

## EVALUASI KINERJA SISTEM PRIMER REAKTOR PWR PADA KEJADIAN STATION BLACK OUT MENGGUNAKAN RELAP/SCDAP

Jupiter Sitorus Pane dan Johnny Situmorang  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir  
Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Komplek Puspiptek Gedung 80, Serpong, Tangsel 15310

Email: jupiter\_pane@batan.go.id, situmora@batan.go.id

### ABSTRAK

**EVALUASI KINERJA SISTEM PRIMER REAKTOR PWR PADA KEJADIAN STATION BLACK OUT MENGGUNAKAN RELAP/SCDAP.** Kejadian station blackout (SBO) merupakan salah satu kondisi yang dapat memicu kecelakaan parah yaitu pelelehan teras reaktor. Oleh karena itu diperlukan suatu kemampuan analisis untuk menangani masalah-masalah kecelakaan parah dalam Laporan Analisis Kecelakaan. Untuk itu telah dilakukan analisis kecelakaan yang disebabkan oleh Station Blackout yang diikuti oleh gagal menutupnya katup power-operated relief valve di Pressurizer. Tujuan analisis ini adalah untuk mengevaluasi kinerja sistem primer reaktor pada kejadian SBO terjadi kegagalan menutup katup PORV pada Pressurizer dan kaitannya dengan manajemen kecelakaan. Evaluasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak RELAP/SCDAPSIM yang mampu menganalisis secara termohidrolik kondisi sistem primer suatu reaktor daya. Hasil analisis menunjukkan bahwa setelah SBO kondisi temperatur, tekanan, tinggi air mengalami perubahan sehingga memicu kenaikan temperatur bahan bakar mencapai titik leleh dalam waktu 9,5 jam. Bila terjadi kegagalan menutup katup PORV di Presurizer maka turunnya tekanan primer sampai 4,24 MPa dapat memicu aktifnya Akumulator yang akan memasok air pendingin sehingga teras tidak mengalami pengosongan dan menunda tercapainya pelelehan bahan bakar. Penundaan ini memberi kesempatan kepada operator untuk melakukan manajemen kecelakaan.

Kata kunci: Station black out, gagal, PORV, teras leleh.

### ABSTRACT

**AN EVALUATION OF PWR REACTOR PRIMARY SYSTEM DURING STATION BLACKOUT ACCIDENT USING RELAP/SCDAP.** Station black out accident is one of condition that can initiate an accident that could lead to core melting. Therefore it is necessary to have a capability to analyze severe accident which is part of Safety Analysis Report. An accident analysis due to station blackout followed by failure of power operated relief valve in Pressurizer has been done. The purpose of the analysis is to evaluate cooling system performance due to the failure PORV of Pressurizer and its relation to accident management. The analysis was done using RELAP/SCDAP software which has a capability to evaluate thermal hydraulics performance of the power reactor. The result shows that after the station blackout the condition of temperature, pressure and coolant level will increase the fuel element temperature to reach melting point within 9,5 hours. When PORV failed, the pressure of primer system decreases and at 4,24 MPA can activate an accumulator to supply borated water to the core that avoid core uncovered and delayed core melting. The delay allows operator to manage the accident.

Keywords: Station black out, failure, PORV, core melting.

### PENDAHULUAN

Kejadian station black out (SBO) merupakan salah satu sumber kecelakaan yang dapat memicu kegagalan fungsi keselamatan reaktor dan mengarah pada kejadian melelehnya teras reaktor. Kondisi SBO ini merupakan salah satu kejadian yang termasuk dalam analisis keselamatan. Sebagai unit organisasi yang berfungsi untuk mendukung secara teknis hal-hal yang berkaitan dengan teknologi reaktor dan keselamatan nuklir rancangan PLTN maka diperlukan suatu kemampuan analisis terkait dengan masalah-masalah kecelakaan.

Kejadian kecelakaan reaktor jenis BWR di Fukushima merupakan suatu kejadian kecelakaan Station Blackout yang disebabkan oleh hilangnya pasokan sumber listrik luar, kegagalan fungsi generator diesel darurat, kegagalan pemulihan listrik AC dan degradasi seals pompa pendingin reaktor akibat kehilangan pendingin yang cukup lama [1]. Dengan kejadian ini dirasakan perlu

melakukan evaluasi terhadap kinerja sistem primer reaktor PWR akibat kondisi SBO, dimana setelah SBO reaktor akan padam dan semua pompa pendingin primer padam. Untuk menghilangkan panas yang masih tersisa di dalam teras hanya dapat dilakukan dengan pendinginan sirkulasi alam. Tanpa adanya intervensi dari pendingin dari luar maka temperature menjadi tinggi sekali bahkan dapat menyebabkan pelelehan teras. Selanjutnya dilakukan evaluasi pada kondisi dimana setelah SBO, terjadi kegagalan menutupnya katup power-operated relief valve (PORV) pada Pressurizer. Pressurizer ini berfungsi sebagai stabilisator tekanan pada pendingin primer sehingga dapat dijamin bahwa pendingin primer tetap berada dalam kondisi cair.

Pada kondisi tekanan uap di Pressurizer mencapai lebih dari 16 MPa maka katup PORV akan membuka dan menutup kembali bila tekanan sudah turun kembali. Dengan demikian integritas sistem pendingin primer dapat dipertahankan. Dalam penelitian ini dipilih PWR Surry sebagai studi kasus. Dengan evaluasi ini diharapkan diperoleh data tentang waktu yang dibutuhkan oleh suatu reaktor PWR tiga loop sampai mengalami peristiwa pelelehan setelah kejadian SBO.

Studi SBO yang dilakukan untuk reaktor Three Miles Island (TMI) menggunakan program komputasi MELCOR, MAAP4 dan RELAP/SCDAP dan VVER yang menggunakan ASTEC VI menunjukkan kerusakan teras akibat melelehnya bahan bakar masing-masing terjadi setelah 7 jam dan 10 jam sejak kondisi Blackout[1].

Dalam makalah ini dilaporkan hasil analisis kecelakaan parah akibat SBO yang diikuti oleh gagal menutupnya katup power-operated relief valve Pressurizer untuk reaktor daya PWR tiga loop Surry.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja sistem primer reaktor pada kejadian SBO yang diikuti kegagalan menutup katup PORV pada Pressurizer dan kaitannya dengan manajemen kecelakaan.. Kinerja yang dievaluasi meliputi kondisi temperatur, tekanan, tinggi air pendingin sistem primer. Evaluasi ini akan bermanfaat untuk melakukan analisis besar suku sumber yang akan keluar dari suatu teras, bejana tekan dan masuk ke kolam pengungkung (containment).

Analisis dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak RELAP/SCDAP yang memiliki kemampuan untuk menganalisis secara termohidrolika kondisi suatu reaktor daya baik dalam kondisi normal maupun kondisi kecelakaan dan menghitung produk fisi yang berasal dari fisi, aktivasi dan yang dihasilkan oleh teras yang mengalami kecelakaan serta transportasinya ke dalam pendingin reaktor [2].

## METODOLOGI

Dalam analisis ini akan diuraikan terlebih dahulu kejadian SBO yang akan terjadi pada reaktor daya tiga loop jenis PWR Surry dilanjutkan dengan pemodelan dan perhitungan yang terdapat pada RELAP/SCADAP dan simulasi terhadap skenario SBO.

### **Kecelakaan station blackout.**

Station blackout didefinisikan sebagai kehilangan total pasokan daya listrik terhadap panel switchgear utama maupun pendukung dalam suatu reaktor daya nuklir [3]. Dengan padamnya pasokan listrik luar diikuti dengan padamnya pompa primer, turbin dan hilangnya pasokan daya AC darurat.

### **Model Perhitungan**

Untuk mengevaluasi kinerja sistem primer PWR Surry digunakan kode Program RELAP/SCDAP. Kode program komputer RELAP/SCDAP memodelkan kejadian operasi normal maupun kecelakaan dengan menggunakan berbagai persamaan termohidrolika satu dimensi yang diterapkan untuk kondisi transient dan dua aliran fasa. Kode program ini menyelesaikan persamaan konservasi untuk mensimulasikan dua fasa cair dan uap yaitu konservasi massa, momentum dan energi pada setiap fasanya.

Adapun persamaan-persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah sebagai berikut [2,5]:

Persamaan konservasi massa uap

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g v_g A) = \Gamma_g \quad (1)$$

Persamaan konservasi massa cair

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f v_f A) = \Gamma_f \quad (2)$$

Persamaan konservasi momentum uap

$$\begin{aligned} & \alpha_g \rho_g A \frac{\partial v_g}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_g \rho_g A \frac{\partial^2 v_g}{\partial x} = \\ & - \alpha_g A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_g \rho_g B_x A - (\alpha_g \rho_g A) FWG(v_g) + T_g A (v_{gt} - v_g) \\ & - (\alpha_g \rho_g A) FIG(v_g - v_f) - C \alpha_g \alpha_f \rho_m A \left[ \frac{\partial(v_g - v_f)}{\partial t} + v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} - v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan konservasi momentum cair

$$\begin{aligned} & \alpha_f \rho_f A \frac{\partial v_f}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha_f \rho_f A \frac{\partial^2 v_f}{\partial x} = \\ & - \alpha_f A \frac{\partial P}{\partial x} + \alpha_f \rho_f B_x A - (\alpha_f \rho_f A) FWG(v_f) + T_g A (v_{ft} - v_f) \\ & - (\alpha_f \rho_f A) FIG(v_f - v_g) - C \alpha_f \alpha_g \rho_m A \left[ \frac{\partial(v_f - v_g)}{\partial t} + v_g \frac{\partial v_f}{\partial x} - v_f \frac{\partial v_g}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

Persamaan (5) konservasi energi uap

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g U_g) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g U_g v_g A) = \\ & - P \frac{\partial \alpha_g}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g v_g A) + Q_{wg} + Q_{ig} + \Gamma_{ig} h_g^* + T_w h_g' + DISS_g \{-Q_{gf}\} \end{aligned} \quad (5)$$

Persamaan konservasi energy cairan

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f U_f) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f U_f v_f A) = \\ & - P \frac{\partial \alpha_f}{\partial t} - \frac{P}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f v_f A) + Q_{wf} + Q_{if} + \Gamma_{ig} h_f^* + T_w h_f' + DISS_f \{+Q_{gf}\} \end{aligned} \quad (6)$$

Persamaan konservasi masa komponen *non-condensable*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g X_n) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_g \rho_g X_n v_g A) = 0 \quad (7)$$

Persamaan konsentrasi Boron dalam medan cair

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_f \rho_f C_b v_b A) = 0 \quad (8)$$

Keterangan persamaan (1) – (8),

$\alpha_g, \alpha_f$  = fraksi void gas, fluida

$\rho_g, \rho_f$  = kerapatan fasa gas, fluida

$v_g, v_f$  = kecepatan fasa gas, fluida

A = luas permukaan

P = tekanan

$\Gamma_g, \Gamma_f$  = temperature fasa gas, fluida

$U_g, U_f$  = energi internal spesifik gas, fluida

## Nodalisasi

Untuk memecahkan persamaan-persamaan di atas maka sistem pendingin primer reaktor digambarkan dalam bentuk nodalisasi sesuai dengan komponen yang terlibat. Dalam uraian ini sistem primer dibagi dalam dua bagian yaitu nodalisasi untuk loop sistem pendingin dan untuk bejana tekan reaktor. PWR Surry adalah reaktor daya dengan tiga loop dimana loop a dan b terdiri dari bejana tekan (PRV = pressurizer reactor vessel), hotleg, pembangkit panas (SG = steam generator), dan coldleg, sedangkan loop c terdiri dari bejana tekan, hotleg, pressurizer (PZR), pembangkit panas, dan coldleg. Pada masing-masing loop terdapat katup keselamatan uap utama (MSSV = main steam safety valve), katup pelepasan uap utama (MSRV = main steam relief valve), katup isolasi uap utama (MSIV = main steam isolation valve), Pengumpan air utama (MFW = main feed water) dan akumulator (ACC), katup power operated relief valve (PORV). Gambar 1 menunjukkan nodalisasi loop a, b dan c PWR surry.

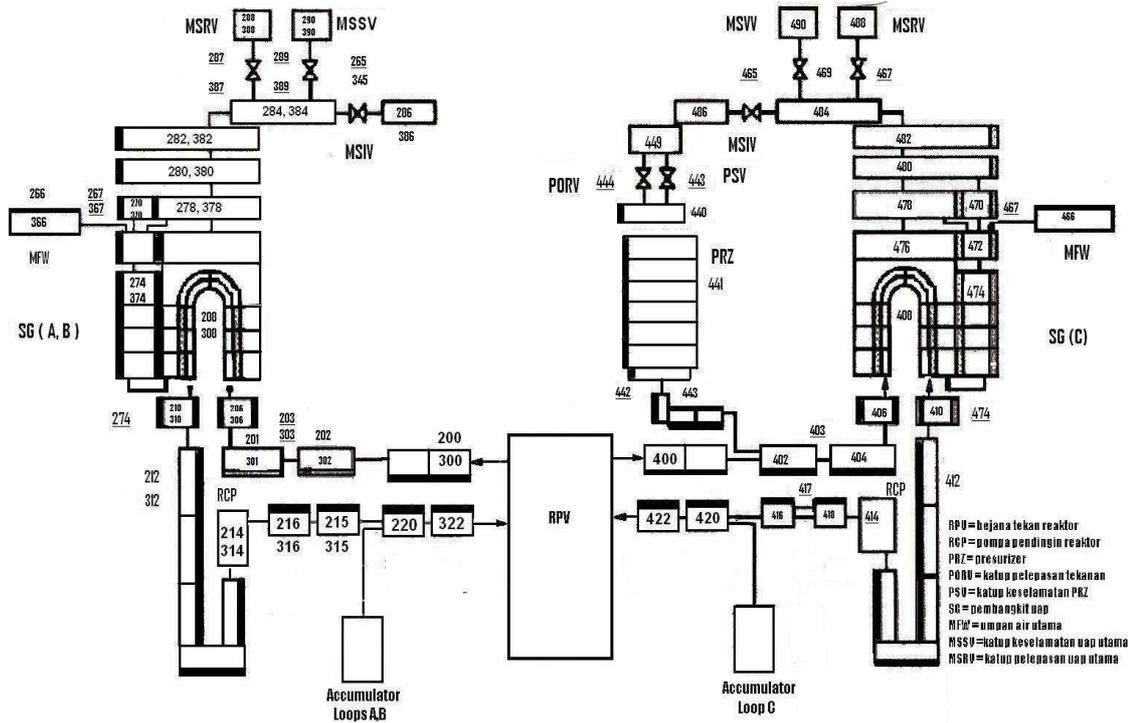
Khusus bejana tekan nodalisasi komponen hidrolik terdiri dari 5 kanal teras, dan 1 kanal bypass teras, 5 kanal upper plenum, 5 kanal housing, kanal aliran downcomer, sungkup atas dan sungkup bawah, lower plenum. Gambar 2 menunjukkan nodalisasi komponen hidrolik pada bejana tekan reaktor PWR Surry[2,4].

## Input

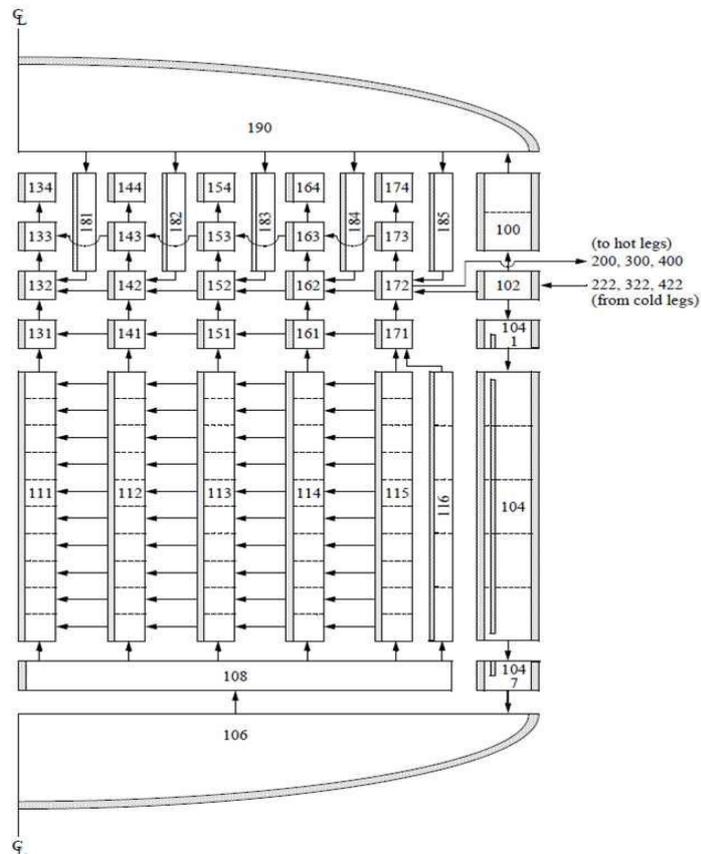
Sebagai input dalam evaluasi kejadian station black-out yang diikuti dengan gagal menutupnya PORV pada Pressurizer ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Input Simulasi SBO dengan gagal menutupnya PORV Steam Generator dan Pressurizer

Parameter	Nilai
Daya (MW)	2441
Tekanan (MPa)	14,7 MPa.
Temperatur operasi (K)	500 K
Susunan elemen bakar	157 (15 x 15)
Tinggi aktif bahan bakar (m)	3,66
Accumulated borated water (kg)	29100 (at T = 322 K)
Accumulator initial pressure (MPa)	4,24
Fuel rod	240
Fuel pellet stack length (m)	3,6576
Control rod	21
Fuel pellet stack (m)	4.634
Inconel spacer grid location	0,0; 1,46; 1,83; 2,19; 2,93



Gambar 1. Nodalisasi loop PWR Surry[2]



Gambar 2. Nodalisasi bejana tekan PWR Surry[2]

## Simulasi

Dalam simulasi ini diasumsikan terjadi station blackout setelah reaktor beroperasi 100 detik dan listrik AC untuk sistem keselamatan gagal berfungsi. Oleh karena itu pompa di setel untuk padam setelah 100 detik dan turun secara drastis menuju 1% daya normal. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem pendingin primer bila semua katup PORV Pressurizer berfungsi baik dan gagal menutup.

Untuk maksud tersebut dalam program dilakukan pengaturan buka tutup PORV Pressurizer dimana untuk kondisi normal katup akan membuka bila tekanan lebih besar dari 2375 psia atau 16 MPa dan menutup bila tekanan lebih kecil dari tekanan tersebut.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam simulasi ini reaktor telah beroperasi 100 detik dan tiba-tiba terjadi Blackout dan diikuti oleh padamnya pompa. Hasil simulasi setelah pompa padam pada detik ke 100 menunjukkan bahwa daya reaktor langsung turun menuju daya 52 MW pada detik ke 200 detik dan terus menurun hingga 10 MW. Penurunan daya reaktor setelah pemadaman reaktor menyebabkan turunnya temperatur pendingin primer namun selanjutnya akumulasi sisa panas akan membuat naiknya temperatur primer. Apabila tidak terkendali kenaikan temperatur bisa mencapai titik leleh bahan bakar yang menyebabkan melelehnya bahan bakar.

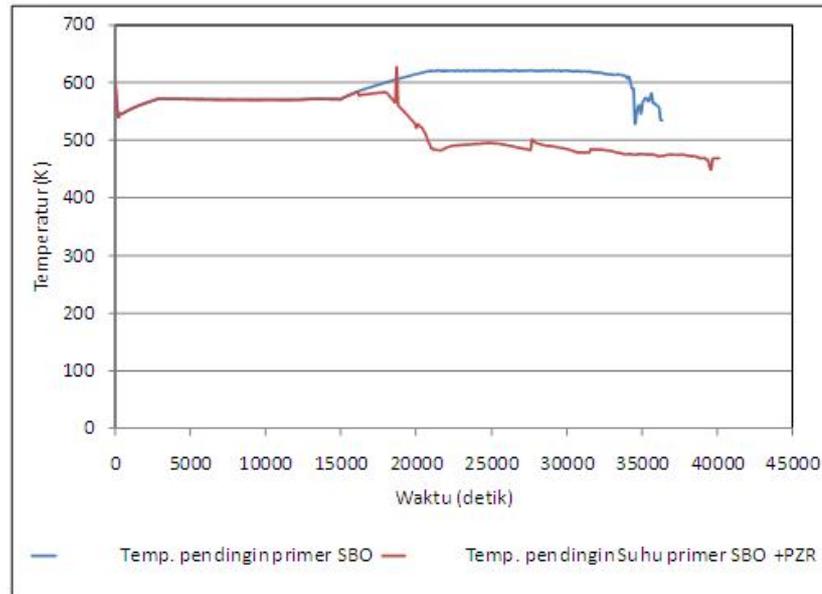
Berikut ini diuraikan hasil perhitungan parameter sistem primer dengan menggunakan RELAP/SCDAP. Dalam Tabel 2 diuraikan urutan kejadian sejak terjadinya SBO hingga terjadinya pelelehan bahan bakar.

Tabel 2. Urutan kejadian dalam Sistem Pendingin Primer Reaktor

Kejadian	Waktu (detik)	
	Sebelum kegagalan PORV <i>Pressurizer</i>	Setelah kegagalan PORV <i>Pressurizer</i>
Trip pompa primer	100	100
Daya mendekati nol (52 MW)	200	200
Tekanan di Primer mulai turun	16400	16200
Level air di bejana tekan mulai turun	21000	16300
Level air di <i>Pressurizer</i> mulai turun	21600	17900
Akumulator mulai aktif	Tidak Aktif	21000
Temperatur saat teras mulai tidak tergenang air ( <i>uncovered</i> )	27200	tidak tercapai
Terjadi pelelehan	34200	>34200

## Temperatur Pendingin Primer

Gambar 3 menunjukkan hasil simulasi temperatur pendingin primer ini PLTN Surry.

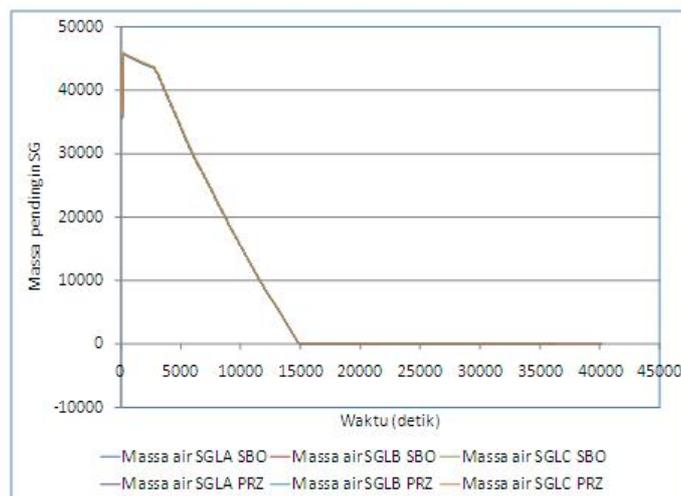


Gambar 3. Dinamika temperatur pendingin primer setelah kejadian SBO dan Kejadian SBO yang diikuti gagal menutupnya katup PORV Pressurizer.

Dari gambar terlihat bahwa akibat pemadaman reaktor setelah kejadian SBO temperatur pendingin primer turun dari 600 K menjadi 540 K pada detik ke-200 dan oleh panas sisa dalam pendingin reaktor maka temperatur pendingin primer naik perlahan-lahan hingga mencapai suhu tunak hingga mencapai 572 K pada detik ke 2900 dan bertahan terus hingga detik ke 15000. Dalam simulasi ini diatur bahwa katup sisi sekunder Steam Generator akan membuka dan menutup bila tekanan mencapai 1000 psia atau 6 MPa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa massa air sisi kanan sekunder habis pada detik ke-15000 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Dengan habisnya pemindah panas pada sisi sekunder SG maka temperatur sistem pendingin primer menjadi naik mencapai suhu 621 K pada detik ke-20000 bersamaan dengan itu pula terjadi kenaikan tekanan sampai detik ke-35000. Pada detik ini bahan bakar UO<sub>2</sub> dan kelongsong Zr sudah mengalami pelelehan dan teras sudah tidak tergenangi air dan temperatur menjadi turun drastis.

Simulasi kedua dilakukan dengan asumsi bahwa setelah kejadian SBO dan tekanan mencapai 2280 psia atau 15,72 MPa, katup PORV tidak dapat menutup kembali. Sebagai akibatnya terjadi pelepasan uap panas yang cukup besar sehingga pada detik ke-16200 terjadi penurunan tekanan bersamaan dengan penurunan temperatur hingga mencapai 470 K pada detik ke lebih besar dari 40000.



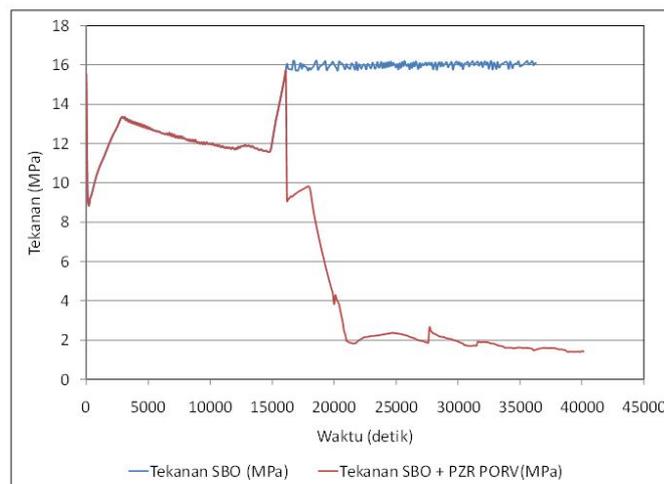
Gambar 4. Penurunan massa air di sisi sekunder Steam Generator

## Tekanan

Salah satu fungsi Presurizer adalah untuk mengendalikan tekanan sehingga air pendingin tidak mengalami pendidihan atau menjadi fase gas. Demikian juga tekanan di semua titik di sistem primer adalah sama. Karena sistem primer merupakan sistem yang tertutup maka dalam kondisi saturasi tekanan sistem pendingin primer berkaitan langsung dengan temperatur pendingin primer. Apabila temperatur pendingin primer naik maka tekanan pendingin primer pun akan naik, demikian sebaliknya. Oleh karena itu sejalan dengan dinamika temperatur pendingin primer maka tekanan sistem pendingin primer juga mengalami dinamika yang sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Grafik untuk simulasi pertama terlihat bahwa tekanan tiba-tiba turun dan naik kembali pada detik ke-200 dan ke-2900. Pada detik ke 15000 terjadi kenaikan tekanan yang cukup tajam disebabkan oleh karena temperatur air meningkat dan sebagian air pendingin berubah menjadi uap. Peningkatan ini terjadi sebagai akibat habisnya massa air di sisi sekunder SG. Karena tekanan mencapai 15,7 MPa maka terjadi pembukaan katup akan tetapi bila tekanan mencapai 16,2 MPa maka katup akan menutup. Oleh karena itu terlihat grafik tekanan yang naik turun sekitar 15,72 MPa dan 16,2 MPa sejak detik ke-15000. Karena tekanan sistem primer selalu dalam keadaan tinggi maka tekanan tidak pernah dapat memicu pengaktifan akumulator yang terjadi bila tekanan 4,24 MPa.

Pada simulasi kedua diasumsikan bahwa setelah kejadian SBO diikuti oleh gagal menutupnya katup PORV Pressurizer pada saat tekanan mencapai 16,2 MPa. Pada simulasi kedua ini kondisi gagal menutupnya katup PORV terjadi pada detik ke-16400. Karena katup PORV selalu membuka maka tekanan primer di PZR terus menurun sampai mencapai titik terendah. Akan tetapi karena sistem pendingin primer dilengkapi dengan sistem keselamatan darurat berupa Akumulator maka pada saat tekanan mencapai 4,24 MPa akumulator menjadi aktif sehingga teras reaktor tetap digenangi air.



Gambar 5. Dinamika tekanan pendingin primer setelah kejadian SBO dan kejadian SBO yang diikuti gagal menutupnya katup PORV Pressurizer.

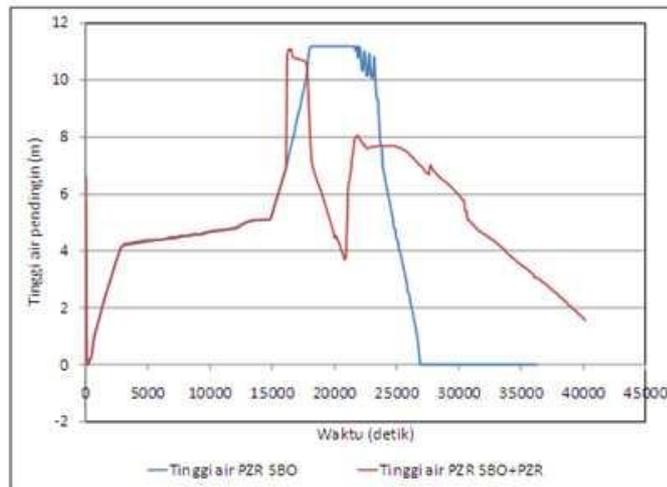
## Tinggi air di Presurizer dan Bejana Tekan.

Fungsi lain dari Pressurizer adalah sebagai tempat monitoring tinggi air. Karena Pressurizer berada pada lokasi yang lebih tinggi maka bila Pressurizer masih memiliki air yang cukup maka dapat diyakinkan bahwa seluruh bejana tekan masih penuh dengan air. Itu sebabnya Pressurizer dirancang dengan tinggi air yang tidak penuh sehingga dapat dijadikan tempat monitoring ketinggian air.

Pada tekanan yang sudah mencapai 16,2 MPa dan temperatur 621 K maka air pendingin mengalami ekspansi hingga memenuhi Presurizer. Untuk massa air yang sama maka volum akan bertambah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Akan tetapi ekspansi ini tidak berlangsung lama karena air mengalami penguapan dan oleh adanya buka tutup katup PORV maka air dalam Presurizer akan terus berkurang.

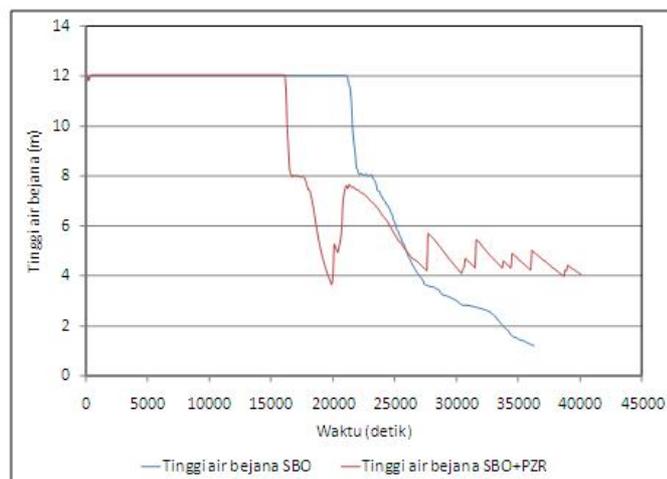
Pada gambar yang sama juga terlihat bahwa pada kondisi gagal menutupnya katup PORV di Pressurizer uap air akan terus terbuang dan sebagai akibatnya tekanan air di Pressurizer terus menurun.

Akan tetapi karena tekanan terus menurun hingga mencapai 4,24 MPa maka akumulator menjadi aktif dan memasok air bercampur borat sehingga tinggi air menjadi naik kembali. Detil fluktuasi tinggi air di Presurizer dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Dinamika tinggi air di Presurizer setelah kejadian SBO dan Kejadian SBO yang diikuti gagal menutupnya katup PORV Pressurizer.

Fluktuasi air di Presurizer secara langsung berpengaruh terhadap fluktuasi air pendingin di bejana tekan reaktor seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Pada kondisi SBO dan buka tutupnya katup PORV Pressurizer maka tinggi air di bejana tekan terus turun hingga menyebabkan teras reaktor tidak tergenangi air (uncovered). Sedangkan pada kejadian gagalnya katup PORV menutup, tekanan yang terus menurun hingga 4,24 MPa dapat mengaktifkan Akumulator sehingga tinggi air tidak sempat mencapai bagian paling atas teras (3,6 m).



Gambar 7. Dinamika tinggi air di Bejana Tekan (PV) setelah kejadian SBO dan Kejadian SBO yang diikuti gagal menutupnya katup PORV Pressurizer.

### Pelelehan bahan bakar.

Seperti pada uraian di atas, pada kondisi katup PORV Pressurizer berfungsi baik tidak mengalami kegagalan maka air pendingin dalam bejana tekan reaktor bisa mencapai ketinggian di bawah bagian paling atas bahan bakar teras. Kondisi ini dicapai pada detik ke 27200. Dengan tidak tertutupnya bahan bakar oleh pendingin maka temperatur bahan bakar menjadi naik dan disertai terjadinya oksidasi Zirconium pada kelongsong bahan bakar. Temperatur bahan bakar terus naik hingga mencapai titik leleh kelongsong dan bahan bakar pada detik ke 34200 atau 9,5 jam setelah kejadian SBO yang menyebabkan kelongsong dan bahan bakar meleleh. Sebagai akibatnya produk fisi terlepas

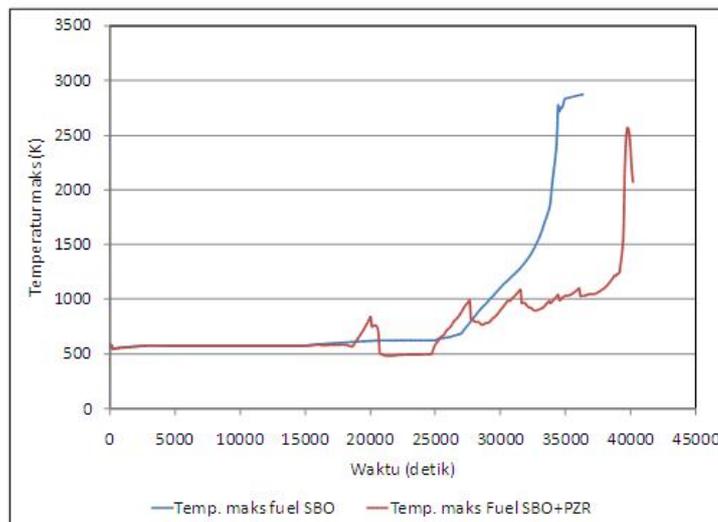
ke pendingin. Dilihat dari perkembangan pelelehan bahan bakar reaktor LWR (Light Water Reactor) maka peristiwa oksidasi terjadi pada temperatur 1500 K, pelelehan Zircaloy terjadi pada temperatur 2150 K dan diikuti pelelehan bahan bakar. Detil kondisi temperatur maksimum bahan bakar ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada simulasi kedua dimana setelah SBO katup PORV gagal menutup maka tekanan menjadi turun terus hingga mencapai batas 4,24 MPa sehingga mengaktifkan Akumulator. Dengan tambahan air pendingin dari akumulator maka teras reaktor tidak sampai pada ketinggian dibawah bagian teratas teras. Oleh karena itu bahan bakar selalu tergenangi air. Sebagai akibatnya kenaikan temperatur pendingin primer terbatas bahkan mengalami penundaan menjadi lebih besar dari 9,5 jam.

Pada kondisi dimana katup PORV tidak gagal menutup dimana tekanan terus menurun hingga mencapai 4,24 MPa dan secara otomatis sistem akan mengaktifkan Akumulator dan menginjeksi air. Oleh karena itu teras reaktor masih tergenangi air dan tidak menyebabkan temperatur bahan bakar naik mencapai pelelehan. Dalam simulasi ini belum terlihat pelelehan namun oleh karena jumlah air yang menipis, temperatur bahan bakar juga akan tetap naik bahkan bisa mencapai titik leleh, namun secara waktu kondisi pelelehan baru akan dicapai dalam waktu jauh lebih besar dari 9,5 jam.

### Pembahasan

Terjadinya pelelehan bahan bakar reaktor diawali dengan tidak tergenanginya teras oleh penurunan tinggi air di bejana tekan reaktor. Pada kondisi katup PORV dapat membuka dan menutup maka tekanan primer akan tetap dalam kondisi tinggi (berkisar 15,8 MPa sampai 16,2 MPa) dan mengeluarkan uap. Sebagai akibatnya tinggi air di bejana tekan akan terus berkurang bahkan sampai mencapai dibawah batas atas teras pada detik ke 27200 atau 7,5 jam setelah SBO. Kondisi ini akan menyebabkan teras meleleh pada detik ke 34200 atau 9,5 jam setelah SBO.



Gambar 8. Temperatur maksimum bahan bakar di teras setelah kejadian SBO dan Kejadian SBO yang diikuti gagal menutupnya katup PORV Pressurizer.

Usaha menghambat terjadinya pelelehan teras dapat dilakukan dengan mengaktifkan sistem keselamatan sebelum tinggi air dibawah batas atas teras. Dalam simulasi kedua terlihat bahwa akumulator PWR Surry aktif sebelum teras tidak tergenangi air dengan mengatur tekanan pengaktifan akumulator pada 4,24 MPa dan ini terjadi pada detik ke 21000 atau 5,8 jam setelah SBO. Dengan demikian akumulator dapat menahan terjadinya pelelehan sampai waktu jauh melebihi 9,5 jam setelah SBO. Fakta ini mendukung rancangannya sistem depresurisasi otomatis pada reaktor generasi ke III yang tidak dimiliki PWR Surry.

Perhitungan waktu pelelehan 9,5 jam menunjukkan PWR Surry juga memiliki karakteristik yang sama dengan beberapa PWR generasi II lainnya dimana waktu pelelehan berkisar 7-10 jam

setelah SBO[1]. Dengan adanya penundaan ini diharapkan operator sudah dapat mengambil langkah-langkah untuk mengatasi berbagai masalah yang menyebabkan pelelehan teras.

## **KESIMPULAN**

Hasil evaluasi kinerja sistem primer PWR Surry menunjukkan bahwa setelah kejadian station blackout (SBO) dapat menyebabkan terjadinya pelelehan bahan bakar dalam waktu 9,5 jam. Hal ini disebabkan tinggi air di bejana tekan terus menurun sampai di bawah batas atas teras.

Aktifnya sistem keselamatan akumulator akibat tekanan yang menurun sampai 4,24 MPa telah menyebabkan penambahan pendingin di atas teras, hal ini dapat menunda terjadinya pengosongan teras. Tergenangnya teras dengan air pendingin menyebabkan proses pelelehan menjadi tertunda, sehingga tersedia waktu yang cukup untuk mengambil langkah-langkah pencegahan.

## **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ir. Surip Widodo, M.IT atas kesempatan yang diberikan kepada kami untuk mempelajari RELAP/SCDAP sekaligus menjadi tutor kami dalam menggunakan kode program RELAP/SCDAP. Dengan pengalaman ini kami dapat memahami fenomena kuat sumber radioaktif yang keluar pada saat kecelakaan dalam PLTN secara terintegrasi dan komprehensif. Juga ucapan terima kasih kepada Bapak Ir. Andi Sofrani, M.Eng dan Bapak Ir. Susyadi, M.Eng yang secara teknis membantu kami.

## **DAFTAR PUSTAKA**

1. PROSEK, A., Cizelj L., Long Term Station Blackout Accident Analysis of a PWR with RELAP5/MOD3.3, Science and Technology of Nuclear Installation, Volume 2013, Article ID 831687, 2013, hal 1
2. KNUDSON, D.L. GHAN L.S., DOBBE C.A., SCDAP/RELAP5 Evaluation Of The Potential For Steam Generator Tube Ruptures As A Result Of Severe Accidents In Operating Pressurized Water Reactors, INEEL/EXT-98-00286, Revision 1, September 1998
3. Kolaczowski, A.M. and Payne A.C. Station Blackout Accident Analysis, US NRC NUREG/CR 3226, 1983.
4. HIDAKA, A, SODA, K, SUGIMOTO, J, SCDAP/RELAP Analysis of Station Blackout with Pump Seal LOCA in Surry Plant, Journal of Nuclear Science and Technology, 32 {6}, pp 527-638, 1995
5. US NRC, Severe Accident Risk, NUREG 1150 vol 1, 1990