

## KAJIAN TERMOHIDROLIKA TERAS PLTN PWR DAN BWR TERHADAP KEJADIAN SBO MENGACU PADA KECELAKAAN FUKUSHIMA

**Muhammad Subekti**

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN) - BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. No. 80 Serpong, Tangerang Selatan 15310  
e-mail: [subekti@batan.go.id](mailto:subekti@batan.go.id)

### ABSTRAK

**KAJIAN TERMOHIDROLIKA TERAS PWR DAN BWR TERHADAP KEJADIAN SBO MENGACU PADA KECELAKAAN FUKUSHIMA.** Kecelakaan Fukushima menginisiasi pembelajaran bagi jenis Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) lainnya termasuk jenis Pressured Water Reactor (PWR). Penyebab utama kecelakaan ini adalah station blackout (SBO) sehingga sistem pendingin darurat pada teras, pemindah panas peluruhan, dan pengungkung bejana tidak dapat berfungsi. Kajian dilakukan adalah untuk menggali hasil kajian, analisis serta pengalaman operasi PLTN yang sudah dipublikasi jauh sebelum kecelakaan Fukushima terjadi. Kemudian kajian ini juga melakukan verifikasi dengan data kecelakaan Fukushima untuk memperoleh pengetahuan bagi pengembangan desain reaktor masa depan. Kajian menghasilkan kesamaan pola PWR dengan BWR, dan menyimpulkan sebuah rekomendasi kecelakaan rekomendasi untuk melakukan diversifikasi terhadap sistem pendingin darurat dan sistem generator diesel sehingga resiko kegagalan heatsink utama berakibat pelelehan teras bisa diperkecil.

**Kata kunci:** SBO, pelelehan teras, kecelakaan Fukushima, PWR, BWR.

### ABSTRACT

**THERMALHYDRAULICS ASSESMENT OF PWR AND BWR CORES ON SBO EVENT REFERING FUKUSHIMA ACCIDENT.** Fukushima accident initiated lesson learning for any other Nuclear Power Plant (NPP) types including Pressure Water Reactor (PWR) type. The main cause of the accident is station blackout (SBO) so that the system for core emergency cooling, decay heat removal, and vessel containment were fails to work. The assessment was done for exploring the published result of the assessments, analysis, and NPP operation experiences a long time before Fukushima accident happened. Furthermore, this assessment also carried out verification with Fukushima accident data to expertise the knowledge for future reactor design development. The assessment results accident pattern similarity of PWR with BWR's one, summaries a recommendation to carry out diversification for emergency cooling system as well as diesel generator system so that the risk of ultimate heatsink failure effected to core melting, could be decreased.

**Keywords:** SBO, core melting, Fukushima Accident, PWR, BWR

### 1. PENDAHULUAN

Kecelakaan Fukushima sebagai dampak dari tsunami telah menimbulkan kerugian yang besar sekali. Penyebab utama kecelakaan ini adalah *station blackout* (SBO) sehingga sistem pendingin darurat pada teras, pemindah panas peluruhan, dan pengungkung bejana reaktor (*reactor vessel containment*) tidak dapat berfungsi. Sebelum kecelakaan Fukushima terjadi, banyak pakar sudah mendiskusikan kejadian SBO dalam berbagai pertemuan ilmiah, bahkan menghasilkan beberapa laporan keselamatan yang membahas kejadian tersebut secara detail<sup>[1,2,3,4]</sup>. Namun catatan pembelajaran kasus SBO tersebut tidak diacu dalam merancang sistem keselamatan pada PLTN yang mengalami kecelakaan di Fukushima.

Kajian ini membahas beberapa catatan pembelajaran kejadian SBO, melakukan studi pustaka terkait dengan berbagai catatan kajian dan analisa termasuk rekomendasi yang dituangkan dalam regulasi pada masa lalu serta melakukan verifikasi dengan kejadian kecelakaan Fukushima. Selain itu, kajian juga membandingkan desain Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) generasi II jenis *Boiling Water Reactor* (BWR) dan *Pressurized Water Reactor* (PWR) dalam hal menghadapi kejadian SBO serta kemungkinan kontribusi pengalaman kecelakaan Fukushima terhadap perubahan desain pada PLTN generasi II.

Kajian ini dilengkapi dengan verifikasi kajian dan analisis dalam data pustaka menggunakan data kecelakaan Fukushima. Tujuan kajian ini adalah untuk (i) menganalisis pengalaman operasi PLTN sebelum kecelakaan Fukushima, (ii) membandingkan kondisi kecelakaan pada PLTN tipe BWR dan PWR, (iii) kemudian melakukan verifikasi dengan data kecelakaan Fukushima. Manfaat dari kajian ini adalah untuk memperoleh bagian terpenting pengembangan desain reaktor masa depan dalam mitigasi kejadian SBO.

## 2. DASAR TEORI

### 2.1 Station Blackout (SBO)

Salah satu kasus *severe accident* (kecelakaan parah) adalah SBO yang didefinisikan sebagai kehilangan daya listrik AC secara total. IAEA mendefinisikan bahwa *severe accident* adalah kondisi kecelakaan lebih parah dari *Design Basis Accident* (DBA) dan memasukkan kerusakan teras yang signifikan seperti pelelehan bahan bakar<sup>[5]</sup>.

Dalam SBO, semua catu daya termasuk generator diesel juga diasumsikan gagal. Padahal sistem pendingin teras, sistem pemindahan panas peluruhan dan sistem pendingin pengungku bejana tekan memerlukan catu daya listrik. Dengan demikian, konsekuensi dari SBO adalah *severe*, dan beresiko pelelehan teras. SBO juga memasukkan kehilangan daya pada saat sistem baterai juga gagal. Meskipun sistem baterai berfungsi sementara menunda kondisi kehilangan daya total selama maksimum 8 jam. Regulasi telah memandang waktu baterai cukup untuk PLTN melakukan usaha pemulihan catu daya<sup>[6]</sup>.

Kecelakaan SBO adalah kontributor terbesar penyebab pelelehan teras<sup>[1]</sup> dimana analisis ini sudah diperkirakan jauh sebelum kecelakaan Fukushima terjadi. Evaluasi SBO menjadi sangat penting karena memiliki resiko besar terhadap pelelehan teras dan frekuensi penyebab cukup signifikan. Pada tahun 1968-1983, peristiwa kehilangan catu daya PLTN secara total telah terjadi sebanyak 46 kasus disebabkan oleh penyebab internal (30 kasus), *grid blackout* (10 kasus), berbagai jenis badai misalnya badai tornado, badai tropis dan sebagainya (6 kasus)<sup>[7]</sup>.

### 2.2 Panas Peluruhan

Setelah reaktor *shutdown*, reaksi fisi berhenti. Tetapi peluruhan hasil fisi masih terus berlangsung menuju radioaktif yang lebih stabil. Peluruhan hasil fisi ini melepaskan energi dalam jumlah yang semakin menurun secara pelan disebut panas peluruhan (*decay heat*). Untuk reaktor daya besar, panas peluruhan dalam bahan bakar harus dikendalikan dengan pendinginan secukupnya

meskipun reaktor sudah *shutdown*. Besar panas peluruhan tergantung pada fraksi bakar, daya operasi reaktor, waktu operasi, dan waktu pendinginan setelah *shutdown* sesuai dengan persamaan<sup>[1]</sup>:

$$P_d(t, T) = 0,0622P_0(t^{-0,2} - (T + t)^{-0,2}) \quad (1)$$

dimana:

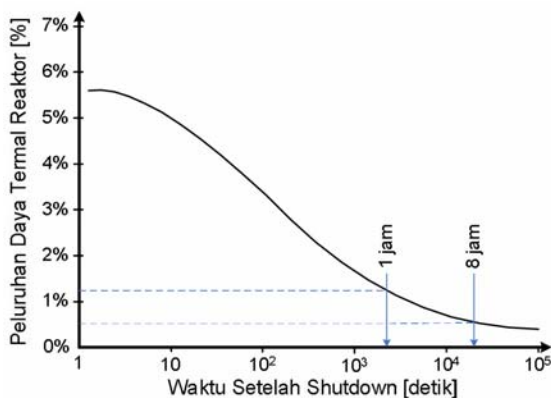
$P_d$  = Daya panas peluruhan

$P_0$  = Daya reaktor

$t$  = Waktu operasi reaktor pada daya penuh

$T$  = Waktu pendinginan reaktor setelah *shutdown*

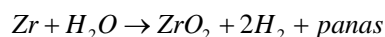
Persamaan (1) memberikan hasil tepat untuk waktu pendinginan 10 detik sampai 100 hari meskipun belum memasukkan faktor jenis produk fisi secara detail. Kontribusi panas peluruhan ini sudah memasukkan kontribusi dari radiasi beta dan radiasi gamma. Gambar 1 memperlihatkan grafik peluruhan daya reaktor setelah *shutdown* sesuai dengan persamaan (1).



Gambar 1. Grafik peluruhan daya/panas reaktor nuklir setelah *shutdown*<sup>[1,3]</sup>

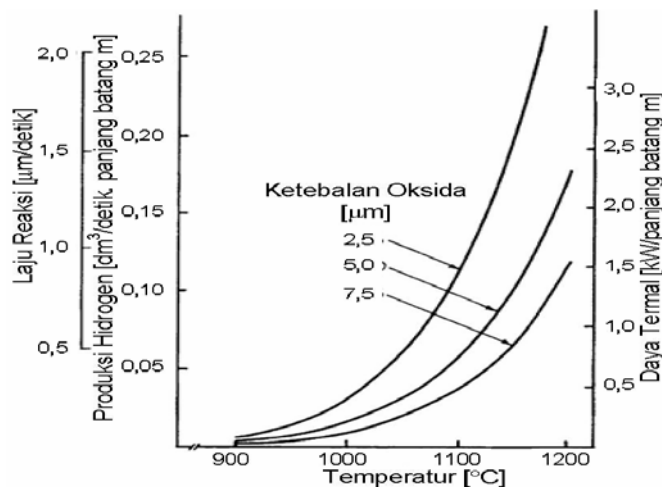
### 2.3 Kontribusi Panas Oksidasi

Panas peluruhan dalam teras yang gagal dipindahkan oleh pendingin reaktor, menyebabkan terjadi pemanasan berlebihan dalam reaktor. Setelah fluks panas kritis terlewati, temperatur *cladding* akan meningkat secara drastis menjadi beberapa ratus derajat Celcius. Pada saat temperatur *cladding* mencapai sekitar 900°C, oksidasi *cladding* mulai meningkat. Sehingga pada temperatur tersebut gas Hidrogen mulai diproduksi dengan cepat dan menghasilkan panas reaksi sesuai dengan proses berikut:



Reaksi Hidrogen ini memberikan kontribusi percepatan kenaikan suhu teras reaktor. Gambar 2 memperlihatkan grafik laju reaksi oksidasi menghasilkan gas Hidrogen pada batang bahan bakar. Pada gambar ini memperlihatkan bahwa kontribusi panas termal ditentukan oleh ketebalan oksidasi dan temperatur bahan bakar. Peningkatan drastis laju reaksi terjadi pada saat temperatur bahan bakar melebihi 1100°C. Dengan demikian kontribusi laju reaksi Hidrogen pada peningkatan

panas dalam teras kemungkinan akan signifikan. Pembahasan detail pada kenaikan suhu teras secara drastis dibahas pada bab 4.2 dalam makalah ini.



Gambar 2. Grafik laju generasi panas termal pada batang bahan bakar dalam proses oksidasi<sup>[8]</sup>

## 2.4 Pelelehan Teras

Beberapa kasus SBO telah dipelajari pada PLTN di Swedia, Jerman, dan USA. Urutan kejadian memiliki pola yang sama selama proses transien reaktor. Pendingin primer mendidih karena panas peluruhan setelah *shutdown* tidak bisa dikeluarkan. Peningkatan tekanan dan temperatur sistem primer menyebabkan peningkatan jumlah fraksi uap sehingga ketinggian cairan air dalam teras menurun. Kecepatan proses ini tergantung pada daya reaktor dan luas kondensasi dalam pengungkung bejana reaktor. Pada PLTN BWR generasi pertama, luas pengungkung mencapai 6.000 m<sup>3</sup>, sedangkan PLTN mulai generasi berikutnya memiliki luas pengungkung sangat besar, yaitu 30.000 m<sup>3</sup><sup>[9]</sup>.

## 2.5 Kriteria Desain

Kriteria desain membatasi oksidasi harus kurang dari 17% dari total luas *cladding* pada situasi kecelakaan<sup>[2]</sup>. Kriteria keselamatan selama kecelakaan SBO diperbarui oleh US-NRC pengganti dari US-AEC<sup>[3]</sup> dan ayat lain terkait temperatur maksimum bahan bakar 1204°C (1477 K) sudah diperbarui menjadi 1498°C (1771 K)<sup>[4,5]</sup>.

## 3. METODE KAJIAN

Kajian dilakukan dengan cara studi pustaka terhadap semua catatan diskusi, terutama catatan yang sudah dipublikasikan oleh lembaga atau institusi terkait dengan keselamatan reaktor nuklir. Studi pustaka memperoleh banyak catatan yang sesuai dengan urutan kejadian kecelakaan Fukushima. Bahkan studi pustaka untuk kasus PLTN PWR menunjukkan bahwa urutan kejadian tidak berbeda. Kajian ini akan dilengkapi dengan verifikasi hasil studi pustaka menggunakan data kecelakaan Fukushima selama terjadi SBO untuk melengkapi data kajian. Sedangkan data kajian

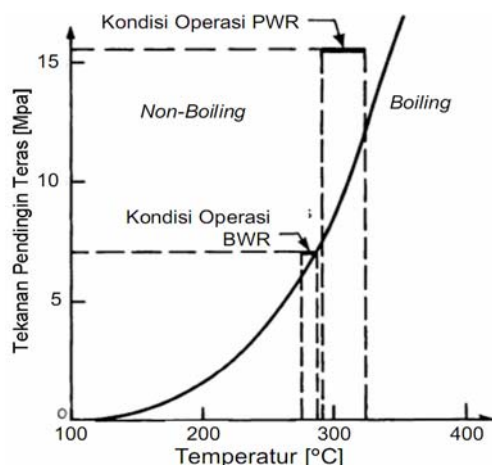
untuk PLTN generasi 3 dapat diperoleh dari hasil komunikasi digital secara pribadi yang dapat dipublikasikan. Kesimpulan pembelajaran kecelakaan Fukushima terfokus pada pembahasan termohidrolika teras. Beberapa kejadian parah seperti ledakan gas Hidrogen dan sebagainya dibahas secara umum dan sebagai pelengkap hasil kajian untuk menunjukkan konsekuensi urutan kejadian setelah teras reaktor mengalami pemanasan secara tidak normal.

Analisis dilakukan terbatas dalam hal termohidrolika teras sesuai dengan urutan DBA *severe accident*. *Beyond* DBA tidak dibahas untuk membatasi ruang lingkup kajian termohidrolika teras reaktor.

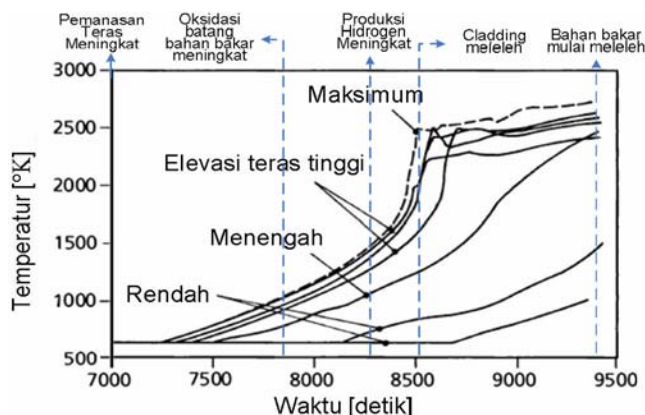
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1 Pemanasan Teras Akibat SBO

Kondisi operasi BWR berbeda dengan kondisi operasi PWR. Kegagalan sistem pendingin darurat pada BWR akan memicu timbulnya gelembung air (*boiling*) melebihi kondisi normal sebesar 13%. Sepintas, terlihat bahwa proses kecelakaan akibat SBO akan berbeda pada kedua jenis PLTN ini. Bila kita perhatikan Gambar 3, terlihat bahwa kurva tekanan dan temperatur saturasi air disertai dengan posisi daerah operasi BWR berbeda dengan daerah operasi PWR.



Gambar 3. Tekanan dan temperatur saturasi air



Gambar 4. Hasil perhitungan RELAP untuk kejadian SBO<sup>[10]</sup>

BWR beroperasi menyentuh garis saturasi. Sedangkan PWR beroperasi tanpa gelembung air. Sehingga setelah SBO terjadi, PWR *shutdown* dan pompa mati berdampak pada penurunan tekanan primer. Penurunan temperatur setelah *shutdown* tidak berlangsung lama karena kondisi saturasi tercapai sehingga timbul banyak gelembung air dalam teras PWR yang menghambat proses perpindahan panas. Panas peluruhan tidak cukup dipindahkan ke air pendingin sehingga pemanasan teras terjadi dengan cepat. Kenaikan temperatur selanjutnya akan memperbanyak gelembung air yang semakin memperburuk proses perpindahan panas. Bila injeksi pendingin darurat pada tekanan rendah gagal berfungsi, akselerasi peningkatan temperatur akan semakin cepat. Proses kecelakaan TMI-2 membuktikan bahwa perubahan fase cair dalam sistem primer terjadi dengan waktu yang sangat singkat akibat peningkatan temperatur pendingin primer secara drastis<sup>[9]</sup>. Pola pemanasan teras PWR setelah *shutdown* tidak berbeda dengan pemanasan pada BWR dan pada akhirnya kedua jenis PLTN ini berproses menuju pelelehan teras.

#### 4.2 Proses Pelelehan Teras

Pendekatan deterministik peristiwa kecelakaan ini sudah dihitung menggunakan kode RELAP jauh hari sebelum terjadi kecelakaan Fukushima<sup>[9,10]</sup>. Gambar 4 memperlihatkan hasil perhitungan tersebut. Hasil perhitungan terbagi dalam 3 daerah elevasi teras, yaitu elevasi tinggi untuk 1/3 teras dari bagian atas, elevasi menengah untuk 1/3 teras bagian tengah, dan elevasi rendah untuk 1/3 teras bagian bawah. Reaktor *shutdown* dan pompa mati terjadi pada saat waktu 400 detik. Kemudian temperatur teras reaktor meningkat akibat kekurangan pemindahan panas peluruhan. *Feedwater* dalam siklus sekunder PWR belum berfungsi selama *steam generator* sebagai *heatsink* belum bekerja berdasarkan sirkulasi alam. Sehingga teras menjadi *dryout* pada waktu 4300 detik. Kehilangan fungsi *heatsink* mengakibatkan tekanan dan temperatur terus meningkat. Sehingga *Pilot Operated Safety Relief Valve* (POS RV) menjadi terbuka dan melepaskan pendingin primer ke ruang pengungkung. Hal ini menyebabkan reaktor kehilangan sejumlah pendingin dan teras menjadi semakin panas secara drastis pada waktu 7200 detik. Sebenarnya pada waktu sekitar 7000 detik ini, *steam generator* mulai berfungsi sebagai *heatsink* dan teras bisa didinginkan secara alamiah. Namun jumlah panas peluruhan sudah terlalu banyak untuk bisa dipindahkan, sehingga temperatur teras makin meningkat dan mengakibatkan ketinggian air mulai turun dibawah batas normal. Oksidasi Zircaloy mulai terjadi pada waktu 7800 detik disertai dengan produksi gas Hidrogen. Produksi Hidrogen ini kemungkinan memberikan kontribusi signifikan pada kenaikan suhu bahan bakar secara drastis seperti yang sudah dibahas sebelumnya pada bab 2.3. Kemudian sejalan dengan peningkatan temperatur dalam teras, pelelehan material *cladding* dimulai pada waktu 8500 detik. Setelah temperatur bahan bakar 1850 K tercapai, peningkatan temperatur akan semakin cepat sampai pada temperatur pelelehan 2500 K. Dalam perhitungan ini, pada waktu 8550 detik, daerah elevasi tinggi (bagian atas tengah) teras mulai meleleh. Sedangkan daerah elevasi menengah juga akan meleleh setelah waktu 8600 detik secara tidak merata. Pada waktu 9500 detik pelelehan daerah elevasi menengah sudah meleleh secara merata.

### 4.3 Bagaimana Dengan Reaktor Generasi III ?

Konsep keselamatan pasif lebih banyak diterapkan pada berbagai desain PLTN jenis reaktor generasi 3 dan generasi 4<sup>[11,12]</sup>. Terkait dengan konsekuensi dari SBO berproses menjadi *severe accident*, salah satu PLTN generasi 3 jenis PWR yaitu *European Pressurized Reactor* (EPR) telah mengaplikasikan lebih banyak sistem keselamatan pasif untuk mengurangi tindakan darurat berupa struktur khusus penampungan pelelehan teras, media struktur penahan teras yang disebut "*core catcher*", peralatan ganda untuk menangkap gas Hidrogen dengan cepat dan penurunan tekanan tambahan dan lain-lain<sup>[9]</sup>. Hal yang sama juga diterapkan pada PWR jenis yang lain, yaitu *Vodno-Vodyanoi Energetichesky Reactor* (VVER) 1200Mwe buatan Rusia. Sedangkan PLTN PWR buatan Amerika Serikat, yaitu *Advance Pressurized Water Reactor* (APWR) dan PLTN jenis *Boiling Water Reactor* (BWR), yaitu *Advanced BWR* (ABWR, desain General Electric) dan *Efficient Simple BWR* (ESBWR, desain General Electric dan Hitach) memiliki peningkatan pada sistem pendingin teras pasif yang mengandalkan pada sirkulasi alam.

Beberapa jenis PLTN generasi III seperti *Advanced CANDU Reactor* (ACR, desain AECL Kanada), *Advanced Power Reactor* (APR, desain KEPCO Korea Selatan) dan sebagainya juga memiliki kehandalan tinggi dalam menerapkan sistem keselamatan pasif. Namun kecelakaan Fukushima mungkin akan berdampak pada perbaikan desain PLTN generasi III dan generasi IV. Tim penemu fakta dari para pakar *International Atomic Energy Agency* (IAEA) telah menemukan bukti bahwa kejadian SBO pada PLTN Fukushima terjadi melebihi waktu yang diasumsikan oleh pakar keselamatan, sehingga terjadi kegagalan dalam menyalurkan panas peluruhan menuju *heatsink* utama, yaitu air laut<sup>[13]</sup>. Dengan demikian, alternatif untuk menurunkan resiko pelelehan teras adalah peningkatan diversifikasi terhadap sistem pendingin darurat menuju *heatsink* utama dan sistem generator diesel darurat. Redundansi sistem generator diesel darurat sudah dilaksanakan oleh semua PLTN di dunia. Sedangkan diversifikasi sistem generator diesel belum diterapkan. Utilisasi diversifikasi ini bisa mengacu pada pengalaman PLTN Swedia dan Jerman. Semua PLTN PWR di Jerman memiliki *dedicated generator* dalam bangunan bunker. Sedangkan PLTN BWR Ringhals 1 di Swedia telah memiliki sistem yang sama<sup>[14]</sup>.

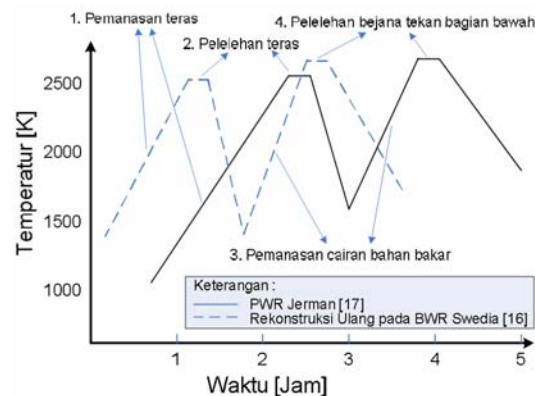
Proses pendinginan panas peluruhan dalam teras AP1000 hanya bertahan sampai 3 hari<sup>[15]</sup>. Setelah kejadian SBO, AP1000 akan *shutdown* dan panas peluruhan dalam teras akan terakumulasi dan memanaskan bejana tekan reaktor. Panas peluruhan teras akan dipindahkan oleh *Passive Residual Heat Removal* (PRHR) *heat exchanger* yang bekerja secara pasif dalam pengungkung. *Automatic Depressurization System* (ADS) memindahkan panas peluruhan dari *hotleg* menuju *In-Containment Refueling Water Storage Tank* (IRWST) dan kembali ke *coldleg* dalam sistem pendingin primer. Sistem keselamatan pasif dilengkapi dengan dua *Core Make-up Tank* (CMT), dua *Accumulator Tank* (ACC), *Lower Containment Sump* (CS) dan pertahanan terakhir *Passive Containment Cooling System* (PCCS). Kondisi pengungkung yang lebih luas dan peralatan sistem keselamatan pasif ini menunda pemanasan teras secara drastis selama 3 hari<sup>[15]</sup>. Setelah itu, temperatur teras akan naik drastis dan berproses menuju pelelehan teras sebagaimana pola proses yang terjadi pada kecelakaan Fukushima.

Kajian terhadap PLTN generasi 3 terkait dengan pengalaman kecelakaan Fukushima belum memiliki banyak publikasi. Secara prinsip, reaktor generasi apapun yang menggunakan pendingin air, perlu mempertimbangkan pengalaman kecelakaan Fukushima sebagai bahan untuk mengkaji ulang desain PLTN tersebut.

Sedangkan reaktor berpendingin gas memiliki karakteristik yang berbeda dengan reaktor berpendingin air. Beberapa karakteristik reaktor berpendingin gas yang mampu memitigasi kecelakaan Fukushima adalah fluks panas teras reaktor yang sangat kecil, koefisien konduktivitas yang stabil, tidak terjadi perubahan fase selama kecelakaan, dan peralatan sistem pendingin gas lebih sederhana. Pada saat SBO, panas peluruhan didinginkan secara mandiri. Perpindahan panas peluruhan dari dalam bahan bakar dilakukan melalui konduksi, radiasi termal, dan konveksi bebas dan dijumlahkan total sebesar  $\lambda_{\text{eff}}^{[16]}$ . Keselamatan melekat yang dimiliki teras berpendingin gas memungkinkan pada kondisi semakin tinggi suhu bahan bakar, koefisien perpindahan panas akan semakin besar secara eksponensial. Kemudian panas peluruhan tersebut dikeluarkan secara konveksi alam ke *heat exchanger*, kondenser, dan dinding struktur konkrit. Berdasarkan hasil eksperimen reaktor berpendingin gas di Jerman, Amerika Serikat, dan Jepang, reaktor gas memiliki keselamatan melekat yang pasif cukup untuk mendinginkan teras daya tinggi sehingga tidak ada resiko pelelehan teras<sup>[16]</sup>. Sebagai konsekuensi, pemanfaatan pengungku bejana reaktor juga tidak diperlukan.

#### 4.4 Mitigasi SBO PLTN Swedia dan Jerman

Kedua negara, Swedia dan Jerman memberlakukan keselamatan lebih tinggi terhadap PLTN BWR dan PWR berdasarkan kajian dan analisis kejadian SBO. Kejadian ini dapat menyebabkan pelelehan teras dalam waktu 1,7 jam untuk PLTN jenis BWR yang sama dengan Fukushima Daichi nomor 1, dan dalam waktu 2,5-3,2 jam untuk PLTN jenis BWR yang sama dengan Fukushima Daichi reaktor nomor 2 dan 3<sup>[14]</sup>. Sehingga pada waktu itu, regulator Swedia menerapkan mitigasi penting untuk menghadapi kemungkinan SBO dengan cara penambahan *dedicated generator*<sup>[17]</sup>.



**Gambar 5. Perbandingan skema waktu proses pelelehan teras akibat SBO tanpa sistem pendingin darurat**

Dalam kasus PWR, pelelehan teras PLTN generasi I dan II dapat terjadi dalam waktu 1 jam dan berlanjut dengan pelelehan bejana tekan dalam waktu kurang dari 2 jam<sup>[18,19]</sup>. Gambar 5 memperlihatkan perbandingan skema waktu proses pelelehan teras akibat SBO tanpa sistem



pendingin darurat. Sementara itu, PLTN PWR di Amerika Serikat dihitung oleh *Industry Degrade Core Rule* (IDCOR) *making programme* untuk kondisi SBO dan pelelehan teras dimulai dalam 3,1 jam<sup>[20]</sup>.

Perhitungan pada Gambar 5 merupakan perhitungan termohidrolik dengan membagi teras menjadi 3 zona, yaitu zona 1/3 teras bagian atas (elevasi tinggi), zona 1/3 teras bagian tengah (elevasi menengah), dan zona 1/3 teras bagian bawah (elevasi bawah). Grafik gambar 5 memperlihatkan kondisi zona elevasi tinggi seperti yang telah dibahas pada gambar 4 dalam bab 4.2.

Dari gambar 5 ini, setelah sistem pendingin darurat gagal berfungsi, skema waktu pelelehan teras PWR di Jerman<sup>[18]</sup> terlihat lebih cepat dari pada waktu pelelehan teras BWR di Swedia<sup>[17]</sup>. Hal ini terjadi mungkin karena ciri proses dasar termohidrolika teras PWR yang beroperasi pada tekanan tinggi 15,5 MPa. Penurunan tekanan secara drastis secara mendadak akan membuat titik saturasi tercapai dalam waktu cepat, sehingga gelembung uap air terbentuk dengan cepat dalam jumlah banyak. Sementara tekanan primer terus menurun, gerakan uap air menuju *steam generator* terhalang oleh fasa cair dalam geometri loop-seal setelah uap melewati *steam generator*. Pada waktu yang singkat ini, *steam generator* belum berfungsi menjadi *heatsink* bagi pendinginan teras reaktor menggunakan sirkulasi alam. Sehingga kecepatan pembentukan fasa uap menjadi tidak terkendali dan ketinggian air teras akan turun dengan cepat. Penurunan ketinggian air ini yang menjadi indikator kemungkinan terjadi pelelehan teras dimulai dari bagian atas di tengah teras.

Seandainya teras meleleh, panas bahan bakar akan diserap oleh bejana tekan reaktor yang didinginkan secara kondensasi. Proses kondensasi untuk memindahkan panas ini masih belum cukup dan mengakibatkan temperatur bejana tekan bagian bawah yang menampung pelelehan teras menjadi naik sampai mencapai titik leleh material bejana tekan. Kemudian bejana tekan meleleh menuju penampungan pelelehan teras. Penampungan ini akan memindahkan panas secara kondensasi sirkulasi alam ke dalam udara dalam *containment* dan diteruskan ke lingkungan sekitar *containment*.

Faktor lain yang perlu diperhitungkan adalah peningkatan tekanan akibat kemungkinan ledakan gas Hidrogen dalam sistem primer. Ledakan Hidrogen ini tidak akan menyebabkan peningkatan panas teras dan tekanan primer PWR yang berbahaya<sup>[19]</sup>. Hal ini terjadi karena, pompa akan mati setelah PWR *shutdown* sehingga tekanan aliran pendingin utama juga menurun dengan drastis. Pada saat bersamaan, pemanasan teras juga terjadi seperti yang sudah dibahas di atas. Temperatur bahan bakar naik secara drastis memproduksi gas Hidrogen. Pada saat tekanan pendingin primer sudah rendah mencapai 1-3 MPa, resiko ledakan gas Hidrogen bisa terjadi dalam sistem primer. Peningkatan tekanan primer akibat ledakan Hidrogen adalah 0,4-1,2 MPa<sup>[8]</sup>. Dengan demikian, ledakan gas Hidrogen dalam sistem primer akan meningkatkan tekanan primer maksimum sebesar 4,2 MPa. Tekanan normal pendingin primer PWR sebesar 15,5 MPa<sup>[22,23]</sup> menyediakan margin tekanan primer yang cukup besar untuk mitigasi ledakan Hidrogen meskipun temperatur bahan bakar sangat tinggi. Sedangkan pada kasus BWR dengan tekanan operasi mencapai 6,7 MPa<sup>[23]</sup>, margin tekanan lebih kecil dari pada PWR, sehingga ledakan gas Hidrogen dalam teras BWR memiliki resiko lebih tinggi. Temperatur bahan bakar BWR lebih dari 1000°C juga mengurangi ketahanan material bahan bakar terhadap peningkatan tekanan karena ledakan Hidrogen.

#### 4.5 Verifikasi Perhitungan SBO

Kecelakaan Fukushima menuju pelelehan teras terjadi setelah daya baterai hanya bisa beroperasi selama 8 jam, sehingga tidak ada energi listrik lagi untuk menjalankan sistem pendingin teras darurat. Secara teori, peluruhan daya mengacu pada Gambar 1 adalah sekitar 0.5% dari daya penuh reaktor.

**Tabel 1. Catatan Peristiwa Kecelakaan Fukushima Daiichi pada Reaktor Nomor 1** <sup>[24,25,26]</sup>

Tgl	Waktu	Kejadian
11 Maret	14:46	Gempa Bumi, PLTN <i>Shutdown</i>
	14:49	Peringatan bahaya tsunami
	15:14	Tsunami menerjang PLTN Fukushima
	15:42	Catu daya AC mati atau SBO
	16:36	Sistem pendingin teras darurat gagal beroperasi
12 Maret	0:00	<i>Emergency condenser</i> bekerja
	9:00	Venting dan injeksi air laut ke teras
	10:49	Satu dari dua katub venting sulit dioperasikan
	11:04	Mulai terjadi penurunan level air teras
	11:04	Tinggi air teras minus 50 cm
	11:02	Tinggi air teras minus 90 cm
	12:05	Tinggi air teras minus 150 cm
	15:28	Tinggi air teras minus 170 cm
	15:29	Radioaktif Cesium terdeteksi
	15:36	Ledakan Hidrogen pada reaktor no.1

Catatan peristiwa ini ditunjukkan pada Tabel 1, bahwa pada tanggal 12 Maret 2011 jam 10:49, kondisi reaktor sudah sangat panas dan radiasi yang berbahaya mempersulit operasi satu dari dua katub venting. Setelah waktu inilah diasumsikan semua sistem pendingin darurat sudah gagal beroperasi mengakibatkan pemanasan teras berlangsung secara drastis. Penurunan ketinggian air teras sampai mencapai 150 cm pada waktu jam 12:05 memungkinkan terjadinya pelelehan teras. Bila mengacu pada Gambar 5, pelelehan teras kemungkinan besar dimulai pada waktu jam 12:49 atau 2 jam setelah pemanasan teras dimulai.

Tanggal 12 Maret 2011 waktu jam 14:29, radioaktif Cesium terdeteksi dalam gedung PLTN Fukushima Daiichi reaktor nomor 1. Hal ini merupakan indikasi kemungkinan reaktor telah meleleh dengan tingkat kepercayaan 95% <sup>[27,9]</sup>.

Verifikasi ini memperkuat analisis empiris yang telah dilakukan sebelumnya menghasilkan skema waktu pelelehan teras PLTN pada saat terjadi SBO. Dengan demikian, faktor pendinginan panas termal sisa sangat penting dan tidak boleh gagal untuk mencegah pelelehan teras. Satu dari dua faktor saling terkait adalah ketersediaan sistem pendingin darurat untuk memindahkan panas termal sisa ke *heatsink* utama berupa air laut, udara atau lingkungan sekitar PLTN. Faktor kedua adalah PLTN BWR dan PWR pada generasi I dan II menggunakan sistem keselamatan aktif sehingga ketersediaan catu daya dari generator diesel menjadi sangat penting selama kejadian SBO. Jaminan ketersediaan catu daya generator diesel ini akan menjamin ketersediaan sistem pendingin darurat. Pengalaman PLTN di Swedia dan Jerman dalam menyediakan *dedicated diesel generator* merupakan salah satu alternatif mencegah kegagalan fungsi sistem pendingin darurat. Sedangkan

penggunaan sistem pendingin pasif memerlukan perubahan desain reaktor secara masif dan biaya konstruksi ulang yang besar.

## 5. KESIMPULAN

Kajian dan analisis pelelehan teras terhadap kejadian SBO yang dilakukan sebelum kecelakaan Fukushima terjadi mendukung pendapat kemungkinan pelelehan teras pada kecelakaan Fukushima Daiichi dengan kepercayaan 95%. Perbandingan kajian skema waktu pelelehan teras PLTN tipe BWR dan PWR generasi I dan II setelah *shutdown* tanpa sistem pendingin darurat adalah 1,7-3,2 jam untuk BWR di Swedia, 1 jam untuk PWR di Jerman, dan 3,1 jam untuk PWR di Amerika Serikat. Kemudian peningkatan tekanan sistem primer PWR akibat kemungkinan ledakan gas Hidrogen tidak berbahaya karena margin tekanan primer PWR yang cukup besar. Sedangkan pada BWR, peningkatan tekanan akibat ledakan yang sama memiliki resiko kerusakan lebih tinggi karena margin tekanan yang lebih kecil. Hasil verifikasi menggunakan data kecelakaan Fukushima Daiichi PLTN nomor 1 memperkuat implementasi skema waktu pelelehan teras BWR. Kajian ini merekomendasikan perubahan desain PLTN masa depan dengan cara diversifikasi terhadap sistem pendingin darurat dan sistem generator diesel sehingga resiko kegagalan *heatsink* utama berakibat pelelehan teras bisa diperkecil, seperti yang sudah diterapkan oleh PLTN di Swedia dan Jerman, jauh sebelum kecelakaan Fukushima terjadi.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. PERSHAGEN B., "Light Water Reactor Safety", Pergamon Press plc., England (1989).
- [2]. Code of Federal Regulation, Title 10, Chap.1, Part 50: Domestic Licensing of Production and Utilization, Atomic Energy Commission (AEC), USA(1973).
- [3]. "Station Blackout", ML003740034, NRC, US (1988).
- [4]. 10 CFR 50.46, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems in Light Water Nuclear Power Reactors", Annual Report NRC, US (2000).
- [5]. Update 10 CFR 50.46a, "Acceptance Criteria for Emergency Core Cooling Systems in Light Water Nuclear Power Reactors", Annual Report ML071520080, NRC, US (2006).
- [6]. Nuclear Safety Report: Safety of Nuclear Power Plants Design, NS-R-1, (2000).
- [7]. Evaluation of Station Blackout Accident at NPP, USNRC report, NUREG-1032, NRC, USA (1985).
- [8]. "Handbook of Process Relation during Disturbance in Swedish BWR", AB Asea Atom and ES-Konsult AB (1985)
- [9]. PETRANGELI G., "Nuclear Safety", Elsevier, UK (2006).
- [10]. LILLINGTON J.N., et al. ,"Recent UK Experience", International RELAP5 Users Seminar, UK (1992) .
- [11]. "Advanced Nuclear Reactor Safety Issues and Research Needs", OECD/NEA Workshop Proceeding, France (2002)
- [12]. "Status of Advanced LWR Designs", IAEA TECDOC No.1391 (2004).
- [13]. "IAEA International Fact Finding Expert Mission of The Fukushima Dai-ichi NPP Accident Following The Great East Japan Earthquake and Tsunami", Mission Report, IAEA, Juni (2011).

- [14]. BECKER K., "RAMA Containment Group Final Report", Studsvik, Sweden (1985).
- [15]. Komunikasi melalui email antara Li-chi Cliff Po (MicrosimTech, USA), dengan Fabio Mantovani dan Gianni Fiorentini (Physics Dept. University of Ferrara, Italy), 9 April 2011.
- [16]. KUGELER K., et al., "Overview of High Temperature Reactor Engineering And Research" Seond Information Exchange Meeting of Basic Studies in The Field of High Temperature Engineering, pp.77-88, OECD-NEA, France (2002)
- [17]. "Analysis of Severe Accident and Evaluation of Mitigative Measures in Ringhals and Forsmark", MITRA Final Report, Swedish State Power Board, Swedia (1985).
- [18]. HASSMANN K. and HOSEMANN J.P., "Consequence of Degraded Core Accident", Nucl.Eng.Des., Vol.80, No.2 (1984).
- [19]. BRAUN W.K.E., et al., "The Reactor Containment of Standard-Design German Pressured Water Reactors", Nuclear Technology, Vol.72, Germany (1986).
- [20]. "Nuclear Power Plant Response to Severe Accidents" IDCOR Technical Summary Report, Technology for Energy Corporation (TEC), USA (1984).
- [21]. RASMUSSEN, "Thermal Analysis", The Rasmussen Report, WASH-1400, v.VIII, App.A, MIT, USA (1978).
- [22]. CACUCI G..D., "Handbook of Nuclear Engineering", Springer, Germany (2010)
- [23]. KENNETH D.K., "Nuclear Engineering Handbook", CRC Press, USA (2009)
- [24]. "Report of Japanese Government to the IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - The Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations", Government of Japan, June 2011.
- [25]. "Analysis of Operating Records and Accident Records Fukushima Daiichi NPS at Time of the Tohoku-Pacific Ocean Earthquake and an Evaluation of its Effects", Tokyo Electric Power Company, 23 May 2011. (In Japanese).
- [26]. "Status of Fukushima Daiichi and Fukushima Daini Nuclear Power Stations after Great East Japan Earthquake", TEPCO, Japan, Homepage: <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/index-e.html>, diakses pada tanggal 27 Juli 2011.
- [27]. PATRENGALI G. and ZAFFIRO C., "Regulatory Implication of Source Term Studies", IAEA International Symposium, Columbus, Ohio-USA (1985).

### **DISKUSI/ TANYA JAWAB:**

#### **1. PERTANYAAN: (Sukmanto Diby, PTRKN-BATAN)**

- Resiko pelelehan ada beberapa macam, untuk konteks dari fisika terjadinya ledakan hidrogen terjadi dari mana?.
- Terdapat panas hidrogen karena reaksi kimia, bagaimana itu terjadi?.

#### **JAWABAN: (M. Subekti, PTRKN-BATAN)**

- *Ledakan gas hidrogen dalam konteks fisika teras reaktor bisa terjadi di dalam teras reaktor setelah nilai penambahan volume hidrogen melewati batas kritis. Sedangkan ledakan hidrogen di luar bejana tekan tidak dibahas dalam kegiatan penelitian ini.*
- *Gas hidrogen diproduksi dengan cepat dan menghasilkan panas dari reaksi sesuai dengan proses:*

