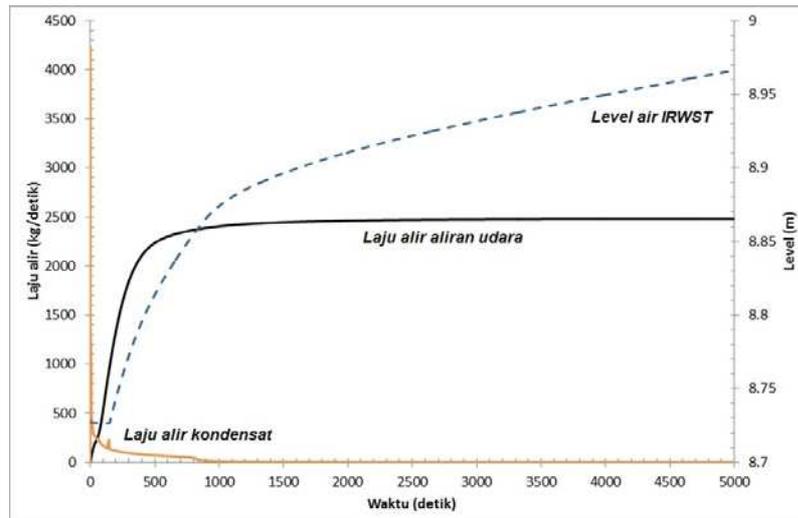
Gambar 5: Respon tekanan sungkup dari WGOthic code [7]



Gambar 6: Respon tekanan sungkup dari RELAP5

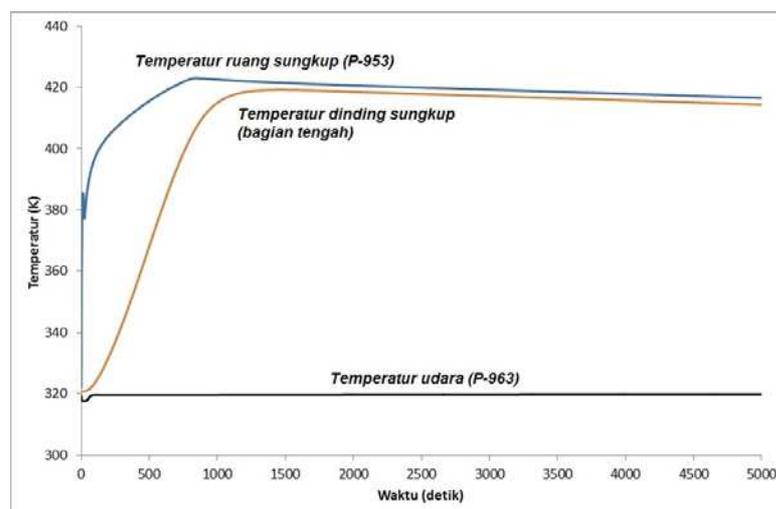
Hasil respon sungkup RELAP5 menunjukkan kenaikan tekanan sungkup yang lebih tinggi dari hasil dalam dokumen desain. Hal itu disebabkan karena pada saat kenaikan tekanan hingga lebih dari 8 psig, sinyal containment high-2 akan bekerja dan mengaktifkan katup isolasi tangki PCCWST untuk mengalirkan air tangki dan mendinginkan permukaan dinding sungkup. Pada pemodelan RELAP5, fungsi pendinginan dengan PCCWST tidak dimodelkan sehingga perpindahan kalor hanya bergantung pada proses konduksi dinding baja dan konveksi ke udara sehingga tekanan puncak sungkup naik lebih tinggi (> 60 psig) dan turun lebih lambat. Tekanan sungkup puncak juga melebihi tekanan desain sungkup (0,407 MPa g atau 59,0 psig) sehingga menunjukkan tidak memadainya kemampuan perpindahan panas dari dinding sungkup pada kondisi kejadian awal terkait. Fenomena di atas juga telah divalidasi pada referensi [8], dimana tekanan puncak melebihi tekanan desain sungkup pada kondisi pendinginan jangka panjang akibat LOCA sehingga dibutuhkan fungsi pendinginan dari pendingin tangki PCCWST.

Fenomena kondensasi uap di dalam sungkup dan konveksi alam aliran udara luar sungkup ditunjukkan pada Gambar 7 dan 8. Fenomena pada Gambar 7 dan 8 tidak dapat dibandingkan dengan hasil dalam dokumen pembandingan karena ketiadaan data. Pada Gambar 7, proses kondensasi uap ditunjukkan dengan adanya laju alir kondensat dan naiknya level air tangki IRWST karena menampung aliran kondensat.



Gambar 7: Perubahan laju alir udara dan kondensat dan level air IRWST

Gambar 8 menunjukkan karakter perubahan temperatur fluida dari dalam sungkup hingga ke saluran udara di luar sungkup yang diambil pada nodalisasi bagian tengah. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya perpindahan kalor dari dalam sungkup, melalui dinding sungkup dan menuju saluran udara di luar sungkup.



Gambar 8: Perubahan temperatur ruang sungkup, dinding sungkup, dan udara

Hasil perhitungan juga menunjukkan stratifikasi temperatur fluida sungkup antara bagian atas (P-954), bagian tengah (P-953), dan bagian bawah (P-952). Stratifikasi temperatur juga diperoleh pada dinding bejana sungkup dan saluran udara, dimana temperatur pada bagian atas lebih tinggi daripada temperatur bagian bawah. Stratifikasi temperatur saluran udara tersebut konsisten dengan adanya aliran konveksi alam udara yang ditunjukkan pada Gambar 7 akibat perbedaan densitas udara antara bagian atas dan bawah. Hasil simulasi juga menunjukkan pentingnya perbedaan tekanan inlet dan outlet udara, dimana semakin tinggi perbedaan tekanan udara antara inlet dan outlet akan menaikkan aliran konveksi alam dari udara.

KESIMPULAN

Pemodelan sungkup AP1000 menggunakan RELAP5 telah dapat menunjukkan fenomena perpindahan panas dari dalam sungkup sebagai bagian dari PCS ke udara luar dan kemampuan sungkup dalam menurunkan tekanan dan temperatur ruang sungkup secara pasif. Pada kejadian bocoran uap dengan data laju alir yang sama, terdapat perbedaan pada perubahan tekanan sungkup dengan dokumen pembandingan AP1000. Perbedaan tersebut disebabkan oleh tidak dimodelkannya pendinginan sungkup melalui pembasahan dinding sungkup dari tangki PCCWST yang terletak di atas bejana sungkup ketika tekanan sungkup naik ke nilai aktuasi, sehingga tekanan sungkup melebihi tekanan desain sungkup.

DAFTAR PUSTAKA

1. Jose N. Reyes. AP600 and AP1000 passive safety system design and testing in APEX. presented in IAEA-ICTP natural circulation training course; Trieste, Italy; 25-29 June 2007
2. T.L. Schulz. Westinghouse AP1000 advanced passive plant. Nuclear Engineering and Design . 2006; 236: 1547-1557.
3. 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, 1:50-62.
4. Andi Sofrany E, Surip Widodo, Susyadi, D.T. Sony Tjahjani, Hendro Tjahjono. Verifikasi kecelakaan hilangnya aliran air umpan pada reaktor daya PWR maju. Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega. 2012; 14:2:76 - 90.
5. W.T. Sha, et al., Analysis of large-scale test for AP-600 passive containment cooling system. Elsevier-Nuclear Engineering and Design; 2004
6. Westinghouse Electric Co. AP-1000 european design control document; Chapter 3: Reactor, EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
7. Westinghouse Electric Co. AP-1000 european design control document, Chapter 6: Engineered Safety Features, EPS-GW-GL-700 Revision 0; 2009
8. 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.
9. J. Yang, et al., Simulation and analysis on 10-inch cold leg small break LOCA for AP1000. Annals of Nuclear Energy. 2012; 46: 81-89.
10. Westinghouse Electric Co. AP1000 nuclear power plant: Coping with station blackout, Westinghouse Non-Proprietary Class 3; 2011.