

## ANALISIS KEJADIAN PEMICU BERDASARKAN DESAIN TIPE PWR GENERASI III (III<sup>+</sup>)

D. T. Sony Tjahyani

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir-BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310  
Email : sonybatan@yahoo.com

### ABSTRAK

**ANALISIS KEJADIAN PEMICU BERDASARKAN DESAIN TIPE PWR GENERASI III (III<sup>+</sup>).** Sesuai dengan peraturan presiden No.5 tahun 2006, disebutkan bahwa sampai dengan tahun 2025 sekitar 4000 MWe suplai listrik dibangkitkan dari PLTN. TSO (Technical Support Organization) diperlukan dalam pembangunan PLTN untuk mengevaluasi tingkat keselamatan berdasarkan permintaan operator atau badan regulasi. Tahap awal dalam analisis keselamatan adalah menentukan kejadian pemicu. Makalah ini membahas faktor penurunan frekuensi kejadian pemicu akibat perkembangan desain pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>). Analisis dilakukan melalui penentuan jenis kejadian pemicu berdasarkan analisis sistem PWR generasi III (III<sup>+</sup>) dibandingkan dengan jenis kejadian pemicu berdasarkan PWR acuan. AP1000, OPR1000 dan APR1400 digunakan sebagai bahan studi dalam kajian ini. Analisis dilakukan berdasarkan pedoman dari IAEA yaitu NS-G1.2 dan SRS-25. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa jenis dan frekuensi kejadian pemicu pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>) mengalami perubahan yaitu lebih kecil bila dibandingkan dengan PWR acuan. Namun demikian frekuensi tersebut tidak signifikan bila dibandingkan dengan data pengalaman operasi PLTN di Amerika.

Kata kunci: kejadian pemicu, PWR, generasi III (III<sup>+</sup>).

### ABSTRACT

**INITIATING EVENT ANALYSIS BASED ON DESIGN OF GENERATION III (III<sup>+</sup>) PWR TYPE.** In presidential regulation No. 5 year 2006 it is mentioned that electricity energy is supplied from NPP about 4000 MWe in year 2025. TSO (Technical Support Organization) is needed for NPP construction which is to evaluate the safety level based on request of operator or regulatory body. The first stage for safety analysis is to determine initiating event. This paper discusses about decreasing factor of initiating event frequency as result technology development of PWR for generation III (III<sup>+</sup>). The analysis is done by initiating events determination based on system analysis of PWR for generation III (III<sup>+</sup>) which is compared with initiating events of PWR reference. AP1000, OPR1000 and APR1400 are used as object of study for this assessment. The analysis is carried out by IAEA guide that is NS-G1.2 and SRS-25. The analysis results showed that type and frequency of PWR generation III (III<sup>+</sup>) is different that is less than if compare with PWR reference. Nevertheless, these frequencies are not significant if compare with operating experience data of US nuclear power plants.

Keywords: initiating event, PWR, generation III (III<sup>+</sup>).

### PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Presiden No. 5 Tahun 2006 disebutkan sampai dengan tahun 2025 kontribusi energi diluar minyak bumi, gas bumi dan batubara sekitar 17% terhadap kebutuhan listrik nasional [1]. Kontribusi 17% tersebut terdiri atas: biofuel 5%, geothermal 5%, energi baru dan terbarukan 5% dan batubara cair 2%. Kelompok energi baru dan terbarukan terdiri atas: biomassa, nuklir, air, surya dan angin. Sesuai dengan buku putih tentang penelitian, pengembangan dan penerapan ilmu pengetahuan dan teknologi bidang energi, pembangkitan energi nuklir tersebut diharapkan mensuplai listrik untuk distribusi jamali sekitar 4-5%. Prosentase tersebut setara dengan 4000 MWe atau 4 unit Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) kelas 1000 [2].

Dalam proses pembangunan PLTN, terdapat institusi yang berfungsi sebagai TSO (*Technical Support Organization*) yang diperlukan oleh pemilik (*owner*) PLTN, badan regulasi maupun industri nuklir yang salah satu tugasnya adalah mengevaluasi tingkat keselamatan dari tipe PLTN yang akan dibangun.

Tahap awal dalam analisis keselamatan adalah menentukan kejadian pemicu (*initiating event*) yang mengarah terhadap kerusakan teras (*core damage*). Kejadian pemicu diperlukan baik pada analisis yang dilakukan secara deterministik maupun probabilistik. Kejadian pemicu adalah kejadian yang secara terpostulasi terjadi yang apabila tidak dimitigasi akan menyebabkan terjadinya kerusakan teras dan melepaskan produk fisi ke lingkungan. Secara konsep sistem

keselamatan reaktor, kejadian pemicu dimitigasi dengan 3 tahapan yaitu memadamkan reaktor, mendinginkan dan mengungkung produk fisi. Maka dari itu, dalam perkembangan desain PLTN dilakukan peningkatan sistem untuk meningkatkan fungsi ketiga tahapan tersebut. Selain itu mengurangi jenis kejadian pemicu serta frekuensinya.

Pada saat ini yang termasuk PWR (*Pressurized Water Reactor*) generasi III (III<sup>+</sup>) dan termasuk kelas 1000 MWe terdapat beberapa tipe, antara lain: AP1000 (*Advanced Passive*) dan APR1400 (*Advanced Power Reactor*). Perbedaan tipe-tipe tersebut adalah pada daya yang dibangkitkan yang berdampak pada nilai keekonomiannya serta fitur keselamatan yang ditingkatkan. APR1400 merupakan perkembangan dari OPR1000 (*Optimized Power Reactor*). OPR1000 termasuk PWR generasi III sedangkan AP1000 dan APR1400 termasuk generasi III<sup>+</sup>.

Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan evaluasi keselamatan teras reaktor PWR generasi II dan generasi III (III<sup>+</sup>) dengan daya dan jumlah kalang/daya yang berbeda [3]. Sehingga untuk kajian lebih lanjut harus dilakukan analisis kejadian pemicu lebih detil untuk generasi III (III<sup>+</sup>) dengan parameter teknis yang relatif sama.

Tujuan dari analisis ini adalah menentukan faktor penurunan frekuensi kejadian pemicu akibat perkembangan desain pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>). Sebagai desain kajian adalah AP1000, OPR1000 maupun APR1400 karena mempunyai persamaan dan perbedaan teknis yang sangat spesifik serta mempunyai peluang dibangun di Indonesia karena termasuk klasifikasi teknologi teruji menurut regulasi di Indonesia.

### KEJADIAN PEMICU DAN PWR GENERASI III (III<sup>+</sup>)

Langkah awal dalam proses analisis keselamatan adalah menentukan jenis-jenis kejadian pemicu yang terpostulasi [4] yaitu kejadian yang teridentifikasi yang mengarah terhadap kejadian operasional terantisipasi atau kondisi kecelakaan yang meliputi kegagalan peralatan, kesalahan manusia, ulah manusia (*human induced*) atau kejadian alam. Kumpulan kejadian pemicu yang dikembangkan dalam analisis keselamatan harus secara komprehensif serta mendefinisikan semua kegagalan yang diperhitungkan dalam sistem dan komponen dari suatu desain, demikian juga dengan kesalahan manusia yang terjadi selama kondisi pengoperasian, dalam hal ini baik meliputi kejadian yang dipicu secara internal maupun eksternal.

Kejadian pemicu internal yaitu kejadian yang dipicu dari dalam plant yang harus dikembangkan

untuk mengidentifikasi kemungkinan berpengaruh terhadap fungsi keselamatan dan tergantung detil desain suatu reaktor. Kategori kejadian pemicu dapat diidentifikasi berdasarkan 6 kategori [5,6]. Kategori pertama adalah penambahan pemindahan panas, misalnya membukanya katup pembebas sekunder atau pecahnya jalur uap, dan kesalahan fungsi kendali turbin. Kategori kedua penurunan pemindahan panas, misalnya: hilangnya air umpan utama atau pecahnya jalur uap, dan turbin trip. Kategori ketiga adalah penurunan laju alir sistem pendingin reaktor, misalnya: pompa pendingin reaktor trip, *seizure* pada pompa dan patahnya poros. Kategori keempat adalah reaktivitas dan anomali distribusi daya, misalnya: penarikan batang kendali tak terkendali, dan penolakan batang kendali atau pengenceran boron. Kategori kelima adalah bertambahnya inventori pendingin reaktor, misalnya: pengoperasian kurang tepat (*inadvertent*) dari sistem injeksi pendingin darurat. Kategori keenam adalah penurunan inventori pendingin reaktor, misalnya: LOCA karena membukanya katup pembebas primer, bocornya pipa primer, dan LOCA pada antarmuka sistem.

Identifikasi kejadian pemicu internal harus mempertimbangkan berbagai kegagalan komponen untuk sistem keselamatan dan non-keselamatan yang berpengaruh terhadap fungsi sistem keselamatan. Kegagalan-kegagalan tersebut dapat dikategorikan seperti dalam 6 kategori di atas. Namun demikian untuk analisis probabilistik perlu dipertimbangkan beberapa kegagalan yang tidak termasuk kategori di atas, misalnya kegagalan sistem penunjang seperti hilangnya pendingin komponen atau air layanan, banjir internal karena kegagalan air sirkulasi, proteksi kebakaran atau *surge tank* yang elevasinya ditinggikan, kesalahan sinyal isolasi pengungkung pada hilangnya pendingin pompa sistem primer dan kekurangan tepatan aktuasi dari katup pembebas (*relief valve*). Proses identifikasi harus menekankan kemungkinan lokasi pipa pecah, termasuk yang dapat terjadi diluar sungkup. Modus kegagalan harus dipertimbangkan juga untuk semua modus operasi, misalnya transien reaktivitas selama kritikalitas teras awal, hilangnya pendingin inventori selama isi-ulang bahan bakar dengan sungkup terbuka. Hal yang tidak boleh diabaikan adalah kejadian yang dapat menimbulkan konsekuensi sebagai kesalahan manusia yang dapat berupa kesalahan atau ketidaksempurnaan dalam perawatan serta pengaturan (*setting point*) yang tidak tepat pada batas peralatan peralatan kendali atau tindakan operator yang salah. Perlu juga mendapat perhatian kejadian pemicu internal berupa kebakaran, ledakan, misil dari turbin, dan

banjir internal yang dapat berpengaruh terhadap keselamatan dan yang menyebabkan kegagalan beberapa peralatan sistem keselamatan.

Setiap kategori di atas memerlukan tingkat analisis yang sama, namun demikian ada beberapa yang mendapat perhatian lebih. Penurunan inventori pendingin reaktor misalnya LOCA, merupakan salah satu jenis kecelakaan dasar desain. Maka dianalisis yang menyebabkan *containment bypass* (misalnya pecahnya tabung pembangkit uap) tidak dikelompokkan dengan LOCA lainnya karena sungkup bekerja secara efektif. Item lainnya yang dipertimbangkan adalah ukuran dan lokasi pecah yang mengarah terhadap hilangnya sistem pendingin primer termasuk kegagalan katup, khususnya katup pembebas (*relief valve*). Dalam hal ini lokasi pecah akan mempengaruhi kriteria sukses yang diperlukan sistem keselamatan yaitu sistem yang bekerja untuk mencegah dan membatasi kerusakan teras. Berdasarkan sistem keselamatan yang diperlukan, LOCA terbagi atas 3 klasifikasi yaitu besar, medium dan kecil. Kriteria sukses kelompok LOCA harus ditunjang melalui analisis dengan mempertimbangkan kegagalan peralatan yang dapat terjadi seperti konsekuensi pecah atau lingkungan yang ekstrim akibat LOCA. LOCA antarmuka sistem dan pecahnya tabung pembangkit uap pada umumnya dikelompokkan secara terpisah karena tidak tersedia untuk resirkulasi dari *containment sump*.

Kejadian yang mengarah terhadap transien harus mendapat perhatian pada fitur khusus yang tergantung dari desain. Contoh khas kejadian tersebut antara lain: hilangnya pendingin sekunder melalui hilangnya air umpan atau hilangnya fungsi kondensor, hilangnya buangan panas utama (inputan air pendingin terjadi penyumbatan).

Seperti diuraikan sebelumnya pada analisis probabilistik, kejadian hilangnya fungsi sistem penunjang termasuk mendapat pertimbangan penting, terutama sistem yang mempunyai fungsi keselamatan setelah reaktor trip. Yang termasuk sebagai pemicu dalam kelompok ini adalah: hilangnya busbar AC atau DC, hilangnya udara instrumentasi, hilangnya pendingin komponen dan air layanan, hilangnya pendingin ruangan. Identifikasi hilangnya sistem penunjang dipertimbangkan tidak hanya sebagai penunjang terhadap komponen mekanik, tetapi juga sistem kendali dan instrumentasi termasuk sistem proteksi reaktor.

Hilangnya jaringan listrik AC eksternal adalah kejadian pemicu yang penting dan harus mendapat perhatian khusus, apabila diikuti oleh hilangnya semua jaringan listrik AC pada tapak (*on-site*), karena dari hasil studi PSA menunjukkan bahwa SBO (*station blackout*)

mempunyai kontribusi yang sangat signifikan risikonya pada sejumlah plant. Durasi SBO merupakan hal yang perlu dianalisis, karena beberapa plant mempunyai pertahanan yang lemah terhadap durasi SBO yang terlalu lama. Maka dari itu harus dianalisis frekuensi hilangnya jaringan listrik sebagai fungsi lamanya hilang.

Kejadian pemicu eksternal adalah kumpulan kejadian yang meliputi semua kejadian yang ditimbulkan dari luar plant yang dapat mengancam keselamatan nuklir, akibat secara alami dan ulah manusia (*human induced*). Kejadian eksternal tersebut dapat mengarah terhadap kejadian internal dan kegagalan beberapa peralatan sistem keselamatan yang diperlukan untuk proteksi, misalnya gempa bumi dapat mengarah terhadap kegagalan peralatan disamping hilangnya daya listrik dari luar tapak. Kejadian tersebut diperhitungkan untuk analisis keselamatan pada tapak yang berupa tubrukan pesawat, pengaruh industri dekat plant dan ledakan dari sistem transportasi.

Sebagai TSO, salah satu item yang perlu diamati sehubungan dengan kejadian pemicu adalah mengevaluasi daftar PSA berdasarkan pedoman atau ketentuan yang ada, pengalaman operasi serta pendekatan analitik yang digunakan. Evaluasi menekankan terhadap setiap fitur desain yang merupakan sumber potensi terhadap kejadian pemicu baru. Untuk tapak yang mempunyai *twin* atau *multiple* unit dimana sistem keselamatannya menggunakan prinsip saling terbagi (*sharing*), maka dianalisis kejadian pemicu yang dapat membawa efek pada kedua unit tersebut, misalnya hilangnya jaringan listrik dan kejadian eksternal. Misal dari rusaknya (*disintegration*) turbin dapat menghantam bagian unit lainnya. Dimungkinkan interkoneksi antar unit dapat mengarah pada kecelakaan yang merupakan kejadian pemicu dari unit lainnya. Kejadian pemicu yang menghasilkan rambatan kecelakaan yang sama dan kriteria sukses yang sama pada sistem mitigasi akan dikelompokkan menjadi satu.

Tipe PWR AP1000, OPR1000 dan APR1400 mempunyai persamaan yaitu termasuk reaktor berdaya besar dengan hanya terdiri dari 2 loop tetapi mempunyai 4 pompa (masing-masing 2 pompa pada *cold leg*). Perbedaannya adalah AP1000 mengandalkan sistem pasif, sedangkan OPR1000 dan APR1400 meningkatkan keandalan sistem aktif, dengan spesifikasi teknis seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.

Sistem primer desain AP1000 berdasarkan teknologi PWR teruji pada umumnya, tetapi menekankan fitur keselamatan berdasarkan gaya gerak secara alami, misalnya gas yang terkompresi, gravitasi, aliran sirkulasi alam, dan konveksi. Sistem terdiri 2 kalang perpindahan

panas dengan masing-masing kalang mempunyai satu sisi panas (*hot leg*) dan dua sisi dingin (*cold leg*), pembangkit uap dan 2 pompa yang dipasang secara langsung terhadap pembangkit uap.

Sistem keselamatan tidak menggunakan komponen aktif (misalnya pompa, kipas atau generator) sehingga tidak memerlukan sistem penunjang *safety-grade* (misalnya suplai daya AC, air pendingin komponen, air layanan, HVAC). Hal ini akan meminimalkan

pengendalian sistem keselamatan sehingga akan berdampak pada pengurangan jumlah dan tingkat kekompleksan tindakan operator. Kondisi ini juga berdampak terhadap jumlah komponen serta persyaratan perawatan dan survailans. Karena AP1000 berdasarkan teknologi PWR yang teruji, maka menggunakan komponen yang terstandarisasi sehingga mengurangi suku cadang, perawatan serta pelatihan.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis AP1000, OPR1000 dan APR1400 [7, 8]

Parameter	AP1000	OPR1000	APR1400
Daya Termal/Elektrik	3415 MWt/1117 MWe	2825 MWt/1050 MWe	4000 MWt/1450 MWe
Temperatur Sisi Panas ( <i>hot leg</i> ), °C	321,1	327,3	323,9
Tekanan Operasi, psia	2260	2250	2250
Jumlah loop	2	2	2
Jumlah pompa	4	4	4
Umur Desain, tahun	60	40	60
Akselerasi seismik	0,3 g	0,2 g	0,3 g
CDF	$2,5 \times 10^{-7}$ /reaktor-tahun	$6,8 \times 10^{-6}$ /reaktor-tahun	$2,4 \times 10^{-6}$ /reaktor-tahun
Persyaratan Keselamatan: <ul style="list-style-type: none"> <li>• CDF</li> <li>• CCF</li> <li>• Lama minimum tindakan operator</li> <li>• Lama SBO</li> <li>• Konfigurasi ECCS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>&lt; 10^{-5}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• <math>&lt; 10^{-6}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• 72 jam</li> <li>• DVI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>&lt; 10^{-4}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• <math>&lt; 10^{-5}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• 10 menit</li> <li>• 4 jam</li> <li>• 2 jalur, injeksi pada sisi dingin (<i>cold leg</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>&lt; 10^{-5}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• <math>&lt; 10^{-6}</math>/reaktor-tahun</li> <li>• 30 menit</li> <li>• 8 jam</li> <li>• 4 jalur, DVI (direct vessel injection), SIT</li> </ul>
Persyaratan Kinerja: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ketersediaan</li> <li>• Trip Tak Terencana</li> <li>• Siklus pengisian ulang bahan bakar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 93%</li> <li>• <math>&lt; 1</math>/tahun</li> <li>• 18 bulan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 87%</li> <li>• <math>&lt; 1</math>/tahun</li> <li>• 12/15 – 18 bulan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 90%</li> <li>• 0,8/tahun</li> <li>• 18 -24 bulan</li> </ul>
Lain-lain: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendinginan dinding bejana reaktor</li> <li>• Posisi RWST</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> <li>• Di dalam sungkup (<i>containment</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendinginan udara</li> <li>• Di luar sungkup (<i>containment</i>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ERVC</li> <li>• Di dalam sungkup (<i>containment</i>)</li> </ul>

Kriteria keselamatan AP1000 yang diterapkan dalam sistem keselamatan utama adalah pasif tanpa memerlukan tindakan operator selama 72 jam setelah kecelakaan, serta mempertahankan teras dan pendinginan sungkup (*containment*) tanpa menggunakan suplai daya AC. Sistem keselamatan pasif meliputi: sistem pendingin teras pasif (PXS), isolasi sungkup, sistem pendingin sungkup pasif (PCS) dan sistem layak huni darurat ruang kendali utama.

Sistem pendingin teras pasif mempunyai 2 fungsi utama yaitu memberikan *makeup* pendingin reaktor dan injeksi keselamatan dari tangki *makeup* teras (CMT, *core makeup tank*), akumulator, IRWST (*In-Containment Refueling*

*Water Storage Tank*) dan resirkulasi jangka panjang secara pasif dalam sungkup. Fungsi kedua penggunaan penukar panas pemindahan panas sisa secara pasif (PRHR HX, *Passive residual heat removal heat exchanger*) dan IRWST. Sumber injeksi keselamatan dihubungkan secara langsung pada 2 nosel di bejana reaktor.

CMT digunakan untuk injeksi keselamatan tekanan tinggi dengan hanya menggunakan gravitasi, serta perbedaan temperatur dan posisi dari sisi dingin sistem pendingin reaktor sebagai gaya gerakannya. 2 buah CMT diisi dengan air borat secara parallel pada tekanan sistem pendingin reaktor dan terletak di atas pemipaan

kalang sistem pendingin reaktor. Bila level air atau tekanan dalam *pressurizer* mencapai level terbawah dari *setting point*, maka akan mentrip dan katup isolasi *discharge CMT* terbuka secara otomatis sehingga air dari CMT akan tersirkulasi dan mengalir karena gravitasi melalui bejana reaktor.

Seperti halnya PWR pada saat ini, akumulator (pada AP1000 berjumlah 2 buah) diperlukan untuk LOCA ukuran besar yang diperlukan dengan segera untuk mengalirkan *makeup* pada saat awal untuk mengisi *plenum* bagian bawah bejana reaktor dan *downcomer* setelah RCS (*Reactor Cooling System*) mengalami *blowdown*. Akumulator ditekan sampai 700 psig dengan gas nitrogen. Perbedaan tekanan antara akumulator yang ditekan dan penurunan tekanan RCS mempunyai gaya untuk membuka katup cek yang mengisolasi akumulator dari RCS. Akumulator selanjutnya dibantu oleh CMT untuk mempertahankan air dalam teras.

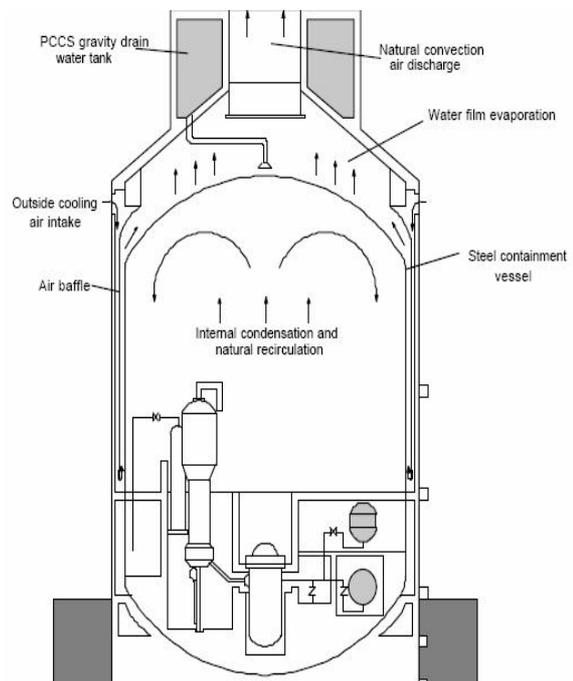
IRWST yang terletak di dalam sungkup dan di atas kalang sistem pendingin reaktor digunakan untuk *makeup* pendingin reaktor tekanan rendah yang disuplai secara gravitasi dalam jangka waktu yang lama.

Pemindah panas sisa pasif (PRHR, *Passive Residual Heat Removal*), digunakan untuk melindungi plant terhadap transien di atas pemindahan panas normal dari sistem primer melalui sistem uap dan air umpan pembangkit uap. Kriteria keselamatan RHR pasif untuk hilangnya air umpan, pecahnya jalur air umpan dan pecahnya jalur uap dengan gagal tunggal. Sistem ini meliputi penukar panas RHR yang terletak di dalam IRWST. IRWST merupakan buangan panas untuk penukar panas RHR pasif. Volume air IRWST cukup untuk menyerap panas peluruhan untuk sekitar 2 jam sebelum air mulai mendidih. Setelah itu, uap dari pendidihan IRWST terkondensasi pada dinding sungkup dan akan mengalir kembali ke dalam IRWST melalui saluran desain khusus.

Isolasi sungkup memberikan pencegahan atau membatasi lepasnya produk fisi dari hasil kecelakaan terpostulasi. Isolasi sungkup mengalami perbaikan dalam AP1000 yaitu jumlah penetrasi yang terbuka secara normal (N.O) dikurangi 50 %. Penetrasi N.O menggunakan konsep gagal-aman, sehingga bila gagal akan tertutup. Tidak ada air terkontaminasi yang tersirkulasi di luar sungkup pada saat terjadi kecelakaan dasar desain.

Sistem pendingin sungkup pasif (PCS) mendinginkan sungkup secara efektif setelah kecelakaan yaitu agar tekanan desain tidak terlampaui dan tekanan dapat turun secara cepat. Bejana sungkup baja merupakan permukaan perpindahan panas yang berfungsi untuk

memindahkan panas dalam sungkup dan melepaskannya ke atmosfer. Panas yang dipindahkan dari bejana sungkup dengan aliran sirkulasi alam dari udara yang melalui annulus gedung lapisan luar dan bejana sungkup baja. Udara luar ditarik melalui pembukaan yang dekat dengan puncak gedung dan ditarik ke bawah, di sekitar baffle dan lalu mengalir ke atas. Apabila diperlukan, pendinginan udara dapat ditunjang melalui penguapan air yang ada diluar *shell* sungkup. Air dialirkan melalui gravitasi dari tangki yang terletak di atas sungkup. 3 buah katup N.C merupakan katup gagal-buka akan membuka secara otomatis untuk memicu aliran air bila ambang tekanan sungkup tinggi tercapai. Air mengalir dari puncak yang terletak di luar permukaan kubah *shell* sungkup baja dan turun ke sisi dinding sehingga panas dipindahkan dari sungkup melalui proses penguapan seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Tangki air mempunyai kapasitas yang cukup untuk 3 hari operasi, setelah itu tangki dapat diisi kembali. Bila air tidak dapat mengisi kembali setelah 3 hari, tekanan sungkup akan naik, tetapi tekanan puncak berdasarkan perhitungan hanya mencapai 90 % tekanan desain.

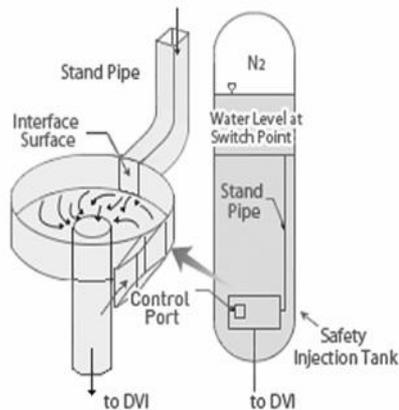


Gambar 1. Konsep Pendinginan Sungkup Pasif [7]

Seperti halnya AP1000, sistem pendingin pada OPR1000 mempunyai 2 kalang perpindahan panas dengan komponen utamanya adalah bejana reaktor, 2 buah pembangkit uap dan 4 buah pompa. Desain tipe ini spesifik untuk jenis *twinn* (2 teras) dan mempunyai ukuran pembangkit uap dan *pressurizer* termasuk kelas besar. Dengan

pembangkit uap yang termasuk klasifikasi besar akan memudahkan dan mengurangi kerja operator selama transient serta mengurangi jumlah scram karena kemampuannya dalam dalam mengakomodasi perubahan level pembangkit uap. Fitur yang dimiliki adalah RPCS (Reactor Power Cutback System) yang bertujuan mencegah reaktor trip yang disebabkan turbin trip, penurunan daya yang sangat besar atau satu dari pompa air umpan utama gagal. Pompa air umpan utama (MFWP, main feed water pump) standby yang terdiri atas 2 pompa yang digerakkan turbin dan 1 pompa digerakkan motor, sehingga akan mencegah reaktor *scram* yang disebabkan kekurangan air umpan.

Volume *pressurizer* yang besar menambah kemampuan untuk mengatasi LOCA dan transient yang berpengaruh terhadap perubahan level air di *pressurizer*. Kondisi ini akan mengendalikan dengan mudah tekanan dari sistem pendingin reaktor. *Deaerator and feed water storage tank* memperbaiki kualitas pembangkit uap melalui pemindahan secara terus menerus dari gas tak terkondensasi dan oksigen terlarut.



Gambar 2. Konsep *Fluid Device* [8]

Desain APR1400 merupakan perkembangan dari OPR1000. Fitur utama yang terdapat pada desain ini antara lain volume *pressurizer* yang besar (volume 68 m<sup>3</sup>) dengan menggunakan POSRV (*Pilot Operated Safety Relief Valve*). Menggunakan 4 jalur SIS (*Safety Injection System*) yang tidak saling tergantung, DVI (*Direct Vessel Injection*) dan *Fluid Device*.

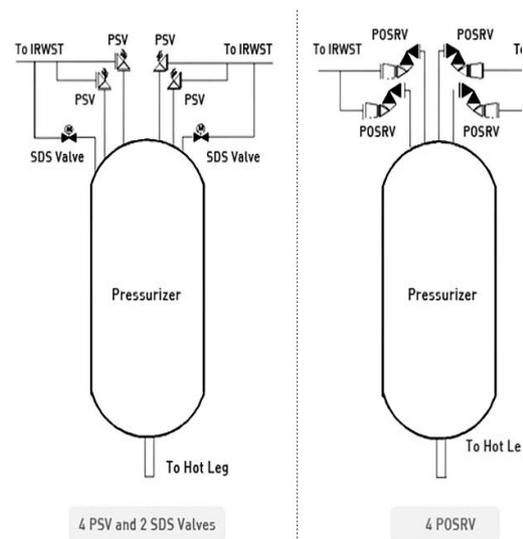
*Fluidic Device* merupakan pengatur aliran secara pasif dalam tangki injeksi keselamatan untuk mengeliminasi kemungkinan terjadi hilangnya pendingin pada saat LOCA ukuran besar, dengan konsep seperti ditunjukkan dalam Gambar 2. Fitur tersebut merupakan perbaikan dari OPR1000.

2 buah pembangkit uap berukuran besar mempunyai fungsi untuk mempercepat dan mengurangi kerja operator untuk mengendalikan

level selama transient, misalnya kenaikan dan penurunan daya, mengurangi *scram* karena kemampuannya yang besar dalam mengakomodasi perubahan level S/G pada saat kondisi transient.

Desain *pressurizer* dilengkapi dengan POSRV (*pilot operated safety relief valve*) berjumlah 4 buah yaitu menggabungkan secara serial terhadap katup keselamatan dan isolasi yang berfungsi untuk proteksi tekanan lebih dan penurunan tekanan (*depressurization*) secara cepat pada sistem pendingin reaktor, dengan konsep seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Penggantian PSV dan SDS MOV pada OPR1000.

Konsep keselamatan yang diterapkan kriteria gagal tunggal pada SBO, memperhitungkan faktor bahaya internal dan fenomena alam, pemisahan (*separation*), meminimalisasikan daerah penetrasi terhadap proteksi banjir, mengatur area kendali kebakaran untuk memudahkan pengungkungan kebakaran.



Gambar 3. Modifikasi POSRV dari SDS dan PSV[8]

Terdapat 2 hal konsep dalam sistem injeksi keselamatan, pertama memperbaiki kemampuan operasi dan mempertahankan serta redundansi sistem injeksi keselamatan dengan menambah 4 jalur mekanik secara independen, mengambil dari IRWST dan memberikan secara langsung ke *downcomer* bejana reaktor. Konsep kedua aliran teras darurat secara langsung ke dalam bejana reaktor untuk memberikan sistem yang lebih andal dan sederhana yaitu menghindari potensi kehilangan pendingin pada saat terjadinya kecelakaan pecahnya sisi dingin.

## METODE

Metodologi yang dilakukan adalah menentukan jenis kejadian pemicu berdasarkan analisis sistem untuk setiap jenis PWR generasi

III (III<sup>+</sup>) dibandingkan dengan jenis kejadian pemicu berdasarkan PWR acuan. Dokumen acuan yang digunakan sebagai analisis adalah *Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants* [5] dan *Review of Probabilistic Safety Assessment by Regulatory Bodies* [6]. Perbandingan dilakukan dengan membuat matriks untuk setiap jenis kelompok kejadian pemicu berdasarkan pemadaman dan pendinginan reaktor dari pedoman IAEA dibandingkan dengan kejadian pemicu untuk setiap jenis PWR generasi III (III<sup>+</sup>). Kejadian pemicu yang digunakan dalam PWR generasi III (III<sup>+</sup>) ditekankan pada perubahan desain yang ada. Dari kejadian pemicu PWR generasi III (III<sup>+</sup>) yang terkumpul dibandingkan dengan kejadian pemicu generasi II untuk melihat perubahan frekuensinya, selain itu juga dibandingkan dengan data generik berdasarkan pengalaman operasi PLTN di Amerika.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis didapatkan bahwa jenis kejadian pemicu untuk PWR generasi III (III<sup>+</sup>) telah mengalami perubahan atau modifikasi karena konsep keselamatan yang semakin diterapkan dalam desain apabila dibandingkan dengan kejadian pemicu berdasarkan TECDOC-719, karena dalam TECDOC tersebut mengacu pada PWR generasi II. Bahkan pada PWR generasi III<sup>+</sup> (AP1000 dan APR1400) telah menerapkan dalam desainnya untuk mengantisipasi probabilitas kegagalan sungkup dan lepasan radioaktif ke lingkungan dengan menghipotetiskan fenomena kecelakaan parah di luar bejana. Pada desain bejana tekan AP1000 di bagian bawah tidak ada penetrasi, sehingga mengeliminasi kemungkinan kejadian pemicu LOCA akibat bocoran pada bejana reaktor. Hal ini memperkecil peluang teras tak tergenangi (*core uncover*). Terjadinya kejadian pemicu LOCA ukuran kecil juga menurun disebabkan pompa langsung terhubung dengan pembangkit uap, karena mengurangi pemipaan sistem primer antara pompa dan pembangkit uap.

Desain sumber injeksi keselamatan dihubungkan secara langsung pada 2 nosel di bejana reaktor, hal ini akan mengurangi kemungkinan tumpahan dari aliran injeksi pada saat LOCA ukuran besar. Maka desain bejana AP1000 mengurangi frekuensi kejadian pemicu serta memberikan tambahan tindakan mitigasi yang semakin andal apabila kejadian pemicu terjadi.

Sistem keselamatan AP1000 berdasarkan sistem pasif maka pada saat hilang total suplai daya AC baik *on-site* maupun *off-site*, kejadian pemicu yang disebabkan oleh kesalahan operator dapat diabaikan karena reaktor akan padam

dengan aman dan terjadi proses pendinginan sendirinya.

Pada desain OPR1000 adanya fasilitas *deaerator and feed water storage tank* akan memperbaiki kualitas pembangkit uap yaitu memindahkan gas tak terkondensasi serta oksigen terlarut. Dengan demikian akan mengurangi kejadian pemicu kegagalan pompa umpan pada pembangkit uap karena disebabkan transien sistem kondensat, sehingga akan meningkatkan suplai air umpan yang stabil pada pembangkit uap.

Pada tipe PWR generasi III (III<sup>+</sup>) selain meningkatkan keselamatan, juga meningkatkan secara keekonomian. Dalam OPR1000 hal ini diterapkan dalam tipe *twin* yaitu terdapat bangunan yang digunakan bersama untuk 2 buah reaktor. Hal ini memungkinkan terjadinya kejadian pemicu yang merambat yaitu kejadian pemicu dari satu unit akan berpengaruh terhadap unit yang lain, misalnya karena bahaya internal misil atau kejadian pemicu eksternal karena kondisi lingkungan atau alam yang ekstrim.

Dalam APR1400 mempunyai ukuran pembangkit uap yang cukup besar sehingga mampu mengakomodasi kenaikan daya serta mengurangi temperatur sistem pendingin reaktor. Kondisi ini akan mengeliminasi jenis kejadian pemicu hilangnya air umpan total (TLOFW, *total loss of feedwater*) terhadap pembangkit uap atau kondisi ini akan memperpanjang waktu *dry-out*. Namun demikian dengan ukuran pembangkit uap yang cukup besar perlu pertimbangan dari segi seismik.

Seperti halnya OPR1000, APR1400 termasuk desain untuk *twin*, namun mempunyai spesifikasi desain yang ketat untuk mengatasi perambatan kejadian pemicu, yaitu misalnya dengan konsep *separation* yang diterapkan.

Dari pengumpulan data generik [9, 10, 11, 12], selanjutnya dilakukan perhitungan ulang untuk menentukan pengaruh perubahan desain terhadap kejadian pemicu. Dalam hal ini tidak setiap kejadian pemicu dapat dibandingkan, karena dalam PWR generasi III (III<sup>+</sup>) beberapa kejadian pemicu sudah tidak muncul, beberapa kejadian pemicu yang terlihat signifikan seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Dalam hal ini OPR1000 tidak dimasukkan, karena mempunyai angka yang relatif sama dengan APR1400.

Dari tabel tersebut terlihat bahwa setiap frekuensi kejadian pemicu generasi III<sup>+</sup> relatif mempunyai penurunan walaupun hanya 1 orde, karena perubahan desain dari generasi III (III<sup>+</sup>) terletak pada sistem keselamatannya, sehingga akan terlihat secara signifikan pada perhitungan frekuensi kerusakan teras.

Selanjutnya dilakukan perbandingan terhadap frekuensi kejadian pemicu terhadap pengalaman

operasi PLTN di Amerika, seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Kejadian Pemicu AP1000 dan APR1400 Dibandingkan Dengan PWR acuan

Kejadian Pemicu	AP1000	APR1400
LOCA Kecil	$3,85 \times 10^{-1}$	$4,62 \times 10^{-1}$
Pecahnya Tabung Pembangkit Uap	$3,88 \times 10^{-1}$	$4,50 \times 10^{-1}$
Hilangnya Suplai Daya	$2,86 \times 10^{-1}$	$2,86 \times 10^{-1}$
Hilangnya Aliran Air Umpan	$8,73 \times 10^{-1}$	$7,73 \times 10^{-1}$

Tabel 3. Hasil perhitungan Kejadian Pemicu AP1000 dan APR1400 Dibandingkan Dengan Data Operasi PLTN di Amerika

Kejadian Pemicu	AP1000	APR1400
Hilangnya suplai daya <i>offsite</i>	$3,33 \times 10^0$	$1,51 \times 10^0$
LOCA kecil	$1,56 \times 10^{-1}$	$1,87 \times 10^{-1}$
Pecahnya Tabung Pembangkit Uap	$1,36 \times 10^0$	$1,57 \times 10^0$

Tabel 3 memperlihatkan bahwa pada AP1000 mempunyai frekuensi kejadian pemicu suplai daya *offsite* yang lebih besar dibandingkan dengan pengalaman operasi PLTN di Amerika. Namun demikian bila hal tersebut terjadi, tidak akan membawa pengaruh yang signifikan karena AP1000 mempunyai sistem pasif yang mampu bertahan selama 72 jam. Dengan memperhitungkan faktor kesalahan, maka sebenarnya antara PLTN yang beroperasi di Amerika, AP1000 dan APR 1400 mempunyai frekuensi kejadian pemicu yang relatif sama. Hal ini menunjukkan walaupun data operasi tersebut berasal dari PLTN generasi II, tetapi menunjukkan keandalan yang cukup tinggi. Teknologi PLTN generasi III (III<sup>+</sup>) akan terlihat keunggulannya pada frekuensi kerusakan teras serta penanganan dalam kecelakaan parah.

Hal yang sangat menyolok dari OPR1000, APR1400 dan AP1000 adalah tindakan operator pada kondisi kecelakaan yaitu AP1000 tidak mengandalkan tindakan operator, sedangkan OPR1000 dan APR1400 memerlukan tindakan operator masing-masing 10 menit dan 30 menit setelah kecelakaan.

Dari analisis ini juga terlihat bahwa pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>) terdapat kejadian pemicu yang kelihatannya sangat signifikan tetapi tetap digunakan yaitu mengenai *surge line* pada *pressurizer*. Dari kajian terlihat bahwa jalur tersebut mulai PWR generasi II sampai dengan generasi III<sup>+</sup> tetap dihubungkan pada sisi panas

dengan satu jalur. Padahal fungsi dari jalur tersebut sangat signifikan yaitu memantau dan mengendalikan tekanan dan temperatur sistem oleh *pressurizer*.

## KESIMPULAN

Dari analisis ini disimpulkan bahwa berdasarkan perkembangan desain terdapat perubahan jenis kejadian pemicu bila dibandingkan dengan PWR acuan yang merupakan PWR generasi II. Frekuensi kejadian pemicu tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan PWR acuan, namun relatif sama bila dibandingkan dengan data pengalaman operasi dari PLTN yang ada di Amerika. Beberapa kejadian pemicu pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>) tidak muncul bila dibandingkan dengan PWR acuan, sedangkan kejadian pemicu yang masih signifikan baik pada PWR generasi III (III<sup>+</sup>) maupun generasi II adalah LOCA kecil, pecahnya tabung pembangkit uap, hilangnya suplai daya dan hilangnya aliran air umpan.

## DAFTAR PUSTAKA

1. PERATURAN PRESIDEN REPUBLIK INDONESIA, Kebijakan Energi Nasional, Perpres No.5 Tahun 2006.
2. -----, Buku Putih: Penelitian, Pengembangan dan Penerapan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bidang Sumber Energi Baru dan Terbarukan untuk Mendukung Keamanan Ketersediaan Energi Tahun 2025, Kementerian Negara Riset dan Teknologi, Jakarta, 2006.
3. TJAHYANI, D. T. S., Evaluasi Keselamatan Teras Reaktor PWR Berdasarkan Kejadian Pemicu dan Aspek Desain, Prosiding Seminar Nasional ke-15 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Solo, 2009.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Defining Initiating Events for Purposes of Probabilistic Safety Assessment, IAEA-TECDOC-719, 1993.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety Assessment and Verification for Nuclear Power Plants, IAEA-NS-G1.2, 2001.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of Probabilistic Safety Assessment by Regulatory Bodies, IAEA-SRS-25, 2002.
7. -----, The Westinghouse AP1000 Advanced Nuclear Power Plant: Plant Description, Westinghouse, 2003.
8. PARK, K.C., Advanced NPP Design and Construction in Korea, Korea Hydro & Nuclear Power Company.

9. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Rated of Initiating Events at US Nuclear Power Plants: 1987-1995, NUREG-5750, 1998.
10. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Rated of Initiating Events at US Nuclear Power Plants: 1988-2005, NUREG-5750/updated, 2006.
11. WESTINGHOUSE, UK AP1000 Probabilistic Risk Assessment, WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, 2007.
12. KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER COMPANY, APR 1400 SSAR, KHNP.

### TANYA JAWAB

#### **Pertanyaan :**

1. Disebutkan bahwa untuk “twin” reaktor ada kemungkinan perambatan pemicu, yang saya ketahui sistem/komponen PLTN harus memenuhi persyaratan : *independency*, *redundancy* dsb., apakah syarat ini tidak diterapkan?  
(Endang Susilowati, PRSG-BATAN)
2. Dalam presentasi disebutkan kejadian pemicu terdiri dari atas internal dan eksternal, mengapa yang dibahas hanya kejadian internal, mohon penjelasannya?  
(Kresno Dwipojono, PT. Puspertino):

#### **Jawaban :**

1. Komponen/sistem yang dibuat “twin” adalah komponen/sistem yang termasuk klasifikasi “non-safety” (*non nuclear island*). Pada umumnya tindakan ini dilakukan karena tinjauan ekonomi (lebih menghemat biaya konstruksi/perawatan).
2. Pada umumnya kejadian eksternal dapat diminimalkan dengan pemilihan tapak yang tepat, namun demikian banyak beberapa kejadian eksternal yang sebelumnya bukan ancaman tetapi kemudian menjadi sangat signifikan, misalnya kejadian pemicu “ulah manusia” (*human induced*). Dalam desain kejadian pemicu eksternal dapat diatasi dengan prinsip “pemisahan” (*separation*) yang ketat.