

ANALISIS KECELAKAAN PUTUSNYA JALUR UAP DI DALAM PENGUNGKUNG PADA PWR

Andi Sofrany Ekariansyah

PTRKN-BATAN, Puspiptek Serpong, Tangerang

ABSTRAK

ANALISIS KECELAKAAN PUTUSNYA JALUR UAP DI DALAM PENGUNGKUNG PADA PWR. Telah dilakukan analisis kecelakaan putusnya jalur uap pada PLTN jenis PWR dengan menggunakan paket program RELAP/SCDAP/Mod342. Analisis kecelakaan penting dilakukan karena merupakan salah satu substansi penting dalam Laporan Analisis Keselamatan (LAK) sebelum suatu PLTN dibangun dalam rangka pengkajian keselamatan fasilitas reaktor. Tujuan analisis adalah untuk mengetahui karakteristik sekuensi kecelakaan dan perubahan parameter penting bagi keselamatan. PWR typical Jepang dengan daya 11160 MWe digunakan sebagai referensi. Satu pipa uap utama yang berada di salah satu untai sekunder diasumsikan putus menjadi dua dengan lokasi di dalam pengungkung (containment). Asumsi yang digunakan adalah semua katup isolasi uap utama gagal menutup setelah kejadian. Hasil penting yang diperoleh antara lain adalah bahwa pendinginan sistem primer hanya mengakibatkan sedikit kenaikan reaktivitas teras. Selain itu kontraksi sistem primer mengakibatkan penurunan level air hingga di bawah bagian atas bejana tekan dan terbentuknya voids di kanal bahan bakar yang kemudian menghilang setelah bertambahnya suplai air dari injeksi keselamatan (ECCS). Selain itu terjadi kenaikan tekanan pengungkung hingga melebihi tekanan desain yang menunjukkan pentingnya sistem pendinginan pengungkung. Dengan demikian pengaruh putusnya jalur uap di dalam pengungkung lebih terlihat pada keselamatan pengungkung

Kata kunci: Putusnya jalur uap, dalam pengungkung, RELAP5/SCDAP/Mod3.4

ABSTRACT

ANALYSIS OF MAIN STEAM LINE BREAK ACCIDENT INSIDE CONTAINMENT ON PWR. An analysis of main steam line break (MSLB) accident on PWR using RELAP/SCDAP/Mod3.4 code has been done. Accident analysis is important to be performed because it is contained in the Safety Analysis Report (SAR) before the nuclear power plant construction for assessing the safety of reactor facility. The purposes of analysis are to know the accident sequence characteristics and any parameter changes important for safety. A typical Japanese PWR with 1160 MWe output is used as reference. One main steam pipe located at one loop inside the containment is assumed to experience a double-ended steam pipe break. Analysis is performed by assuming all MSIVs are failed to close. The results show that the core cooldown only causes a little increase of core reactivity. The contraction of primary system also causes a decrease of pressurizer water level down to the upper dome of reactor vessel and voids at core channel, which is disappeared along with the safety injection from ECCS. Beside that, there is an increase of containmenet pressure up to the design pressure, which shown the importance of containment cooling system. Therefore, the effect of main steam line break is more significant on the safety of containment.

Keywords: Main steam line break, inside containment, RELAP5/SCDAP/Mod3.4

1. PENDAHULUAN

Kecelakaan pada PLTN merupakan situasi abnormal di luar level transien abnormal selama operasi sehingga dilihat sebagai suatu kejadian

yang sangat jarang terjadi. Namun demikian, kecelakaan terpostulasi ini jika terjadi dan tidak dicegah dengan sistem mitigasi yang ada dapat mengarah ke pelepasan bahan radioaktif dari fasilitas reaktor.

Berkaitan dengan hal tersebut, analisis kecelakaan penting dilakukan terutama untuk memahami fenomena termohidraulika yang terjadi selama kejadian kecelakaan dan dibandingkan dengan batasan-batasan keselamatan tertentu. Hasil analisis biasanya diuraikan dalam suatu Laporan Analisis Keselamatan (LAK) yang merupakan persyaratan teknis sebelum suatu PLTN dibangun.

Kecelakaan putusnya jalur uap yang terjadi pada pipa sekunder (*Main Steam Line Break*) suatu PWR merupakan salah satu kecelakaan dasar desain yang memiliki potensi untuk mempengaruhi lingkungan sekitar tapak fasilitas akibat terlepasnya radiasi dari fasilitas reaktor. Putusnya jalur uap dapat terjadi di luar maupun di dalam pengungkung (*containment*). Analisis putusnya jalur uap di luar pengungkung telah dilakukan seperti dapat dilihat pada Referensi [1]. Sebagai pembanding, makalah ini menguraikan analisis putusnya jalur uap yang terjadi di dalam pengungkung. Pada intinya, kriteria keselamatan yang harus dipenuhi dalam analisis kecelakaan antara lain adalah teras tidak rusak serius dan dapat didinginkan secara penuh dan terkait dengan pengungkung, maka tekanan di dalam pengungkung tidak melebihi tekanan maksimum yang digunakan.

Untuk tujuan di atas, kejadian kecelakaan putusnya jalur uap pada PWR akan dievaluasi dan dianalisis dengan bantuan program komputer yaitu RELAP5/SCDAP/Mod3.4. Program tersebut adalah program perhitungan termohidraulika yang dikembangkan untuk menganalisis keseluruhan perilaku termohidraulika sistem pendingin reaktor dan teras dalam kondisi operasi normal, kondisi kecelakaan dasar desain, dan bahkan kecelakaan parah. Inisial SCDAP (*Severe Core Damage Analysis Package*) menunjukkan kemampuan RELAP dalam menghitung perilaku teras dan struktur bejana reaktor dalam kondisi normal dan kecelakaan khusus untuk reaktor daya yang mencakup model untuk mengolah tahap akhir suatu kecelakaan parah. Selain RELAP5/SCDAP/Mod3.4 yang dikembangkan oleh *Innovative System Software* (ISS), terdapat beberapa versi RELAP lain seperti RELAP5/Mod3.3, RELAP-3D, MARS, dan SAMPSON yang dikembangkan dan digunakan oleh beberapa institusi berbeda seperti USNRC, US-DOE, KAERI dan NUPEC.

Pada penelitian ini, PWR yang menjadi objek analisis mengacu pada PLTN tipe PWR *typical* Jepang dengan menggunakan data input yang sama dengan referensi [2]. Perubahan input dilakukan terutama untuk memodelkan putusnya jalur uap beserta asumsi-asumsi lainnya yang akan diterangkan lebih lanjut.

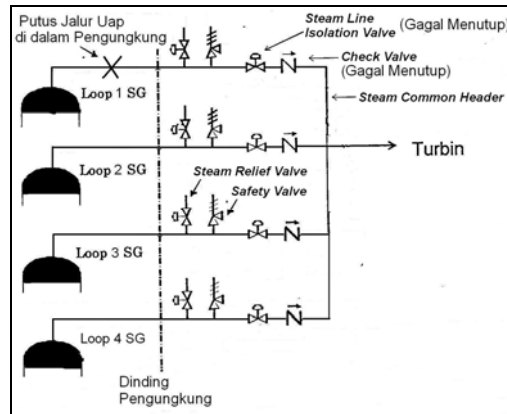
Dengan demikian tujuan utama makalah ini adalah untuk mengetahui karakteristik sekuensi kecelakaan yang dipicu oleh putusnya salah satu jalur uap utama di dalam pengungkung dan perubahan parameter termohidraulika yang penting bagi keselamatan sehingga dapat meningkatkan pemahaman terhadap kecelakaan dasar desain pada PLTN jenis PWR.

2. METODE ANALISIS

2.1. Identifikasi Kejadian

Berbeda dengan Putusnya Jalur Uap di luar pengungkung, maka lokasi putusnya pipa uap yang merupakan bagian dari sistem uap utama berada di dalam pengungkung dan sebelum katup isolasi uap utama (*Main Steam Isolation Valve / MSIV*). Putusnya jalur uap utama akan menyebabkan lepasnya uap dari pembangkit uap (*steam generator*) secara tak terkendali dan terakumulasi di dalam pengungkung. Ukuran terbesar yang mungkin terjadi adalah putus pipa menjadi dua bagian (*double-ended rupture*). Bila diasumsikan hanya satu pipa uap utama yang putus, maka uap yang keluar dari pipa-pipa uap utama dari untai pendingin yang lain masih bisa dicegah dengan menutupnya katup MSIV dan berfungsinya katup cek (*check valve*). Gambar 1 menampilkan skema putusnya jalur uap yang terjadi di dalam pengungkung pada PWR dengan empat untai (*loop*) pendingin. Terlepasnya uap secara berlebihan berarti terjadi pemindahan energi secara berlebihan dari sistem primer ke sistem sekunder sehingga mengakibatkan pendinginan (*cooldown*) sistem pendingin primer. Salah satu akibatnya adalah penurunan temperatur pendingin reaktor dan penurunan tekanan sistem primer dan tekanan pembangkit uap. Pendinginan sistem primer juga menyebabkan kenaikan reaktivitas teras berdasarkan koefisien temperatur moderator yang diimbangi dengan koefisien temperatur Doppler (*Fuel Temperature Coefficient of Reactivity*) yang negatif.

Untuk melihat sejauh mana perubahan fenomena termohidraulika yang terjadi setelah kejadian dan berdasarkan hasil yang diperoleh pada Referensi [1], maka diasumsikan bahwa katup MSIV pada semua untai mengalami kegagalan untuk mengisolasi, sementara katup cek yang mengalami kegagalan berada pada untai sekunder yang sama dimana terjadi putus pipa uap. Dengan demikian akan terjadi aliran uap dari semua untai sekunder yang keluar di lokasi terputusnya uap sehingga diharapkan konsekuensi yang ditimbulkan menjadi lebih parah.



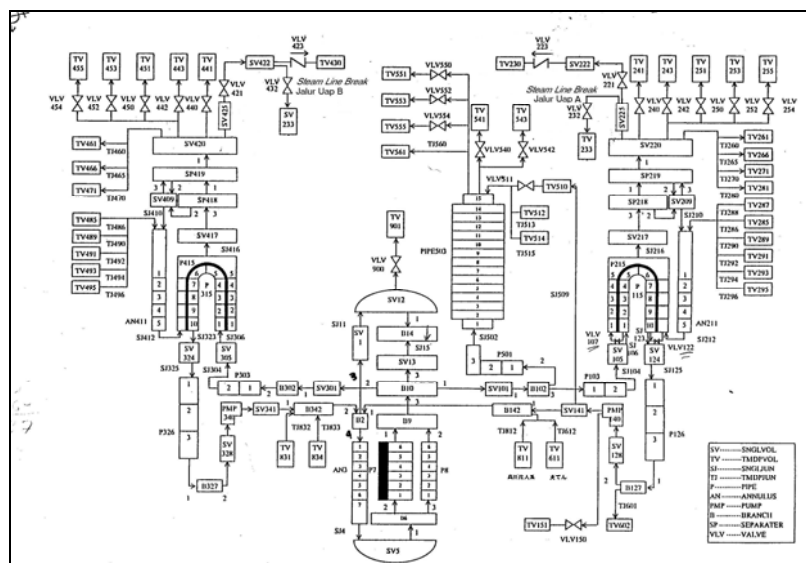
Gambar 1. Skema Putusnya Jalur Uap di dalam Pengungkung

2.2. Pemodelan Sistem dan Putusnya Jalur Uap Utama

PLTN jenis PWR Tsuruga Unit 2 memiliki daya 1160 MWe dan terdiri dari 4 untai pendingin primer dengan 4 pembangkit uap. Gambar 2 menunjukkan hasil pemodelan reaktor secara keseluruhan menggunakan RELAP5/SCDAP/Mod3.4. Empat untai pendingin primer dimodelkan menjadi satu untai dengan *pressurizer* (untai A) dan satu untai lain (untai B) yang mewakili 3 untai pendingin primer dengan besaran volume dan laju alir tiga kali untai A.

Hasil nodalisasi PWR yang telah diperoleh terdiri dari teras, *bypass* teras, *plenum* bawah, *plenum* atas, bagian atas bejana reaktor, *downcomer*, perpipaan pendingin primer, *pressurizer*, sisi primer pembangkit uap, sisi sekunder pembangkit uap, sistem uap utama, sistem air umpan, sistem air umpan bantu, dan sistem kendali. Pada sistem uap utama, dimodelkan katup penghenti turbin (*Turbine Stop Valve* / TSV). Untuk mengakomodasi kejadian kecelakaan putusnya jalur uap, katup tersebut dianggap sebagai MSIV karena dimodelkan pada untai A dan B.

Untuk mensimulasikan kejadian putusnya jalur uap utama di dalam pengungkung, dimodelkan sebuah katup trip (VLV 232) yang terhubung dari pipa uap (*steam line*) sebelum katup MSIV ke suatu volume buangan yang mewakili lokasi keluaran bocoran uap. Katup trip lain juga dimodelkan pada untai B (VLV 432) untuk memodelkan aliran uap pada pipa uap untai B yang keluar melalui lokasi putusnya pipa uap dengan kapasitas aliran uap sebesar 3 kali dari kapasitas aliran uap di untai A. Komponen hidrodinamika yang menggambarkan lokasi keluaran bocoran uap dari untai A dan untai B ke pengungkung digambarkan sebagai komponen *single volume* (SV) 233 dengan tekanan 1,0 bar dan temperatur 317 °K.



Gambar 2. Nodalisasi PWR dengan Pemodelan Putusnya Jalur Uap Utama

2.3. Perhitungan Volume Pengungkung

Karena tidak diperolehnya data volume pengungkung, maka dilakukan perhitungan berdasarkan data-data teknis yang ada.

Berdasarkan referensi [3], diperoleh beberapa data teknis pengungkung yang identik dengan PWR Tsuruga Unit 2 seperti terlihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Data Teknis Pengungkung PWR Tsuruga Unit 2 [3]

Bentuk	<i>Cylindrical Shell with Spherical Dome</i>	
Dimensi Silinder	Ketebalan Dinding	1,3 m
	Tinggi	43,0 m
	Diameter	43,0 m
Dimensi Kubah	Ketebalan Kubah	1,1 m
	Tinggi	22,6 m
	Radius	21,5 m
Tekanan desain	4,0 kg/cm ²	
Temperatur desain	144,0 °C	

Perhitungan yang dilakukan berdasarkan data di atas mendapatkan volume ruang pengungkung sebesar 84.855,38 m³. Dengan melihat hasil keluaran RELAP5, diperoleh volume sistem reaktor yang dimodelkan sebesar 1.000,4 m³. Kedua hasil tersebut digunakan untuk menghitung volume ruang di dalam pengungkung selain volume sistem reaktor atau free volume yaitu sebesar 83.848,98 m³. Bila diasumsikan terdapat struktur bangunan lain di dalam pengungkung, maka volume diatas masih dikurangi lagi sehingga diasumsikan free volume pengungkung adalah sebesar 80.000 m³. Nilai tersebut masih dalam kisaran data volume yang terdapat pada WASH-1400 dimana untuk daya reaktor 2.441 MWt, digunakan pengungkung dengan volume 50.000 m³ [4]. Selain itu referensi [3] juga memberikan pedoman bahwa untuk daya reaktor 3.800 MWt digunakan volume pengungkung sebesar 96.000 m³. Dengan demikian, untuk PWR Tsuruga Unit 2 dengan daya termal 3.412 MWt, maka volume pengungkung 80.000 m³ dapat digunakan.

2.4. Kondisi Awal dan Asumsi

- Diasumsikan pipa uap utama yang berada setelah pembangkit uap pada untai 1 (atau untai A pada model) mengalami putus menjadi dua (*double-ended steam pipe break*). Luas penampang pipa uap yang putus adalah 0,3217 m²
- Luas penampang katup isolasi jalur uap utama pada untai A (MSIV-A) adalah 0,1297 m², sementara pada untai B (MSIV-B) adalah 0,3892 m².
- Katup MSIV pada ke-4 untai sistem sekunder mengalami kegagalan untuk menutup setelah kejadian kecelakaan, sementara satu katup cek pada untai 1 mengalami kegagalan.
- Nilai parameter operasi reaktor yang harus dicapai pada kondisi tunak (*steady-state*) sebelum kejadian kecelakaan ditunjukkan pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Nilai parameter operasi nominal

Parameter	Nilai
Sistem primer	
Daya termal maksimum	3411 MWt x 1,02
Tekanan <i>pressurizer</i>	157 bar
Temperatur rerata	307 °C
Temperatur <i>coldleg</i>	289 °C
Temperatur <i>hotleg</i>	325 °C
Laju alir primer	4173 kg/detik
Level air <i>pressurizer</i>	60 %
Sistem sekunder	
Tekanan uap	61,5 bar
Laju alir uap	420 kg/detik
Level air pembangkit uap	≈ 13 meter

- e. Trip reaktor akan berfungsi untuk memadamkan reaktor secara otomatis berdasarkan salah satu dari sinyal berikut:
- "Overtemperature ΔT " atau "Overpower ΔT " > 0.0
 - "Pressurizer Pressure Low" ≤ 131.1 bar
 - "A-Loop" atau "B-Loop Flow Low" $\leq 90\%$
 - "A-Loop" atau "B-Loop Steam/Feedwater Missmatch" $\geq 40.0\%$
 - "A-Loop" atau "B-Loop Level Low Low" $\leq 10.0\%$
 - "Pressurizer Level High" $\geq 92.0\%$
- f. Dua pompa tekanan tinggi dari sistem pendingin reaktor darurat (*Emergency Reactor Coolant System / ECCS*) diasumsikan berfungsi berdasarkan salah satu dari sinyal berikut:
- "Pressurizer Level Low" $\leq 0.0\%$
 - "Pressurizer Pressure Low" ≤ 115.8 bar
 - "Steam Generator Pressure Low" ≤ 42.19 bar
 - "A-Loop" atau "B-Loop Average Temperature" ≤ 282.78 °C
- g. Daya listrik *offsite* diasumsikan tidak hilang saat terjadi kecelakaan putusnya jalur uap.

- h. Tindakan operator selanjutnya antara lain untuk memulai pendinginan instalasi (*plant cooldown*) untuk meminimalkan konsekuensi setelah trip reaktor diasumsikan tidak dilakukan dalam analisis ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Laju alir uap meningkat drastis pada tahap-tahap awal putusnya jalur uap akibat terlepasnya energi sistem sekunder ke lingkungan dengan tekanan atmosfer yang lebih rendah. Hal tersebut diikuti dengan naiknya level air pembangkit uap yang kemudian membangkitkan sinyal untuk menutup katup MSIV secara otomatis walaupun gagal. Penurunan tekanan sekunder yang terjadi setelahnya, mengakibatkan timbulnya sinyal ECCS untuk bekerja. Sinyal ECCS tersebut juga merupakan sinyal bagi pompa primer untuk berhenti, pompa air umpan utama untuk berhenti, sinyal aktuasi *motor-driven Auxiliary Feedwater (AFW)*, dan sinyal katup bypass turbin (*Turbine bypass Valve/TBV*) untuk membuka. Perubahan pada daya teras dan temperatur rata-rata teras mengakibatkan timbulnya sinyal "Overpower ΔT " untuk men-trip reaktor.

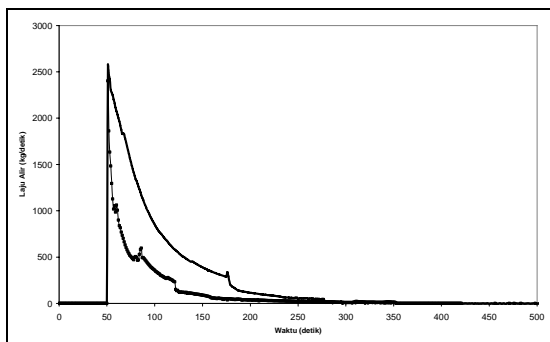
Tabel 3. Perbandingan Sekuensi Kejadian Putusnya Jalur Uap di Dalam dan di Luar Pengungkung

Di Dalam Pengungkung		Di Luar Pengungkung [1]	
Waktu (detik)	Sekuensi	Waktu (detik)	Sekuensi
51,0	Jalur uap putus	51,0	Jalur uap putus
52,17	Sinyal aktuasi ECCS (<i>A-SteamGenerator Pressure Low</i>)	57,8	Sinyal trip reaktor (<i>Overpower ΔT</i>)
54,20	- Sinyal pompa primer stop - Sinyal air umpan utama trip - Sinyal aktuasi motor-driven AFW - Katup TBV buka (dari sinyal ECCS)	60,6	Sinyal aktuasi ECCS (<i>A-Steam Generator Pressure Low</i>)
55,2	Sinyal trip reaktor (<i>Overpower</i>) - Katup TBV tutup	61,8	- Trip reaktor - Pompa MFW stop - Katup TBV buka
69,25	Injeksi ECCS ke sistem primer	62,65	- Sinyal aktuasi M-AFW - Sinyal RCP stop - Katup TBV tutup
80,60	Sinyal aktuasi turbine-driven AFW (dari sinyal level S/G rendah sekali)	76,0	Sinyal aktuasi T-AFW
114,25	<i>motor-driven</i> AFW beroperasi	77,7	Injeksi ECCS ke sistem primer
140,60	<i>turbine-driven</i> AFW beroperasi	122,7	<i>motor-driven</i> AFW beroperasi
235,85	Air <i>Pressurizer</i> kosong	136,05	<i>turbine-driven</i> AFW beroperasi
1996,35	PORV <i>Pressurizer</i> buka tutup (Tekanan $> 164,2$ bar)	406,9	Air <i>Pressurizer</i> kosong
2000,0	Akhir simulasi	438,0	Air <i>Pressurizer</i> terisi
		500,0	Akhir simulasi

Penurunan level pembangkit uap secara terus menerus mengakibatkan timbulnya sinyal aktuasi *turbine-driven* AFW untuk mengkompensasi hilangnya inventori air pembangkit uap. Kontraksi sistem primer mengakibatkan penurunan level air di dalam *pressurizer* yang terjadi hingga ke level terendah. Injeksi dari ECCS kemudian kembali menaikkan inventori sistem primer bahkan hingga terbukanya katup *Power Operated Relief Valve* (PORV) pada *pressurizer*. Tabel 3 menunjukkan sekuensi kejadian di atas ditambah dengan hasil sekuensi putusnya jalur uap di luar pengungkung sebagai pembanding.

3.1. Laju Alir Bocoran

Setelah perhitungan kondisi tunak selama 50 detik, laju alir uap pada untai A berada pada kisaran 500 kg/detik, sementara untai B pada kisaran 1.500 kg/detik. Pada detik ke-51, katup bocoran pada pipa uap untai A dan katup bocoran pada pipa uap untai B dibuka. Pada saat-saat awal terjadi putusnya jalur uap, laju alir kebocoran dari untai A adalah sebesar 2403 kg/detik, sementara dari untai B sebesar 2568 kg/detik. Laju alir bocoran tersebut relatif sama karena aliran uap dari untai A tidak melewati katup MSIV dengan luas penampang yang lebih kecil dari luas penampang pipa uap. Karakter tersebut jelas berbeda dengan aliran kebocoran di luar pengungkung dimana laju alir bocoran dari untai B lebih tinggi tiga kali dari untai A [1]. Gambar 3 menampilkan karakter kebocoran pipa uap di untai A dan B di atas hingga detik ke-500. Laju alir kebocoran kemudian menurun perlahan seiring dengan kontraksi tekanan sekunder.

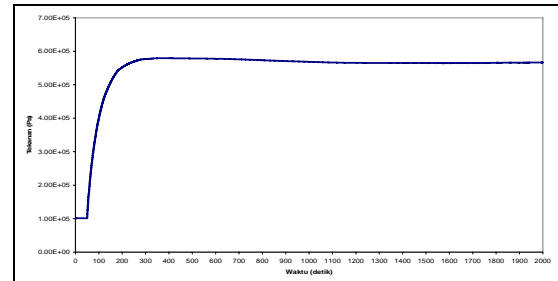


Gambar 3: Laju Alir Kebocoran Uap pada Untai A dan B

3.2. Tekanan Pengungkung

Laju alir uap yang keluar dari putusnya jalur pipa mengakibatkan peningkatan tekanan di pengungkung. Hasil simulasi menunjukkan terjadi peningkatan tekanan dari 1 bar hingga 5,7 bar dalam waktu 300 detik. Kenaikan tekanan tersebut melampaui tekanan desain pengungkung yaitu 4,0 bar. Dengan demikian pada kasus ini, diperlukan sistem pendinginan pengungkung yang harus

sudah bekerja sebelum tekanan pengungkung mendekati tekanan desain. Tekanan pengungkung kemudian berada pada kondisi stabil bahkan menurun seiring dengan berhentinya laju alir kebocoran. Gambar 4 menunjukkan perubahan tekanan di dalam pengungkung tersebut.



Gambar 4: Perubahan Tekanan di Dalam Pengungkung

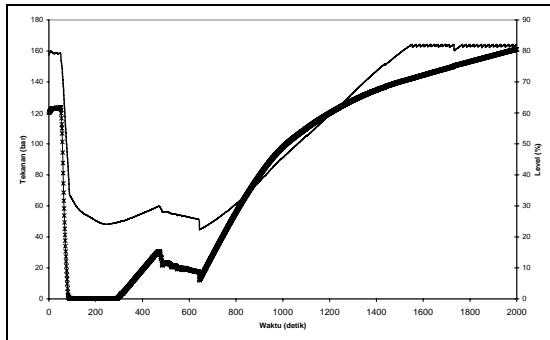
3.3. Level Air dan Tekanan Pembangkit Uap

Peningkatan laju kebocoran pada tahap awal menaikkan level air pembangkit uap yang kemudian membangkitkan sinyal "*Steam Generator Narrow Range Water Level High*" yang merupakan sinyal bagi katup MSIV untuk menutup. Pada kasus ini, seluruh katup MSIV diasumsikan gagal menutup. Tekanan sekunder pada untai A dan B pada saat kebocoran menurun drastis akibat pembuangan uap secara berlebihan. Penurunan tekanan tersebut kemudian memicu sinyal aktuasi ECCS. Bila dibandingkan dengan putus jalur uap di luar pengungkung, penurunan tekanan sekunder terlihat lebih cepat yaitu dalam waktu 100 detik sejak terjadi kebocoran. Penurunan tekanan sekunder untai A juga terlihat lebih cepat daripada tekanan sekunder di untai B. Tekanan uap kemudian mencapai kondisi kesetimbangan dengan tekanan di dalam pengungkung yaitu pada kisaran 5 bar.

3.4. Tekanan dan Level Air *Pressurizer*

Setelah jalur uap putus, tekanan primer langsung turun drastis dari nilai nominal 157 bar ke nilai 55 bar yang diikuti dengan penurunan level *pressurizer*. Fenomena tersebut berbeda dengan putusnya jalur uap di luar pengungkung, dimana tekanan primer mulai turun setelah reaktor trip dengan penurunan tekanan lebih besar hingga ke nilai 37 bar [1]. Perubahan tekanan tersebut diikuti dengan perubahan level air *pressurizer* yang turun hingga ke level paling bawah atau *pressurizer* kosong. Level air *pressurizer* kemudian naik lagi seiring dengan bertambahnya masuknya air injeksi ECCS ke sistem primer. Tekanan primer juga ikut naik hingga mengakibatkan terbuka tutupnya katup PORV dari *pressurizer*.

Untuk menghindari hal tersebut, diperlukan tindakan operator untuk menghentikan injeksi air dari sistem ECCS ke sistem primer. Dari fenomena tersebut terlihat bahwa efek pendinginan atau kontraksi sistem primer akibat pembuangan energi secara berlebihan ke sistem sekunder terjadi lebih spontan pada putusnya jalur uap di dalam pengungkung. Gambar 5 menampilkan perubahan tekanan dan level air *pressurizer* tersebut.



Gambar 5: Perubahan Tekanan dan Level *Pressurizer*

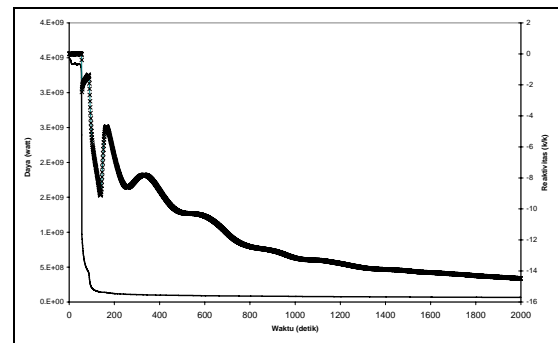
3.5. Kondisi Sistem Primer dan Teras

Kontraksi sistem primer yang ditunjukkan pada penurunan tekanan primer dan level *pressurizer* hingga kosong, juga menyebabkan bagian atas bejana tekan (*upper dome*) menjadi kosong. Hilangnya air di bagian atas bejana tekan tersebut terjadi hingga detik ke-450, walaupun level air *pressurizer* sudah mulai naik dari injeksi ECCS. Selain itu juga terjadi pembentukan gelembung (*void*) di bagian kanal bahan bakar di teras sebelum injeksi air ECCS mulai memasuki sistem primer. Gelembung tersebut kemudian menghilang seiring dengan bertambahnya inventori air pendingin dari suplai injeksi ECCS.

3.6. Perubahan Daya dan Reaktivitas

Pendinginan teras mengakibatkan reaktivitas positif pada moderator sehingga secara teori terjadi kenaikan reaktivitas teras dan daya termal reaktor. Namun dalam kasus ini, daya termal reaktor terlihat tidak mengalami perubahan berarti dari nilai nominal 3.396 MWt karena digunakan daya teras maksimum dalam input data. Selain itu terjadi kenaikan reaktivitas teras walaupun tidak begitu signifikan dan jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan kenaikan reaktivitas pada kasus putusnya jalur uap di luar pengungkung [1]. Setelah trip reaktor, reaktivitas turun drastis, namun sempat ada kenaikan secara fluktuatif walaupun dengan kecenderungan semakin menurun. Fluktuasi tersebut diperkirakan akibat fluktuasi temperatur fluida masuk teras yang mempengaruhi densitas pendingin dan pengaruh Doppler bahan bakar, selain karena pembentukan

gelembung di kanal bahan bakar. Gambar 6 menunjukkan perubahan daya teras dan reaktivitas tersebut.



Gambar 6: Perubahan Daya dan Reaktivitas Teras

4. KESIMPULAN

Akibat kecelakaan putusnya jalur uap di dalam pengungkung, pendinginan teras reaktor secara berlebihan menimbulkan kenaikan reaktivitas teras walaupun sangat kecil sementara daya teras relatif tidak berubah. Kontraksi sistem primer mengakibatkan penurunan level air di *pressurizer* hingga kosong dan penurunan temperatur rata-rata teras. Kontraksi juga menyebabkan kosongnya bagian atas bejana tekan dan timbulnya gelembung di kanal bahan bakar yang kemudian menghilang setelah bertambahnya suplai air dari injeksi keselamatan (ECCS) ke sistem primer. Dengan demikian, pengaruh putusnya jalur uap di dalam pengungkung lebih terfokus kepada kenaikan tekanan pengungkung yang dapat melebihi tekanan desain.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. ANDI SOFRANY E, "Analisis Putusnya Jalur Uap di Luar Pengungkung pada PWR", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir II, Jakarta, 25 Juni 2009.
2. NUCLEAR POWER ENGINEERING CORPORATION (NUPEC), "PWR Safety Analysis Training Text", Long Term Training Course on Safety Regulation and Safety Analysis, September – December 1997, Tokyo, Japan
3. T. KURODA, et al, "Recent Advances in Concrete Containment Vessels in Japan", Nuclear Engineering and Design, Elsevier Science Publishers, 1993
4. US-NRC, "Reactor Safety Study-An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants", WASH-1400, NUREG 75/014, Oktober 1975.

TANYA JAWAB