

---

## ANALISIS KEJADIAN *STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE (SGTR)* BERDASARKAN SKENARIO MIHAMA UNIT 2

Andi Sofrany E, Surip Widodo  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong, Gedung 80, Tangerang, 15310

Diterima editor 21 Desember 2009  
Disetujui untuk dipublikasi 25 Pebruari 2010

### ABSTRAK

**ANALISIS KEJADIAN *STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE (SGTR)* BERDASARKAN SKENARIO MIHAMA UNIT 2.** Pada tanggal 9 Februari 1991, terjadi kecelakaan putusnya pipa pemanas pembangkit uap (*Steam Generator Tube Rupture/SGTR*) pada PLTN Mihama Unit 2. Dari kejadian tersebut, diperoleh catatan sekuensi kecelakaan berupa aktuasi sistem proteksi dan fitur keselamatan terekayasa dalam memitigasi kebocoran dari sistem primer ke sistem sekunder. Urutan sekuensi tersebut kemudian diterapkan pada PWR standar Jepang untuk disimulasikan menggunakan program perhitungan RELAP5/SCDAP/Mod3.2. Tujuannya untuk mengevaluasi konsekuensi yang terjadi bila kecelakaan tersebut terjadi pada PWR standar Jepang. Parameter yang dibandingkan adalah laju alir kebocoran, perubahan tekanan primer dan sekunder dan perubahan level di dalam *pressurizer*. Hasil simulasi menunjukkan perbedaan lama waktu kejadian SGTR hingga berhentinya kebocoran yang berlangsung lebih pendek pada PWR standar Jepang. Selain itu jumlah pendingin primer yang bocor dan jumlah uap yang terlepas dari MSRVR tercatat lebih besar daripada PWR Mihama unit 2. Karakter aliran kebocoran, fluktuasi tekanan primer, dan *level pressurizer* sedikit berbeda pada tahap-tahap awal kejadian, namun relatif sama pada tahap akhir ketika aliran kebocoran dapat dihentikan. Hasil simulasi juga menunjukkan perlunya tindakan operator secara manual yang ditunjukkan dari isolasi sistem air umpan bantu (AFW) pada pembangkit uap yang bocor, aktuasi katup pelepas uap (MSRV) pada pembangkit uap yang utuh dan aktuasi *auxiliary spray* dan *power operated relief valve* (PORV) pada *pressurizer* untuk mengantisipasi kejadian sebagai bagian dari prosedur operasi darurat.

Kata kunci: SGTR, PWR Mihama Unit 2, PWR standar Jepang

### ABSTRACT

**ANALYSIS OF *STEAM GENERATOR TUBE RUPTURE (SGTR)* BASED ON MIHAMA UNIT 2 SCENARIO.** On February 9, 1991, a *Steam Generator Tube Rupture (SGTR)* took place at the Mihama Unit No. 2. From that event, the accident sequence representing the actuation of protection system and engineered safety feature to mitigate the leak from primary system to secondary system is recorded. That sequence is then applied on the Japanese standard PWR to be simulated using RELAP5/SCDAP/Mod3.2 thermal-hydraulic code. The purpose is to compare consequences resulted if this accident is occurred on the Japanese standard PWR. Parameter compared are break mass flow, fluctuation of primary and secondary pressure, and fluctuation of *pressurizer* level. The simulation result shown that the difference in the time duration from the initiation of rupture up to the leak termination, which takes place in shorter duration on the standard Japanese PWR. It is also shown that the total amount of the primary coolant leaked through the break nozzle to the secondary system that calculated is bigger than on the Mihama unit 2. The character of break mass flow, fluctuation of the primary system and level of *pressurizer* is slightly different in the beginning of the event, but is in similar trend in the end of event as the break flow is terminated. The simulation result also shows the necessity of operator action to manually isolate the auxiliary feedwater system in the affected steam generator, to actuate the main steam relief valves in the intact steam generator, and to actuate the auxiliary spray and power operated relief valve on *pressurizer* to anticipate the event as part of the emergency operating procedures.

Keywords: SGTR, Mihama Unit 2, standard Japanese PWR

## PENDAHULUAN

Pada tanggal 9 Februari 1991, terjadi kecelakaan putusnya pipa pemanas di dalam pembangkit uap pada PLTN Mihama unit 2 yang juga disebut sebagai *Steam Generator Tube Rupture* (SGTR). PLTN Mihama merupakan PLTN jenis PWR dengan daya 1456 MWth atau sekitar 500 MWe dan terdiri dari 2 untai pendingin. Pada kejadian tersebut sistem pendinginan teras darurat (*Emergency Core Cooling System/ECCS*) diaktuiasi untuk pertama kalinya di Jepang. Setelah kejadian tersebut, pemerintah Jepang merilis beberapa laporan mengenai kejadian tersebut, dimana pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan masih di bawah batasan yang telah ditentukan dalam peraturan keselamatan.

Dalam rangka memperoleh data eksperimental yang berhubungan dengan fenomena termohidraulika, telah dilakukan beberapa kegiatan eksperimen untuk menyimulasikan kejadian SGTR sedekat mungkin dengan yang terjadi di Mihama unit 2 tersebut di ROSA-IV *Large Scale Test Facility* (LSTF). Hasil eksperimen tersebut juga diverifikasi dengan program perhitungan TRAC-PF1 untuk memahami fenomena termohidraulika terkait [1]. Skenario yang telah disimulasikan dengan fasilitas LSTF/ROSA-IV bahkan telah mencakup kejadian SGTR hingga 10 pipa pemanas (*multiple SGTR*) [2,3].

Simulasi SGTR telah dilakukan menggunakan program perhitungan RELAP5/SCDAP/Mod3.4 [4,5]. Simulasi dilakukan berdasarkan asumsi bahwa kejadian tersebut terjadi pada PLTN standar Jepang yang mengacu pada PLTN Tsuruga unit 2 yang terdiri dari 4 untai pendingin. Selain itu respon sistem proteksi dan fitur keselamatan terekayasa terhadap kejadian SGTR masih mengacu pada fitur desain keselamatan standar yang sudah ada.

Skenario kejadian SGTR pada PWR Mihama Unit 2 tersebut memiliki kekhususan tersendiri karena merepresentasikan *emergency operating procedures* (EOP) aktual melalui aktuasi sistem proteksi, sistem kendali dan fitur keselamatan terekayasa terhadap suatu kejadian kecelakaan dasar desain (*Design Basis Accident/DBA*). Saat ini keefektifan EOP telah banyak dipelajari dengan ukuran putus pipa pemanas dan skenario kejadian yang berbeda menggunakan fasilitas uji terintegrasi yang berbeda seperti pada IIST [6]. Tujuan utama penelitian adalah untuk menyimulasikan sekuensi kejadian SGTR pada PWR standar Jepang berdasarkan skenario kejadian yang terekam di PWR Mihama Unit2. Dari hasil simulasi diharapkan diperoleh karakter beberapa parameter termohidraulika seperti laju alir kebocoran, tekanan primer dan sekunder, dan level pembangkit uap untuk kemudian dibandingkan dengan parameter yang sama namun pada kondisi berbeda pada PWR standar Jepang, seperti telah dilakukan pada penelitian sebelumnya [4,5]. Simulasi dilakukan menggunakan program perhitungan termohidraulika RELAP5/SCDAP/Mod3.2 untuk menjalankan input data termodifikasi dari input dasar yang diperoleh dari NUPEC [7].

## KRONOLOGI KEJADIAN SGTR PADA PWR MIHAMA UNIT2

Pada pukul 12.24 saat reaktor beroperasi pada kapasitas penuh, komputer instalasi menangkap sinyal dari *SG blowdown water monitor*. Pada pukul 13.47 dilakukan pengurangan daya secara manual menuju proses *shutdown*. Reaktor, turbin, dan generator kemudian mengalami trip secara otomatis akibat sinyal *low PRZ pressure* (13, MPa). Sekitar 7 sekon kemudian, sinyal injeksi keselamatan teraktuiasi akibat tercapainya batasan *coincidence of low PRZ pressure* (12,7 MPa) dan *low PRZ water level* (5,5 %). Sistem injeksi tekanan tinggi (*High Pressure Injection System/HPIS*) kemudian teraktuiasi untuk mengalirkan air injeksi ke untai dingin dan plenum atas dari bejana reaktor.

Pada pukul 13.52, sistem air umpan bantu (*Auxiliary Feedwater System/AFW*) yang menyuplai air ke pembangkit uap yang bermasalah dihentikan secara manual. Pada pukul 13:55, operator mencoba menutup katup isolasi uap utama (*Main Steam Isolation Valve/MSIV*) secara manual dan baru berhasil menutupnya secara penuh pada pukul 14.02.

Dari pukul 14.02 sampai 14.17, katup relief uap utama (*Main Steam Relief Valve/MSRV*) pada pembangkit uap yang masih utuh dibuka secara manual untuk mendinginkan sistem pendingin primer. Pada pukul 14.10, operator mencoba untuk membuka katup relief pada *pressurizer (Power Operated Relief Valve/PORV)* secara manual untuk mengurangi kebocoran dengan cara mengurangi tekanan sistem primer sehingga mendekati tekanan sistem sekunder namun gagal. Sekitar 20 menit kemudian, katup penyemprot bantu pada *pressurizer (auxiliary spray)* dioperasikan untuk melakukan depresurisasi tekanan sistem primer. HPIS dihentikan setelah dipastikan bahwa level *pressurizer* telah pulih pada pukul 14.37. Pada pukul 14.48, tekanan sistem primer dapat menyamai tekanan sistem sekunder sehingga kebocoran dapat dihentikan. Selama kejadian tersebut, MSRV pada pembangkit uap yang bermasalah membuka dan menutup secara otomatis (*cycling*) sebanyak tiga kali. Jumlah keseluruhan uap yang terlepas dari MSRV dievaluasi sekitar 1,3 kg. Kronologi kejadian SGTR di atas dirangkum berdasarkan waktu pada Tabel 1. Dari kronologi tersebut terlihat bahwa dari terjadinya SGTR hingga tercapainya penyamaan tekanan primer dan sekunder yang akan menghentikan aliran kebocoran membutuhkan waktu 3780 s atau 1 jam lebih.

Tabel 1. Kronologi kejadian SGTR pada PWR Mihama Unit 2 [1]

Alarm dari <i>SG water monitor (break)</i>	13:45	0,0
Penurunan daya untuk pemadaman	13:47	180,0
- Sinyal trip reaktor ("low PRZ pressure") - Sinyal injeksi keselamatan melalui HPIS ( <i>coincidence of low PRZ pressure and low PRZ water level</i> ) - Aktuasi AFW ke kedua pembangkit uap (SG) secara otomatis	13:50	300,0
Trip pompa pendingin utama secara otomatis	13:51	
Penghentian AFW ke SG yang bocor	13:52	420,0
- Penutupan MSIV pada SG yang bocor - Pembukaan MSRV pada SG yang utuh	14:02	1020,0
Penutupan MSRV dari SG yang utuh	14:17	1920,0
Buka-tutup ( <i>cycling</i> ) MSRV dari SG yang bocor	14:19	2040,0
Buka-tutup ( <i>cycling</i> ) MSRV dari SG yang bocor	14:29	2640,0
Aktuasi <i>Auxiliary spray</i> pada <i>pressurizer</i>	14:34	2940,0
- Penghentian HPIS ke plenum bagian atas - Penghentian HPIS ke untai dingin	14:37	3120,0
Buka-tutup ( <i>cycling</i> ) MSRV dari SG yang bocor	14:39	3240,0
Pembukaan MSRV pada SG yang utuh	14:42	3420,0
Penyamaan tekanan primer dan sekunder tercapai	14:48	3780,0

Catatan sekuensi di atas kemudian dimodelkan menggunakan program perhitungan TRAC-PFI yang hasilnya dirangkum pada referensi [1]. Respon sistem proteksi dan sistem kendali reaktor yang menghasilkan sekuensi di atas akan disimulasikan pada PWR standar Jepang yang dimodelkan menggunakan program perhitungan RELAP5/SCDAP/Mod3.2. Berdasarkan simulasi SGTR yang pernah dilakukan [3,4], terdapat perbedaan prosedur operasi kedaruratan melalui aktuasi sistem proteksi dan sistem keselamatan dengan skenario

pada Tabel 1. Perbedaan utamanya adalah selain waktu kejadian, juga adanya aktuasi sistem mitigasi secara manual di samping aktuasi secara otomatis untuk merespon SGTR.

## PEMODELAN DAN PERHITUNGAN

### Desain PWR Mihama-2 dan PWR Standar Jepang

PWR Mihama-2 merupakan PWR dengan 2 untai pendingin yang didesain oleh Westinghouse untuk menghasilkan daya output 500 MWe. Sementara PWR standar Jepang terdiri dari 4 untai pendingin, dimana disainnya mengacu pada PWR Tsuruga Unit 2 dengan kapasitas daya output sekitar 1160 MWe. Selain dari perbedaan untai pendingin dan pembangkitan daya maksimal di atas, terdapat kesamaan pada besaran desain termohidraulika lainnya seperti tekanan primer, laju alir pendingin, temperatur pendingin keluar masuk teras, dan tekanan uap yang dihasilkan dari pembangkit uap. Tabel 2 menunjukkan data desain pada PWR Mihama Unit 2 dan PWR standar Jepang. Dari tabel tersebut terlihat bahwa secara umum desain PWR standar Jepang memiliki kapasitas pendinginan yang lebih besar dari desain dari PWR Mihama Unit 2 yang ditunjukkan dari peningkatan jumlah untai pendingin untuk mengakomodasi daya terbangkitkan yang lebih besar.

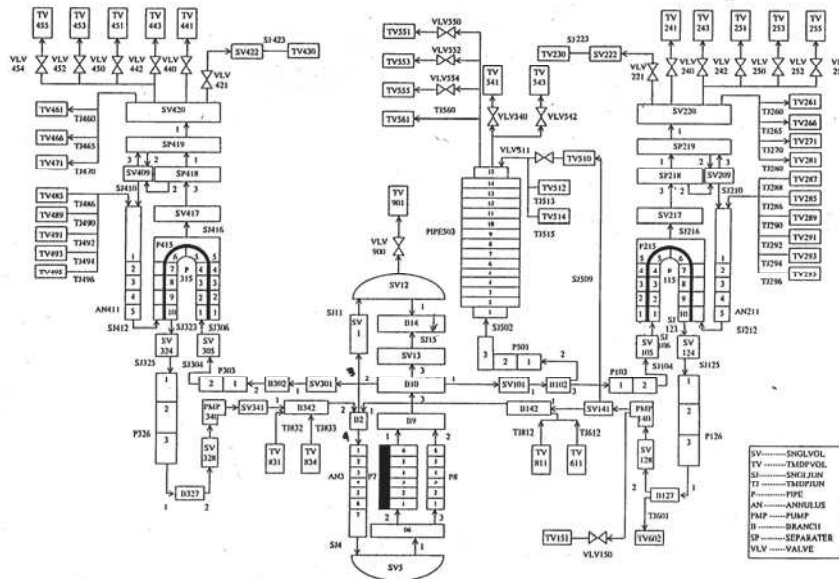
Tabel 2. Data desain PWR Mihama Unit 2 dan PWR standar Jepang

Parameter	PWR Mihama Unit 2 (2 untai pendingin)	PWR Standar Jepang (4 untai pendingin)
Sistem primer		
• Tekanan (MPa)	15,52	15,70
• Daya (MWth/MWe)	1425/500	3411/1160
• Laju alir per untai (kg/s)	4170	4173
• Temperatur pendingin (K)		
➤ Keluar teras	585	598
➤ Masuk teras	562	562
• <i>Level pressurizer</i>	54 %	60 %
Sistem sekunder		
• Tekanan (MPa)	5,7	6,15
• Laju alir uap (kg/s)	400	420

### Nodalisasi PWR Standar Jepang

Nodalisasi PWR yang digunakan dalam penelitian ini sama dengan penelitian sebelumnya (4,5) seperti ditampilkan pada Gambar 1. Empat untai pendingin dibagi menjadi 2 untai pendingin yaitu untai A dan untai B. Untai A mewakili satu untai pendingin sementara untai B mewakili 3 untai pendingin lainnya. Nodalisasi terdiri dari 172 volume hidraulik yang dihubungkan dengan 181 *junction* dan 1 struktur panas. Elemen bejana tekan reaktor (volume 1 sampai 14) terdiri dari volume-volume yang berhubungan dengan teras, *bypass* teras, plenum bawah, plenum atas, bagian atas bejana reaktor, dan *downcomer*. Teras reaktor hanya dimodelkan sebagai kanal tunggal dengan 6 volume hidraulik. Untai A dan untai B masing-masing terdiri dari pipa sisi panas (*hot leg*), inlet dan outlet plenum pembangkit uap, *U-tube*, pompa pendingin primer, dan pipa sisi dingin (*cold leg*). *Pressurizer* dihubungkan ke pipa sisi panas dari untai A melalui pipa penyambung (*surge line*). Sisi sekunder dari pembangkit uap terdiri dari *downcomer*, *riser region*, *steam*

separator, dan steam dome. Jalur aliran uap utama dari atas steam dome dimodelkan dengan katup penyetop turbin yang juga bertindak sebagai katup isolasi uap utama (Main Steam Isolation Valve/MSIV), pipa uap utama, dan volume buang ke arah turbin. Selain itu dimodelkan juga katup keselamatan uap (Main Steam Safety Valve/MSSV), katup relief uap (Main Steam Relief Valve/MSRV) dan katup bypass uap ke kondenser untuk menyimulasikan aliran uap pada kondisi transien.



Gambar 1. Nodalisasi PWR standar Jepang

Sistem injeksi keselamatan dimodelkan sebagai *time dependent volume* dan *junction* yang dihubungkan ke pipa sisi dingin dari setiap untai untuk menyimulasikan sistem pendingin teras darurat. Sistem air umpan sekunder seperti sistem air umpan utama (Main Feedwater System/MFW) dan sistem air umpan bantu (Auxiliary Feedwater System/AFW) juga dimodelkan sebagai *time-dependent junction* sebagai pengganti pompa sekunder dan *time-dependent volume* sebagai penyedia air umpan. Untuk menyimulasikan pipa pemanas dalam U-tube yang putus, dimodelkan satu katup trip yang bekerja berdasarkan *setting* waktu yang akan menghubungkan volume hidraulik sisi primer dan sisi sekunder. Besaran pipa pemanas yang putus dinyatakan sebagai luas penampang kebocoran yang identik dengan luas penampang katup trip.

### Modifikasi Variabel Kendali Sistem Proteksi Dan Fitur Keselamatan Terekayasa

Variabel kendali akan menentukan jalannya skenario kecelakaan yang terdiri dari saat dimulainya kebocoran dan waktu respon dari sistem proteksi dan fitur keselamatan terekayasa. Pada input data PWR Standar Jepang yang telah ada, variabel kendali otomatis dan manual (tindakan operator) yang berhubungan dengan skenario kejadian SGTR adalah:

- Sinyal inisiasi kecelakaan
- *Setpoint* trip reaktor, memicu:
  - Trip turbin atau MSIV

- Trip MFW
- Buka bypass turbin
- *Setpoint* aktuasi ECCS, memicu:
  - Tutup bypass turbin
  - Trip pompa pendingin primer
  - Aktuasi turbin-driven dan *motor-driven* AFW
- Sinyal buka-tutup MSRV (*cycling*)
- Penghentian AFW pada untai yang bermasalah secara manual
- Aktuasi katup penyemprot *pressurizer* secara manual
- Buka-tutup MSRV pada untai yang tidak bermasalah secara manual
- Penghentian operasi ECCS secara manual

Pada kondisi otomatis, sinyal fitur keselamatan terekayasa di atas berlaku untuk semua untai pendingin baik yang mengalami kebocoran (pembangkit uap pada untai A yang mengalami SGTR) maupun yang masih utuh (untai B). Hal tersebut juga berlaku pada kondisi aktuasi manual atau tindakan operator, sementara bila dilihat dari skenario Mihama Unit 2, terdapat beberapa tindakan operator yang hanya diperlukan pada fitur keselamatan terekayasa yang berhubungan pada salah satu untai saja, sebagai contoh penghentian AFW pada pembangkit uap yang mengalami kebocoran. Untuk itu diperlukan modifikasi atau perubahan pada variabel kendali tersebut sehingga memungkinkan aktuasi secara manual dan independen untuk pembangkit uap yang mengalami kebocoran. Modifikasi input dilakukan sesuai dengan pedoman penulisan input RELAP5 yang terdapat pada referensi [8]. Tabel 3 berisi ringkasan data desain dan variabel kendali sistem proteksi dan fitur keselamatan terekayasa yang dipersiapkan untuk menyimulasikan SGTR pada PWR standar Jepang berdasarkan skenario Mihama Unit 2.

Tabel 3. Ringkasan data input dan variabel kendali dalam PWR standar Jepang

Inventori massa awal	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistem primer               <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ <i>Pressurizer</i></li> <li>➤ Volume uap di <i>pressurizer</i></li> </ul> </li> <li>• Sistem sekunder</li> </ul>	237 ton 20 ton 20 m <sup>3</sup>
	171 ton
<i>Trips</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reactor <i>trip</i></li> <li>• HPIS</li> <li>• Pompa pendingin primer</li> <li>• <i>Turbine stop valve</i></li> </ul>	Tekanan <i>pressurizer</i> rendah (13,11 MPa) Tekanan <i>pressurizer</i> rendah (12,93 MPa) dan <i>level pressurizer</i> rendah (0,0 %) Trip otomatis setelah trip reaktor Tutup otomatis setelah trip reaktor
Katup penyemprot <i>pressurizer</i>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laju alir:</li> <li>• Mode operasi</li> </ul>	1,38 kg/s Aktuasi buka-tutup secara manual
AFW	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Untai A               <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Laju alir</li> <li>➤ Mode operasi</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 13,9 kg/detik (<i>motor-driven</i> AFW)</li> <li>- 15,9 kg/detik (<i>turbine-driven</i> AFW)</li> <li>- Aktuasi buka otomatis berdasarkan sinyal SG <i>low-low level</i></li> <li>- Aktuasi tutup manual</li> </ul>



MSRV dari pembangkit uap yang utuh, dimana pada PWR standar Jepang MSRVR ditutup lebih awal setelah isolasi sistem sekunder pada untai bocor dan utuh berhasil dilakukan. Pada PWR Mihama Unit 2, MSRVR untai utuh ditutup setelah isolasi sistem sekunder untai bocor dilakukan secara manual.

Perbedaan di atas terjadi karena penundaan isolasi sistem sekunder yang terjadi pada PWR Mihama Unit 2 tidak dimodelkan dan disimulasikan pada input PWR Standar Jepang. Namun pada kedua sekuensi, diusahakan agar MSRVR pada pembangkit uap yang utuh dibuka manual setelah isolasi sistem sekunder berhasil dilakukan. Setelah aktuasi AFW secara otomatis pada pembangkit uap yang utuh dan yang bocor dijalankan, dilakukan isolasi AFW pada pembangkit uap yang bocor dimana pada PWR standar Jepang, diasumsikan waktu pengisolasian secara manual dapat dilakukan bersamaan dengan kejadian pada PWR Mihama Unit 2 yaitu pada  $t = 420$  s.

Aktuasi pompa *charging* ke sistem primer dilakukan setelah temperatur pendingin di pipa panas dari untai utuh menurun ke  $275\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $548\text{ K}$ ) sesuai catatan kejadian pada PWR Mihama Unit 2. Pada PWR standar Jepang, penurunan tersebut terjadi pada  $t = 687$  s sehingga diasumsikan operator baru dapat mengoperasikan pompa *charging* pada  $t = 700$  s. Pada PWR Mihama Unit 2, temperatur tersebut baru dicapai pada  $t = 1440$  s.

Rentang waktu dari aktuasi pompa *charging* sampai MSRVR pada pembangkit uap yang utuh ditutup kembali, dari penutupan MSRVR ke aktuasi *auxiliary spray*, dari aktuasi *auxiliary spray* hingga penghentian injeksi keselamatan dari HPIS, dan dari penghentian HPIS hingga MSRVR dibuka kembali ditetapkan sama dengan catatan kejadian di PWR Mihama Unit 2, sehingga diperoleh waktu sekuensi pada PWR standar Jepang seperti pada Tabel 4. Aliran kebocoran akan berhenti ketika tekanan primer sama dengan tekanan sekunder, dimana pada PWR standar Jepang terjadi pada  $t = 2947$  s. Setelah itu, pengoperasian *auxiliary spray* dapat dihentikan karena aliran kebocoran telah dapat diisolasi. Secara keseluruhan, sekuensi SGTR pada PWR Mihama Unit 2 berhasil disimulasikan berdasarkan input PWR standar Jepang, walaupun berlangsung lebih cepat dibandingkan pada PWR Mihama Unit 2. Hal tersebut disebabkan oleh waktu isolasi sistem sekunder setelah trip reaktor yang berbeda dan waktu ketika pompa *charging* kembali dioperasikan yang mempengaruhi waktu sekuensi-sekuensi berikutnya. Hasil perhitungan menggunakan RELAP5 juga menunjukkan jumlah total pendingin primer yang bocor ke sistem sekunder sebesar  $63706\text{ kg}$  atau sekitar  $64\text{ ton}$ . Bila dibandingkan dengan data kejadian pada PWR Mihama Unit 2, jumlah total kebocoran pendingin adalah sebesar  $55\text{ ton}$ .

Tabel 4. Urutan sekuensi kejadian SGTR pada PWR standar Jepang dan PWR Mihama Unit2

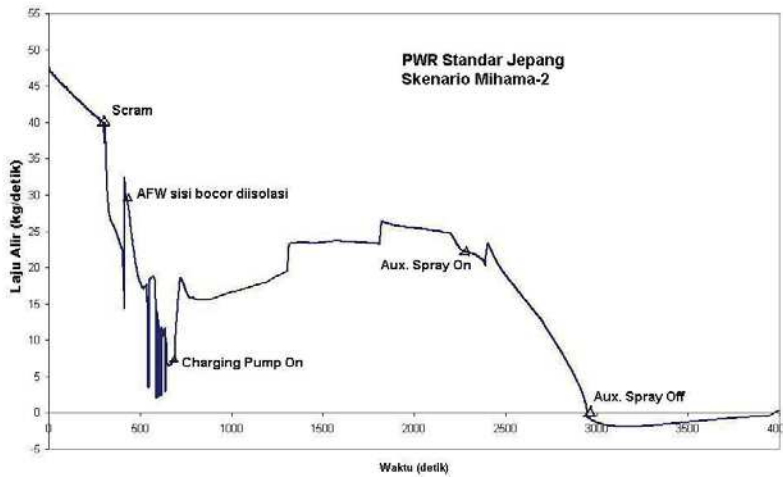
Katup buka/kejadian SGTR	0,0	0,0
Sinyal trip reaktor (dari <i>low PRZ pressure</i> 13,1 MPa)	296,0	300,0
- Trip MFW - Trip RCP untai A dan B - TSV untai A dan B tutup ( <i>MSIV isolation</i> )	298,5	
MSRV SG utuh (untai B) buka manual	300,0	
Sinyal injeksi keselamatan melalui HPIS (dari <i>low PRZ pressure</i> 12,9 MPa)	302,0	300,0
Aktuasi <i>motor-driven</i> AFW (dari signal ECCS)	311,2	



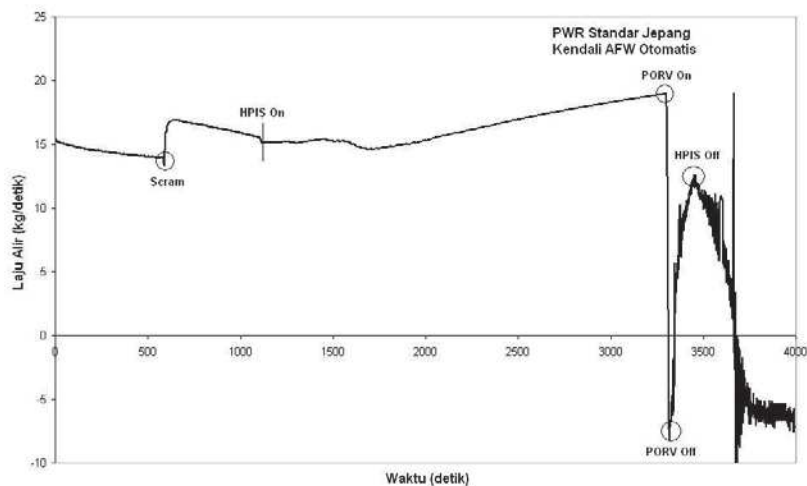
Aktuasi turbine-driven AFW (dari SG level <i>low-low signal</i> )	324,4	
Isolasi AFW pada SG bocor (untai A)	420,0	420,0
Aktuasi kembali Pompa <i>charging</i> di sistem primer	700,0	1440,0
MSRV pada SG utuh tutup manual	1180,0	1920,0
Aktuasi PRZ <i>auxiliary spray</i>	2200,0	2940,0
HPIS dihentikan	2380,0	3120,0
MSRV pada SG utuh buka	2680,0	3420,0
Penyamaan tekanan primer dan sekunder tercapai	2947,0	3780,0
PRZ <i>auxiliary spray</i> dihentikan	2950,0	3780,0

**Transien Aliran Kebocoran dan Tekanan Sistem Primer dan Sekunder**

Karakter transien aliran kebocoran pada PWR standar Jepang ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3. Gambar 2 menunjukkan transien aliran kebocoran sesuai dengan skenario Mihama Unit 2, sedangkan Gambar 3 menampilkan transien aliran kebocoran sesuai skenario awal yang bergantung pada aktuasi AFW secara otomatis pada kedua untai pendingin dan aktuasi MSRV secara otomatis [4]. Laju alir awal kebocoran pada PWR Standar Jepang terhitung sebesar 47 kg/s, sementara bila dibandingkan dengan skenario awal laju alir awal sebesar 15,3 kg/s. Perbedaan tersebut disebabkan oleh perbedaan nilai koefisien *discharge* dan *frictional loss* walaupun memiliki luasan bocoran yang sama.



Gambar 2. Transien laju alir kebocoran dengan skenario Mihama unit 2



Gambar 3. Transien laju alir kebocoran sesuai skenario awal yang bergantung pada aktuasi AFW otomatis

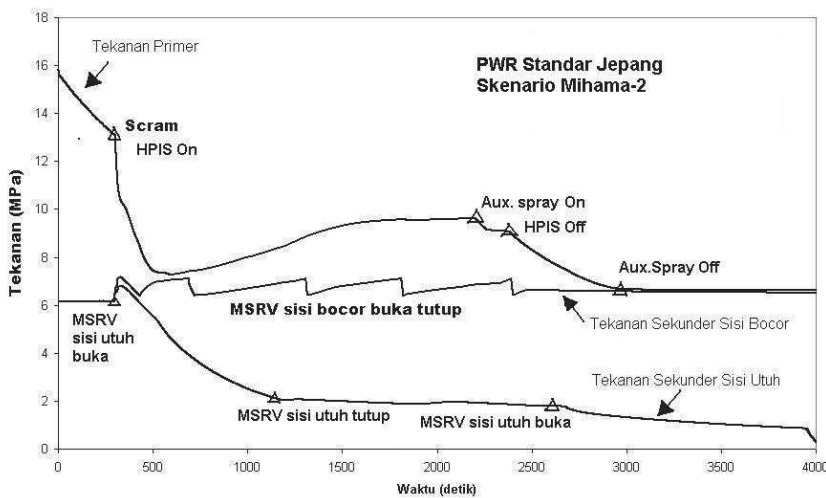
Selain itu terlihat perbedaan signifikan pada karakter laju alir kebocoran setelah trip reaktor yang disebabkan oleh perbedaan status pompa pendingin primer dan lokasi kebocoran pada kedua skenario. Pada Gambar 2, laju alir kebocoran turun secara drastis setelah trip reaktor karena pompa pendingin primer yang menyediakan tekanan aliran pendingin ikut berhenti saat trip reaktor. Pada Gambar 3, laju alir naik kembali secara drastis karena dipengaruhi oleh letak kebocoran yang berada di segmen paling bawah dari pipa pembangkit uap, dimana pada segmen tersebut air umpan utama tidak bekerja sebelum AFW bekerja, dan masih adanya aliran paksa dari pompa pendingin primer yang baru berhenti setelah pompa HPIS bekerja. Gambar 2 juga menunjukkan perbedaan karakter laju alir saat pengisolasian kebocoran dilakukan, yaitu dengan pengoperasian *pressurizer auxiliary spray* dan pengoperasian *Power Operated Relief Valves (PORV)*. Terlihat bahwa penurunan laju kebocoran menggunakan *Auxiliary Spray* terjadi lebih lama sementara bila menggunakan PORV penurunan laju alir akan terjadi secara drastis. Hal tersebut disebabkan oleh kontraksi sistem primer yang berlangsung lebih lambat bila menggunakan pencampuran air pendingin dari *Auxiliary Spray* bila dibandingkan dengan penggembosan sistem primer melalui PORV.

Gambar 4 menampilkan transien tekanan primer dan sekunder yang juga berdasarkan skenario Mihama Unit 2 dan skenario awal berupa aktuasi AFW secara otomatis. Pada kedua gambar tersebut tekanan primer diukur dari tekanan di dalam *pressurizer*, sementara tekanan sekunder diukur dari tekanan di dalam kubah uap (*steam dome*) pembangkit uap. Perbedaan signifikan terlihat pada karakter transien tekanan primer yang lebih banyak disebabkan oleh karakteristik kebocoran, waktu trip pompa primer, dan waktu injeksi dari HPIS. Aktuasi HPIS dan trip pompa pendingin primer yang lebih awal pada skenario Mihama Unit 2 sempat menaikkan inventori pendingin primer yang ditunjukkan dengan kenaikan tekanan primer sebelum aktuasi *auxiliary spray*. Perbedaan selisih tekanan primer dan sekunder juga menyebabkan kenaikan laju alir kebocoran seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Karakter penurunan tekanan primer yang berbeda setelah aktuasi *auxiliary spray* dan aktuasi PORV yang mempengaruhi penurunan laju alir kebocoran juga terlihat pada Gambar 4.

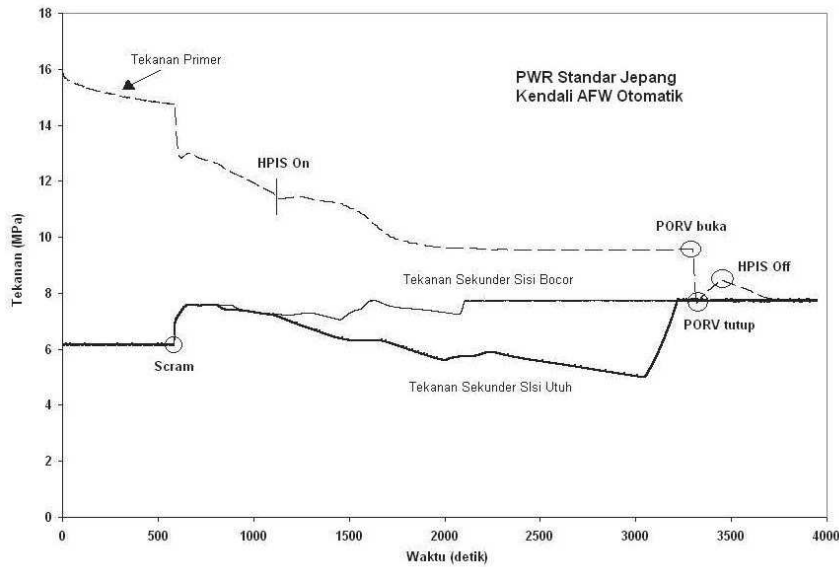
Aliran pendingin yang masuk melalui kebocoran menyebabkan tekanan sekunder di pembangkit uap yang bocor menjadi tetap tinggi karena bertambahnya inventori air di sisi

sekunder. Karakter tekanan sekunder sisi bocor yang berbeda pada Gambar 4 juga disebabkan oleh perbedaan setting bukaan MSRV pada kedua kasus, dimana pada skenario Mihama Unit 2 digunakan *setpoint* buka-tutup 7,1 – 6,4 MPa sementara pada skenario awal digunakan *setpoint* 7,74 – 7,73 MPa. Perbedaan tersebut terlihat dari jumlah aktuasi buka tutup (*cycling*) MSRV pada sisi bocor, dimana pada skenario Mihama Unit 2 relatif dapat dihitung. Selain itu perbedaan status MSRV sisi utuh antara skenario Mihama Unit 2 (buka manual) dan skenario awal (buka otomatis) memperlihatkan perbedaan karakter pada penurunan tekanan sekunder sisi utuh, dimana pada skenario Mihama Unit 2 tekanan sekunder sisi utuh turun lebih banyak hingga kisaran 2 MPa dibandingkan dengan skenario awal yang turun hanya ke tekanan 5 MPa.

Pada Gambar 5, pasokan air dari AFW ke pembangkit uap yang bocor dan yang utuh terus menambah inventori air di sisi sekunder pembangkit uap sehingga uap yang tersisa di kubah uap menjadi semakin sedikit. Pada sisi utuh, hal tersebut ditunjukkan dengan penurunan tekanan pembangkit uap secara perlahan, kemudian naik secara drastis ketika kubah uap telah penuh dengan air dan memicu terbukanya katup MSRV di untai B. Hal tersebut juga dipengaruhi dengan tidak dibukanya MSRV sisi utuh secara manual.



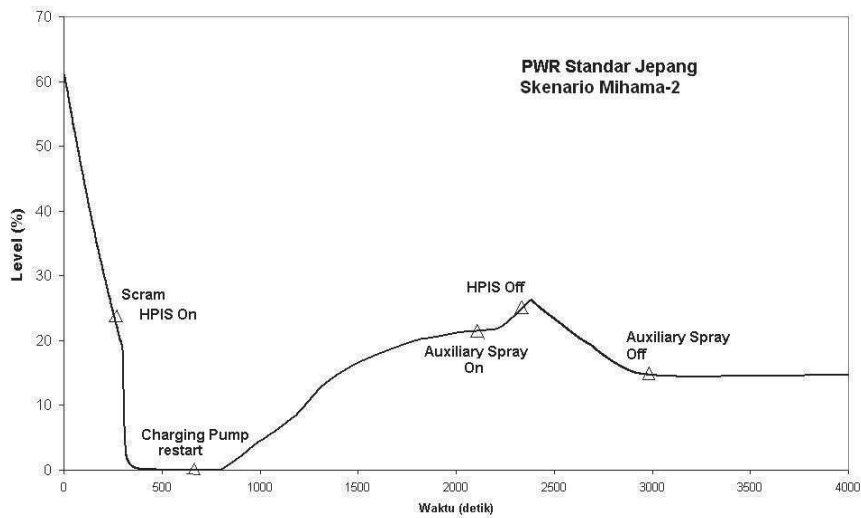
Gambar 4. Transien tekanan primer dan sekunder skenario Mihama-2



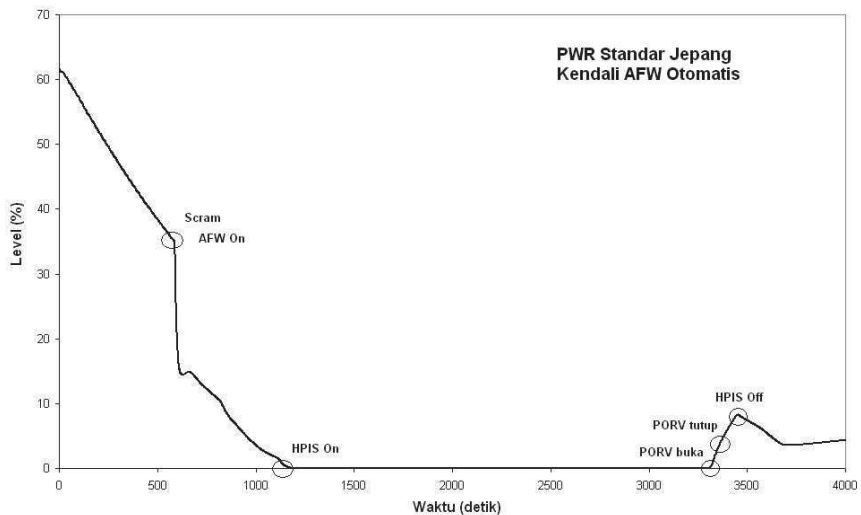
Gambar 5. Transien tekanan primer dan sekunder dengan kendali AFW otomatis

Bila dibandingkan dengan kejadian pada PWR Mihama Unit 2, secara umum terdapat kesamaan karakteristik perubahan tekanan antara PWR standar Jepang dan PWR Mihama Unit 2. Selain itu juga terdapat perbedaan waktu dan jumlah aktuasi buka-tutup MSRV pada pembangkit uap yang bocor. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pembukaan MSRV pada pembangkit uap yang utuh secara manual diperlukan untuk menjaga perpindahan energi dari sistem primer secara sirkulasi alam dan untuk menjaga kesetimbangan tekanan akibat suplai air umpan yang tetap dipertahankan pada sisi utuh. Pada PWR Mihama Unit 2, MSRV pada pembangkit uap yang mengalami kebocoran secara otomatis membuka dan menutup (*cycling*) sebanyak tiga kali setelah sistem sekunder yang mengalami kebocoran diisolasi. Pada PWR standar Jepang, MSRV sisi bocor membuka dan menutup sebanyak lima kali setelah pengisolasian sistem sekunder seperti dapat dilihat pada fluktuasi tekanan sekunder sisi bocor pada Gambar 4. Jumlah *cycling* tersebut berdasarkan *setting* tekanan buka-tutup yang sama dengan *setting* pada PWR Mihama Unit 2. Bila digunakan *setting* asli pada PWR standar Jepang, jumlah *cycling* akan menjadi lebih banyak. Berdasarkan perhitungan RELAP5, jumlah uap yang terlepas melalui MSRV adalah sebesar 7940 kg.

Gambar 6 dan 7 menampilkan fluktuasi perubahan level *pressurizer* antara skenario Mihama Unit 2 dan skenario awal. Terlihat bahwa injeksi HPIS pada skenario Mihama teraktuasi lebih cepat dibandingkan dengan skenario awal sehingga lama waktu ketika *pressurizer* dalam kondisi kosong juga lebih singkat. Lambatnya pengisian air injeksi dari HPIS juga karena dibutuhkan waktu 26 s dari teraktuasinya sinyal HPIS hingga waktu ketika air injeksi mencapai sistem primer. Pada skenario awal, lamanya waktu pengisian juga karena disebabkan oleh letak kebocoran yaitu di segmen paling bawah dari pembangkit uap, sehingga air injeksi masih mengalir melalui kebocoran ke sisi sekunder. Pada skenario Mihama Unit 2, level *pressurizer* juga naik setelah dijalankannya *auxiliary spray* dan baru turun setelah HPIS dihentikan. Pada skenario awal dimana isolasi kebocoran menggunakan PORV, terlihat bahwa saat PORV dibuka, terjadi pertambahan beda tekanan antara sistem injeksi dengan tekanan primer sehingga *pressurizer* cepat terisi air yang berasal dari tambahan pasokan air dari HPIS dan pengembosan tekanan primer melalui PORV.



Gambar 4. Transien evel *pressurizer* scenario Mihama-2



Gambar 4. Transien level *pressurizer* scenario kendali AFW otomatis

## KESIMPULAN

Secara umum urutan skenario kecelakaan SGTR yang terjadi pada PWR Mihama Unit 2 telah dapat disimulasikan pada model PWR standar Jepang. Pada PWR standar Jepang, hasil simulasi menunjukkan adanya perbedaan lama waktu dari kejadian SGTR hingga berhentinya kebocoran yang berlangsung lebih pendek. Selain itu jumlah pendingin primer yang bocor dan jumlah uap yang terlepas dari MSRVR tercatat lebih besar daripada PWR Mihama Unit 2. Karakter aliran kebocoran, fluktuasi tekanan primer, dan level *pressurizer* sedikit berbeda pada tahap-tahap awal kejadian, namun relatif sama pada tahap

akhir ketika aliran kebocoran dapat dihentikan. Hasil simulasi juga menunjukkan perlunya tindakan operator secara manual dalam mengantisipasi kejadian yang ditunjukkan dari isolasi AFW, aktuasi MSRV dan aktuasi *auxiliary spray* atau aktuasi *power operated relief valve* (PORV) pada *pressurizer* sebagai bagian dari *emergency operating procedures* (EOP).

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Hirano, Watanabe. Analyses of the Mihama-2 SGTR event and ROSA-IV experiment SB-SG-06 to simulate the event. Proceedings of the Fifth International Topical Meeting On Reactor Thermal Hydraulics. Sponsored by Thermal Hydraulics Division and Idaho Section of the American Nuclear Society, Salt Lake City, September 21-24, 1992.
2. H. Nakamura, et al. Steam generator multiple U-tube rupture experiments on ROSA-IV/LSTF. Proc. 6<sup>th</sup> Int. topl. mtg., Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-6); October 1993
3. Kwang Won Seul, et al. Simulation of multiple steam generator tube rupture (SGTR) event scenario. Korea Institute of Nuclear Safety, Journal of the Korean Nuclear Society; June 2003; 35: 3.
4. Surip Widodo. Analisis *steam generator tube rupture* (SGTR) diikuti kegagalan sistem isolasi pada PWR. Kegiatan Penelitian, Bidang Pengkajian dan Analisis Keselamatan Reaktor, PTRKN; 2007
5. Andi S. Ekariansyah. Analisis *steam generator tube rupture* (SGTR) dan pengisolasiannya pada PWR. Majalah Ilmiah Teknologi Keselamatan Nuklir SIGMA EPSILON; Mei 2008; 12: 2.
6. T. Liu, C. Lee. An Evaluation of emergency operator actions by an experimental SGTR event at the IIST facility and a comparison of mihama-2 SGTR event record. Nuclear Technology; January 2000.
7. Nuclear power engineering corporation (NUPEC). PWR safety analysis training text. Long term training course on safety regulation and safety analysis. Tokyo; September – December 1997.
8. NUREG/CR-6150. SCDAP/RELAP5/MOD3.2 code manual volume III: User's guide and input manual. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory; November 1997.