

EVALUASI KESELAMATAN REAKTOR TIPE PWR PADA KECELAKAAN PUTUSNYA JALUR UAP UTAMA

Oleh

Andi Sofrany Ekariansyah
Pusat Teknologi Reaktor Keselamatan Nuklir—BATAN

ABSTRAK

EVALUASI KESELAMATAN REAKTOR TIPE PWR PADA KECELAKAAN PUTUSNYA JALUR UAP UTAMA. Kecelakaan Putusnya Jalur Uap Utama (*Main Steam Line Break Accident*) merupakan salah satu jenis Kecelakaan Basis Desain (DBA). Kecelakaan ini perlu dianalisis dan dievaluasi dalam desain untuk menetapkan persyaratan kinerja struktur, sistem dan komponen reaktor. Pada umumnya, efek serius yang perlu diperhatikan dalam kecelakaan ini adalah kemungkinan terjadinya kondisi *return to power* dan *high local power peaking* yang dapat merusak batang bahan bakar. Berbeda dengan kecelakaan DBA lain, seperti LOCA misalnya, kecelakaan ini dapat terjadi di dalam pengungkung dan dapat pula terjadi di luar pengungkung. Terdapat sekuensi dan dampak yang berbeda dari kedua skenario kecelakaan tersebut terhadap reaktor. Makalah ini mengevaluasi hasil simulasi dan perhitungan kecelakaan ini dengan menggunakan RELAP5/SCDAP/Mod3.2. Berdasarkan hasil evaluasi dapat diidentifikasi dan dibandingkan dampak-dampak kritis terhadap reaktor antara kejadian di dalam pengungkung dan di luar pengungkung.

Kata Kunci: evaluasi, PWR, putus jalur uap

ABSTRACT

SAFETY EVALUATION OF PWR REACTOR FOLLOWING THE MAIN STEAM BREAK ACCIDENT. *Main steam line break accident is a design basis accident in the safety assessment of power reactor. This kind of accident needs to be analyzed and evaluated in the design stage in order to determine structure, system, and component performance requirements. Generally, significant effects to be considered are the possibility of return of power and high local power peaking, which affect the structural integrity of fuel rods. Main steam line break can be occurred inside the containment or outside the containment, with different scenario and impact on the reactor safety. This paper presents the results of simulation and calculation of both cases using the RELAP5/SCDAP/Mod3.2 computer codes. The evaluations are focused on identification and comparison of the critical impacts on the reactor due to the events occurring inside and outside the containment.*

Keywords: evaluation, PWR, steam line break

PENDAHULUAN

Kecelakaan Putusnya Jalur Uap Utama (*Main Steam Line Break Accident*) merupakan salah satu Kecelakaan Basis Desain (*Design Basis Accident-DBA*) yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan serius dalam reaktor. Sebagai sebuah DBA, kecelakaan ini merupakan kecelakaan yang dipostulasikan terjadi dan perlu dianalisis serta dievaluasi dalam desain untuk menetapkan

persyaratan kinerja struktur, sistem dan komponen reaktor. Hasil analisis dan evaluasi harus termuat dalam Laporan Analisis Keselamatan, yang mana laporan ini merupakan sebuah dokumen yang dipersyaratkan dalam proses perijinan reaktor.

Pada umumnya, efek serius yang perlu diperhatikan dalam kecelakaan ini adalah kemungkinan terjadinya kondisi *return to power* dan *high local power peaking* yang dapat merusak batang bahan bakar. Terdapat berbagai perangkat lunak yang

digunakan untuk mempelajari kecelakaan ini, beberapa di antaranya sudah di verifikasi dalam kegiatan "OECD Main Steam Line Break Benchmark" ⁽¹⁾. Dalam makalah ini, evaluasi dilakukan terhadap hasil perhitungan RELAP5/SCDAP/Mod3.2 untuk reaktor daya tipe PWR standar Jepang (Reaktor Tsuruga Unit 2) ^(2,3).

Berbeda dengan kecelakaan DBA Kehilangan Kehilangan Pendingin (LOCA) yang terjadi dalam pengungkung, Kecelakaan Putusnya Jalur Uap Utama dapat terjadi di dalam pengungkung reaktor dan dapat pula terjadi di luar pengungkung reaktor. Terdapat sekuensi dan dampak yang berbeda dari kedua skenario kecelakaan tersebut terhadap reaktor.

Makalah ini membahas tentang evaluasi keselamatan reaktor daya PWR terhadap kecelakaan putusnya jalur uap utama dan membandingkan hasil simulasi antara putusnya jalur uap di dalam pengungkung dengan di luar pengungkung. Evaluasi ini penting dilakukan untuk melihat tingkat resiko di antara kejadian yang terjadi dalam pengungkung dan di luar pengungkung. Selain sebagai bagian dari isi Laporan Analisis Keselamatan, hasil evaluasi juga digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam manajemen keselamatan PLTN tipe PWR.

DESKRIPSI DAN PEMODELAN KECELAKAAN

Deskripsi Kecelakaan

Kecelakaan Putusnya Jalur Uap Utama didefinisikan sebagai kecelakaan yang terjadi akibat putusnya sistem pemipaan jalur uap utama. Kecelakaan ini dapat terjadi di dalam pengungkung (sebelum Katup Isolasi Uap Utama / MSIV) atau di luar pengungkung (setelah Katup Isolasi Uap Utama / MSIV). Putusnya jalur uap utama menyebabkan

terlepasnya uap secara tak terkendali dari pembangkit uap (*Steam Generator*). Uap yang terlepas akan terakumulasi di dalam pengungkung apabila jalur pipa putus di dalam pengungkung atau tersebar di sistem sekunder apabila jalur pipa putus di luar pengungkung.

Terlepasnya uap secara tak terkendali di jalur pipa sekunder mengakibatkan terjadinya pemindahan energi yang berlebihan dari sistem primer ke sistem sekunder. *Return to power, re-criticality* dan *departure from nucleate boiling* (DNB) merupakan kejadian yang perlu dipantau selama transien yang terjadi dalam kecelakaan tersebut. Pendinginan yang berlebihan dalam sistem primer (moderator) akibat mengalirnya pendingin sekunder (uap) secara deras pada tempat yang bocor, mengakibatkan terjadinya peningkatan reaktivitas dan daya reaktor sebagai efek dari *negative moderator coefficient reactivity*. Peningkatan daya dalam reaktor memicu tindakan *scram*, akan tetapi karena proses pendinginan sistem primer terus berlangsung, maka *re-criticality* dapat terjadi kembali dan selanjutnya memicu kejadian *return to power*.

Tindakan mitigasi dilakukan oleh sistem keselamatan teknik reaktor (*Engineered Safety Features*) melalui *alarm* tekanan rendah pada *pressurizer* dan pembangkit uap, *alarm* level air rendah pada pembangkit uap atau *alarm* daya reaktor tinggi. Komponen mitigasi yang dapat mencegah pengaruh lepasnya uap adalah katup isolasi jalur uap utama yang terdapat pada setiap jalur uap utama setelah pembangkit uap. Bila sekuensi berlanjut, *trip* reaktor sebagai konsekuensi dari putusnya jalur uap dapat dipicu oleh beberapa sinyal seperti tekanan pembangkit uap rendah atau tekanan sistem pendingin reaktor rendah atau level air pembangkit uap rendah atau daya reaktor tinggi.

Deskripsi Computer Code Yang Digunakan Dalam Analisis

RELAP/SCDAP 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. Program ini dikembangkan dari model *node* dan *junction* satu dimensi untuk menghitung keseluruhan perilaku termohidraulika sistem pendingin.

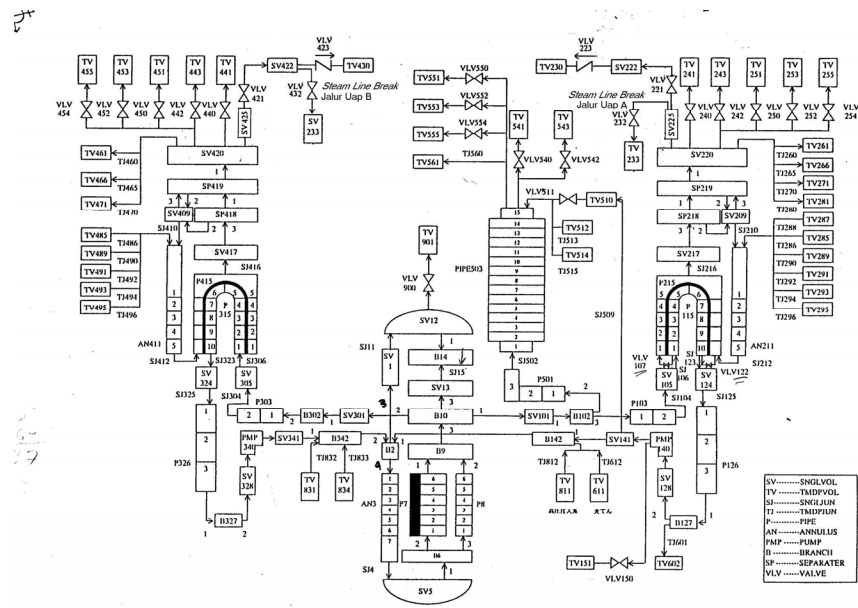
Model-model yang digunakan merupakan model hidrodinamika *non-equilibrium* dan *non-homogeneous* sistem fluida multifasa. Komponen hidrodinamika dapat memodelkan *single volumes*, *time-dependent volumes*, pipa, anulus, percabangan, akumulator, maupun pompa. Setiap model hidrodinamika saling terhubung dengan model *junction*, baik berupa *time-dependent junction*, *single/multiple-junction*, atau katup. Struktur panas (*heat structure*) terdapat pada komponen pembangkit panas, termasuk teras, maupun pada bagian dimana

terjadi perpindahan panas yang dihubungkan dengan komponen hidrodinamika.

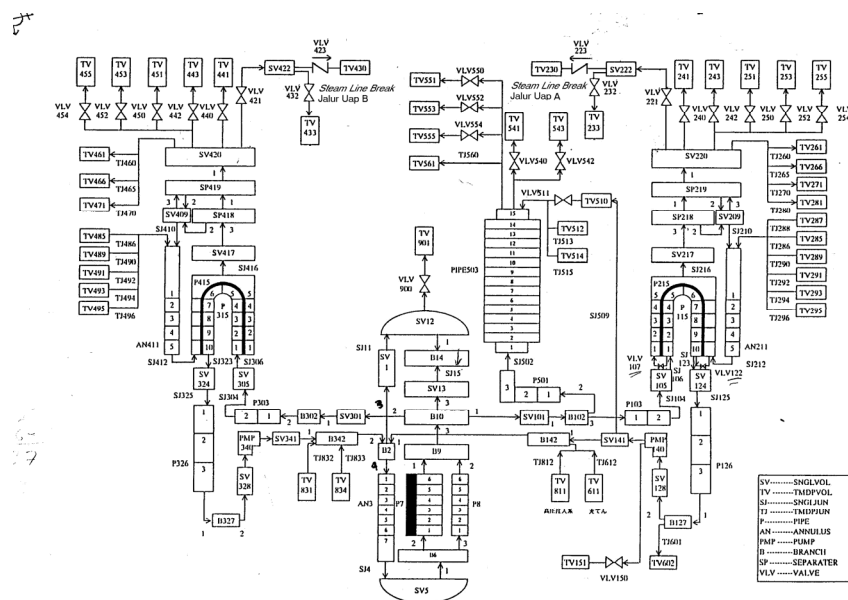
Inisial SCDAP memperlihatkan kemampuan RELAP dalam menghitung perilaku teras dan struktur bejana reaktor dalam kondisi normal dan kecelakaan khusus untuk reaktor daya. Model SCDAP juga mencakup model untuk mengolah tahap akhir suatu kecelakaan parah, termasuk pembentukan debris dan kolam lelehan, interaksi debris-bejana, dan kegagalan struktur bejana.

Pemodelan Kecelakaan

Sebagai objek studi, pembahasan dalam makalah ini mengacu pada reaktor daya PWR standar Jepang (Reaktor Tsuruga Unit 2). Reaktor PWR Standar Jepang memiliki daya 1160 MWe, terdiri dari 4 untai pendingin primer yang masing-masingnya terkoneksi dengan sistem pendingin sekunder melalui sebuah pembangkit uap (*steam generator*). Reaktor, sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder dimodelkan menggunakan *code computer* RELAP5/SCDAP/Mod3.2 dalam bentuk komponen-komponen hidrodinamik sebagai *nodal partition* dengan membagi 4 untai pendingin



Gambar 1. Nodalisasi PWR dengan Pemodelan Putusnya Jalur Uap Utama di Dalam Pengungkung



Gambar 2. Nodalisasi PWR dengan Pemodelan Putusnya Jalur Uap Utama di Luar Pengungkung

primer 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 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. Khusus untuk sistem kendali terdiri dari sistem kendali tekanan *pressurizer*, sistem kendali level air *pressurizer*, sistem kendali air umpan, sistem kendali *bypass* turbin, dan sistem kendali katup pembebas (*relief*) uap utama. Pada sistem uap utama, dimodelkan katup penghenti turbin (*Turbine Stop Valve / TSV*). Untuk mengakomodasi kejadian kecelakaan putusnya jalur uap, katup tersebut dianggap sebagai katup isolasi uap utama (*Main Steam Isolation Valve / 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 pada untai B diwakili oleh 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 dimodelkan sebagai komponen *single volume* (SV) 233 dengan tekanan 1,0 bar dan volume pengungkung sebesar 80000 m³. Dengan demikian dapat diketahui peningkatan tekanan di dalam pengungkung akibat masuknya aliran uap. Hasil nodalisasi yang digunakan dalam simulasi kecelakaan di dalam pengungkung ditunjukkan pada Gambar 1.

Untuk kecelakaan di luar pengungkung, katup trip (VLV 232) yang mewakili lokasi keluaran bocoran uap dimodelkan setelah katup penghenti turbin. Lokasi keluaran bocoran uap dari untai A dan B dimodelkan sebagai komponen *time-dependent volume* (TV) 233 dengan tekanan 1,0 bar. Gambar 2 menunjukkan nodalisasi putusnya jalur uap di luar pengungkung.

Dalam simulasi ini, kondisi awal dan asumsi ditetapkan sebagai berikut:

1. Diasumsikan pipa uap utama yang berada setelah pembangkit uap pada untai A dan B mengalami putus menjadi dua (*double-ended steam pipe break*).
2. Katup isolasi uap utama untai A dan B gagal menutup akibat kegagalan mekanik setelah kejadian.
3. Nilai parameter operasi reaktor yang harus dicapai pada kondisi tunak (*steady-state*) sebelum kejadian kecelakaan ditunjukkan pada Tabel 1, dan data teknis pengungkung diberikan pada Tabel 2.
4. Trip reaktor akan berfungsi untuk memadamkan reaktor secara otomatis.
5. Daya listrik *offsite* diasumsikan tidak hilang saat terjadi kecelakaan putusnya jalur uap. Komponen utama yang bergantung pada daya listrik *offsite* antara lain Pompa Pendingin Primer, Katup Isolasi Uap Utama, dan Pompa Air Umpan Utama.
6. Dua pompa tekanan tinggi diasumsikan berfungsi sebagai bagian dari sistem pendingin reaktor darurat (*Emergency Reactor Coolant System / ECCS*) sedangkan dua dari tiga pompa penyuplai air umpan bantu juga diasumsikan beroperasi.

Tabel 1. Nilai parameter operasi nominal

| Parameter | Nilai |
|------------------------------|-------------------|
| Sistem primer | |
| Daya termal/listrik | 3411 MWt/1000 MWe |
| Tekanan <i>pressurizer</i> | 157 bar |
| 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 |

Tabel 2. Data Teknis Pengungkung PWR Tsuruga Unit 2 ^[4]

| 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 | |

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Sekuensi Kecelakaan di Dalam dan di Luar Pengungkung

Pada kecelakaan di dalam pengungkung, laju alir uap meningkat drastis pada tahap-tahap awal putusnya jalur uap akibat terlepasnya energi sistem sekunder ke pengungkung 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. 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*

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

| Di Dalam Pengungkung ^[1] | | Di Luar Pengungkung ^[2] | |
|-------------------------------------|---|------------------------------------|--|
| Waktu (detik) | Sekuensi | Waktu (detik) | Sekuensi |
| 51,0 | Jalur uap putus | 51,0 | Jalur uap putus |
| 52,17 | Sinyal aktuasi ECCS (A- <i>Steam Generator 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 (A- <i>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 | motor-driven AFW beroperasi | 77,7 | Injeksi ECCS ke sistem primer |
| 140,60 | turbine-driven AFW beroperasi | 122,7 | motor-driven AFW beroperasi |
| 235,85 | Air <i>Pressurizer</i> kosong | 136,05 | turbine-driven 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 |

Operated Relief Valve (PORV) pada *pressurizer*.

Pada kecelakaan di luar pengungkung, laju alir uap meningkat drastis 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. Menutupnya katup MSIV juga merupakan sinyal bagi pompa air umpan utama (MFW) untuk berhenti dan katup *bypass* turbin (TBV) untuk membuka. Sementara itu juga terjadi perubahan tekanan sekunder pada untai A dan untai B, dimana perubahan tersebut memicu sinyal pada sistem keselamatan teknis (ECCS) yaitu "*Steam Pressure Difference*" sebagai sinyal pompa injeksi ECCS untuk beroperasi pada T=55,9 detik. Sinyal beroperasinya ECCS kemudian memicu sinyal

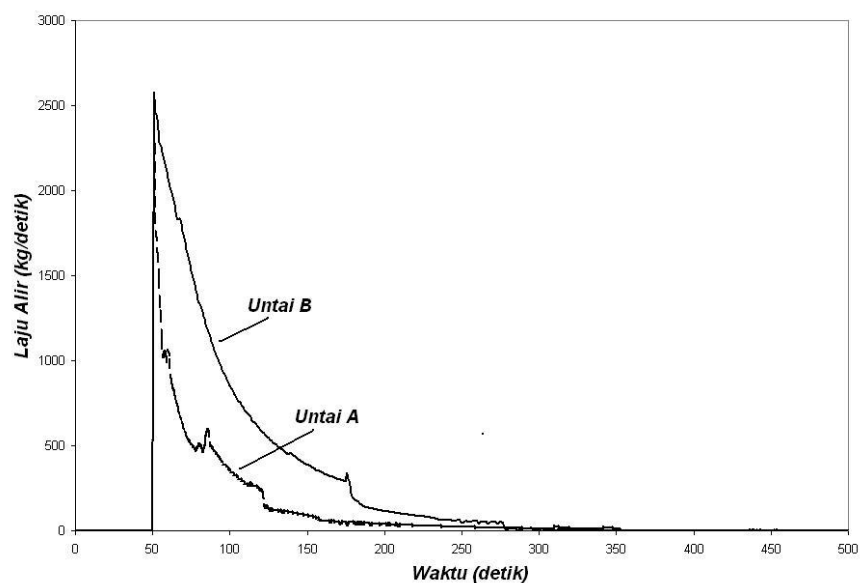
lainnya seperti pompa sistem air umpan bantu (AFW) untuk beroperasi, katup *bypass* turbin untuk menutup kembali, dan pompa pendingin primer untuk berhenti. Setelah sinyal aktuasi ECCS, kondisi "*Daya Lebih*" yaitu kenaikan daya teras reaktor memicu sinyal trip reaktor pada T=57 detik yang baru bekerja pada T= 61,4 detik. Sinyal trip reaktor juga merupakan sinyal berhentinya pompa MFW dan membukanya katup TBV. Pompa injeksi ECCS baru bekerja penuh pada T= 60,6 detik dari sinyal "*Tekanan Pembangkit Uap Rendah*" diikuti dengan pompa sistem AFW mengisi sisi sekunder pembangkit uap.

Secara rinci, perbandingan sekuensi kejadian di dalam dan di luar pengungkung diberikan pada Tabel 3.

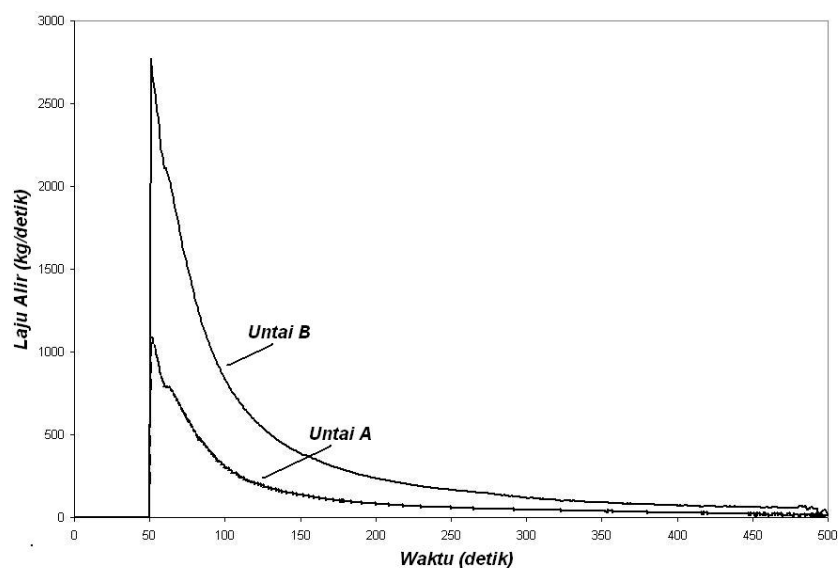
Laju Bocoran

Pada saat-saat awal terjadi putusnya jalur uap di dalam pengungkung, 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. Sementara pada laju bocoran pada putusnya jalur uap di luar pengungkung, laju alir uap awal yang bocor dari pipa

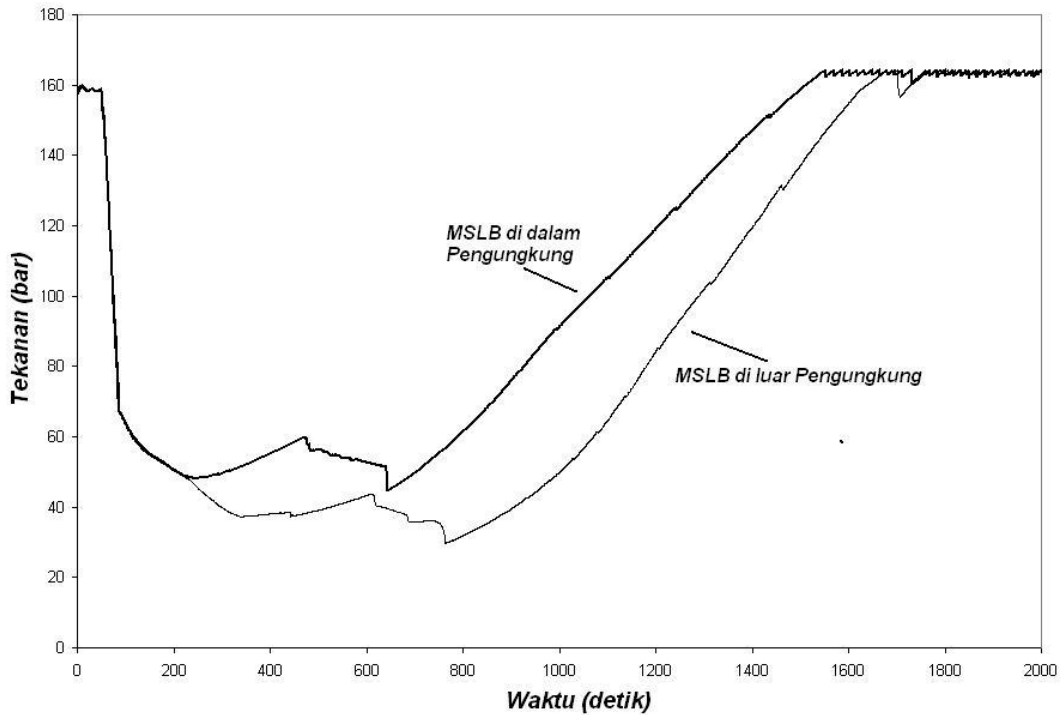
A adalah sebesar 995 kg/detik sementara dari pipa B sebesar 2.700 kg/detik. Laju alir dari pipa A lebih kecil dari pipa B karena luas penampang katup MSIV untai A yang masih terbuka juga lebih kecil daripada katup MSIV untai B. Dengan demikian terdapat perbedaan karakter laju bocoran antara kedua kasus. Laju alir kebocoran kemudian menurun perlahan seiring dengan kontraksi tekanan sekunder. Gambar 3a dan 3b menunjukkan grafik laju aliran kebocoran untuk kejadian di dalam dan di luar pengungkung.



3a: Laju Alir Kebocoran Uap pada Untai A dan B pada kejadian di dalam pengungkung



Gambar 3b: Laju Alir Kebocoran Uap pada Untai A dan B pada kejadian di luar pengungkung



Gambar 4: Perbandingan Perubahan Tekanan Primer pada Putus Jalur Uap di Dalam Pengungkung dan di Luar Pengungkung

Perubahan Tekanan Primer

Pada kejadian di dalam pengungkung, tekanan primer langsung turun drastis dari nilai nominal 157 bar ke nilai 55 bar yang diikuti dengan penurunan level *pressurizer*. 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*.

Pada kejadian di luar pengungkung, tekanan primer tidak jauh berubah dari nilai nominal 157 bar setelah jalur uap putus kemudian turun drastis setelah reaktor trip ke nilai 37 bar. Perubahan tekanan tersebut diikuti dengan perubahan level air yang terjadi di *pressurizer* dimana level air *pressurizer*

turun hingga ke level paling bawah atau *pressurizer* kosong. Level air *pressurizer* kemudian naik lagi seiring dengan masuknya air injeksi ECCS ke sistem primer. Perubahan tersebut merupakan efek pendinginan atau kontraksi sistem primer akibat pembuangan energi secara berlebihan ke sistem sekunder dengan semua katup MSIV gagal.

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 4 menunjukkan perbandingan perubahan tekanan primer pada kedua kasus.

Perubahan Reaktivitas

Pada kejadian di dalam pengungkung, 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. 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.

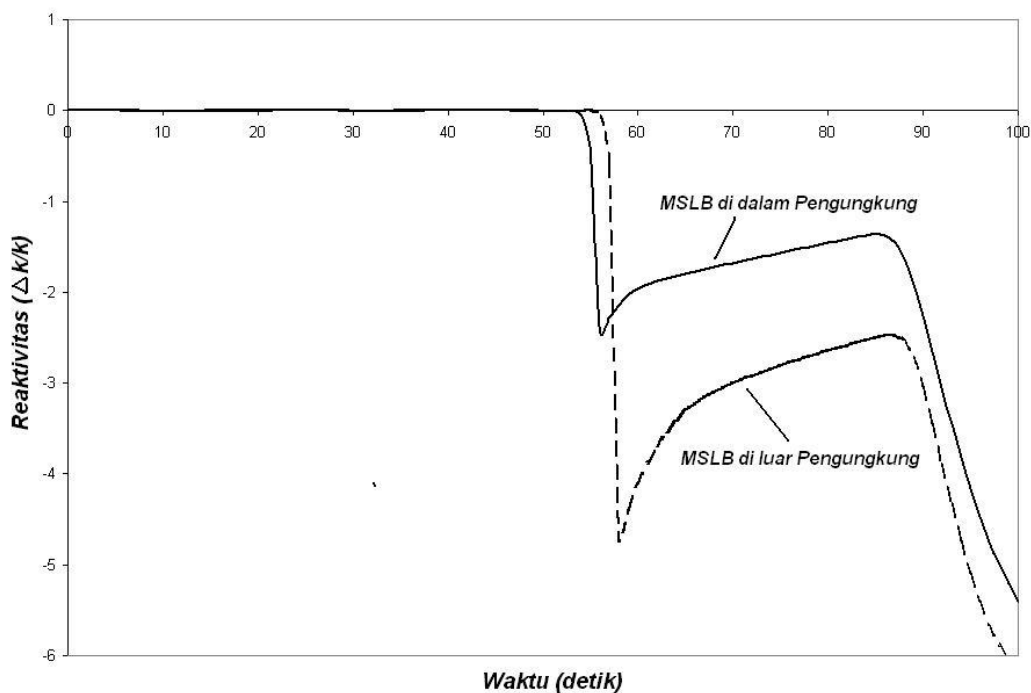
Hal yang sama juga terlihat pada kejadian di luar pengungkung, dimana kenaikan reaktivitas tidak terlihat signifikan seperti terlihat pada Gambar 5. Sebelum *trip* reaktor, reaktivitas naik hingga nilai tertinggi yaitu 0,000872 $\Delta k/k$. Setelah trip reaktor, reaktivitas turun drastis, namun sempat ada kenaikan secara fluktuatif walaupun dengan kecenderungan semakin menurun. Sementara itu daya teras juga

mengalami kenaikan hingga 3.830 MWt dari nilai normalnya sebesar 3,408 MWt yang menyebabkan terpicunya sinyal trip reaktor.

Secara umum, kenaikan reaktivitas yang terjadi sesaat setelah putusnya jalur uap terhitung lebih besar pada kasus putusnya jalur uap di luar pengungkung dibandingkan dengan di dalam pengungkung, walaupun kenaikan reaktivitas setelah trip reaktor terjadi lambat yang lebih disebabkan oleh perubahan densitas pendingin pada kanal rerata bahan bakar. Gambar 5 menunjukkan perbandingan perubahan reaktivitas antara kejadian putusnya jalur uap di dalam dan di luar pengungkung.

KESIMPULAN

Sekuensi kejadian setelah putusnya jalur uap di dalam pengungkung terlihat tidak jauh berbeda dengan kejadian di luar pengungkung. Namun secara umum efek pendinginan akibat putusnya jalur uap di dalam pengungkung terlihat lebih signifikan



Gambar 5: Perubahan Reaktivitas pada Putus Jalur Uap di Dalam Pengungkung dan di Luar Pengungkung

dibandingkan dengan di luar pengungkung. Selain itu juga ada potensi resiko lain yaitu kenaikan tekanan pengungkung yang dapat melebihi tekanan desain. Efek pendinginan berupa kontraksi sistem primer dan penurunan level pressurizer dapat diantisipasi dengan bekerjanya injeksi keselamatan melalui ECCS. Dengan demikian dari aspek keselamatan, bekerjanya sistem proteksi reaktor yang memancing reaktor dan bekerjanya suplai air ECCS untuk mengisi sistem primer dapat menjaga teras pada kondisi aman yaitu tidak terjadinya *return-to-power* atau rekritikalitas sesuai dengan kriteria keselamatan yang harus dipenuhi .

DAFTAR PUSTAKA

1. TODOROVA, N., TAYLOR, B., IVANOV, K., "MSLB Benchmark; Volume III: Result of Phase 2 on 3D Core Boundary Conditions Model", NEA/NSC/DOC(2002) 12, June 2002
2. ANDI S. EKARIANSYAH, "Analisis Kecelakaan Putusnya Jalur Uap di Dalam Pengungkung pada PWR, dipresentasikan pada Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir (SNTKPFN 15), Surakarta, 17 Oktober 2009
3. ANDI S EKARIANSYAH, Analisis Kecelakaan Putusnya Jalur Uap di Luar Pengungkung pada PWR, dipresentasikan pada Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir, Jakarta 25 Juni 2009.
4. T. KURODA, et al, "Recent Advances in Concrete Containment Vessels in Japan", Nuclear Engineering and Design, Elsevier Science Publishers, 1993