

STUDI SISTEM KESELAMATAN TEKNIS REAKTOR SMART

Siti Alimah¹, Erlan Dewita¹, Sriyono²

¹Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN)-BATAN

²Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN-BATAN)

Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, 12710

Phone/ Fax: (021) 5204243 E-mail: alimahs@batan.go.id

ABSTRAK

STUDI SISTEM KESELAMATAN TEKNIS REAKTOR SMART. Indonesia merupakan negara kepulauan yang terdiri dari banyak pulau besar dan kecil. Kebutuhan energi terutama pada pulau-pulau kecil sampai saat ini belum dapat terpenuhi. Untuk memenuhi kebutuhan energi tersebut, penggunaan energi nuklir dapat menjadi salah satu solusi. Reaktor SMART merupakan salah satu reaktor nuklir berdaya kecil sekitar 90 MWe, dan 10% energinya dapat digunakan untuk produksi air bersih dengan proses desalinasi. Reaktor SMART memiliki dua macam fitur keselamatan yaitu sistem keselamatan melekat (*inherent*) dan sistem teknis pasif (*passive system*). Makalah ini membahas kajian sistem keselamatan teknis reaktor SMART. Tujuan studi adalah memperoleh pemahaman aspek keselamatan teknis reaktor SMART, sebagai masukan pengambil keputusan untuk pertimbangan pemilihan teknologi reaktor. Studi dilakukan melalui kajian pustaka. Sistem keselamatan teknis pasif yang diimplementasikan pada SMART adalah sistem *shutdown* (pemadaman), sistem pengambilan panas sisa pasif, sistem pendinginan teras darurat pasif, sistem proteksi sungkup terhadap tekanan lebih. Disamping itu, sistem proteksi reaktor terhadap tekanan lebih dan beberapa sistem yang memitigasi kecelakaan, juga ditambahkan. Fungsi sistem keselamatan teknis adalah menjaga kestabilan pendinginan reaktor agar tidak terjadi pemanasan berlebih pada sistem pembangkit serta mencegah terlepasnya produk radioaktif ke lingkungan dan melakukan pemadaman reaktor setiap saat diperlukan. Hasil studi menunjukkan bahwa penggunaan sistem keselamatan teknis pasif mampu mengurangi penggunaan pompa, katup dan perpipaan sehingga meningkatkan kemudahan konstruksi, operasi dan perawatan sistem, serta mengurangi tindakan operator. Apabila dibandingkan, reaktor SMART hanya memerlukan sekitar 180 katup, jauh lebih sedikit dibandingkan dengan reaktor PWR konvensional 1000 MW_e yang memerlukan 1100 katup.

Kata Kunci: keselamatan teknis, reaktor, SMART, PWR, sistem pasif

ABSTRACT

THE STUDY OF ENGINEERED SAFETY SYSTEM TO SMART REACTOR. Indonesia is an archipelago country which consisting of many large and small islands. Energy needs, especially on small islands has not fulfilled yet. To meet the energy needs, one solution is to use nuclear energy, namely the SMART reactor. This small reactor has 90 MWe power, and 10% of energy can be used to produce fresh water with desalination technology. SMART reactor has two kinds of safety features. There are inherent safety systems and passive systems. This paper discusses the technical review of the reactor engineered safety system of SMART. The purpose of this study is obtain a understanding for engineered safety aspect of SMART reactor, as transferred for the decision makers, to reactor technology selection consideration. Passive engineered safety systems that are implemented on SMART is a system shutdown, passive residual heat removal system, passive emergency core cooling system and containment protection system against overpressure. Besides that are also added, the reactor protection system against overpressure and some systems that mitigate the accident. Engineered safety system functions are to maintain the reactor cooling stability to prevent overheat in the power system and prevent radioactive products release into the environment and do the necessary reactor shutdown at any time. The study shows that the using of passive safety systems will reduce the pumps, valve and piping, thus increasing ease of construction, operation and maintenance, as well as reducing operator actions. In comparison, the SMART reactor requires only 180 valves, much less than the 1000 MWe PWR conventional reactors that require 1100 valves.

Keywords: engineered safety, reactor, SMART, PWR, passive system.

PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang memiliki 13.466 pulau terdiri dari pulau-pulau besar dan kecil tersebar dari Sabang sampai Merauke. Menurut definisi Kementerian Kelautan dan Perikanan, pulau kecil adalah pulau dengan luas area <2.000 km², dengan jumlah penduduk <20.000 orang.^[1] Ketersediaan listrik merupakan salah satu infrastruktur dasar bagi masyarakat dan sebagai salah satu faktor peningkatan perekonomian, sehingga rasio elektrifikasi di pulau-pulau kecil dan atau terpencil perlu mendapat perhatian agar tidak semakin tertinggal dibandingkan daerah lainnya.

Penyediaan energi listrik oleh PT. PLN di daerah terpencil sampai saat ini belum dapat terpenuhi karena ketersediaan listrik selalu lebih kecil dari kebutuhan yang terus meningkat, kurangnya pemerataan, kurangnya infrastruktur jaringan dan penggunaan listrik sebagai komoditi belum terlaksana. Selain itu, sebaran demografis penduduk Indonesia yang dominan berada di wilayah Sumatera, Jawa dan Bali, menyebabkan kebijakan PT. PLN mengenai penyediaan listrik, terkonsentrasi di wilayah tersebut.

Berbagai sumber energi alternatif diperlukan untuk memasok kebutuhan listrik di pulau kecil dan atau terpencil, yaitu dengan pemanfaatan pembangkit energi baru dan terbarukan, seperti pemanfaatan energi angin, air, panas bumi, biomassa, tenaga surya dan nuklir. Dalam Undang-undang nomor 30 tahun 2007 dinyatakan bahwa energi nuklir sebagai salah satu sumber energi nasional dalam kelompok energi baru dan terbarukan, sehingga energi nuklir juga dapat menjadi alternatif untuk memasok kebutuhan listrik, terutama untuk daerah/pulau kecil dan atau terpencil yang tidak mempunyai potensi energi panas bumi, angin, tenaga surya dan biomassa. Dengan pemanfaatan energi nuklir maka akan menambah keberagaman pemanfaatan sumber energi primer non fosil, dan juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.

SMART (*System-integrated Modular Advanced Reactor*) merupakan reaktor integral modular tipe PWR (*Pressurized Water Reactor*) dengan daya kecil yang dikembangkan untuk dua tujuan yaitu pembangkit listrik dan desalinasi air laut.

Karena merupakan reaktor ukuran kecil maka SMART dapat menjadi alternatif pasokan energi untuk pulau-pulau kecil dan atau terpencil.

Dalam pembangunan dan pengoperasian PLTN, aspek keselamatan menjadi prioritas utama. Desain konseptual keselamatan SMART terdiri dari fitur desain keselamatan melekat (*inherent*) dan sistem keselamatan teknis pasif (*passive system*). Kajian ini menjelaskan sistem keselamatan teknis pasif reaktor SMART yang bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif bagi pengambil keputusan, dari sisi aspek keselamatan, sebagai pertimbangan pemilihan teknologi reaktor.

1. Sistem Keselamatan Teknik SMART

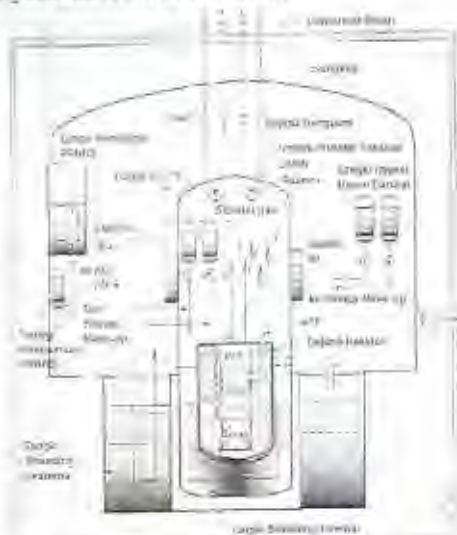
Reaktor SMART adalah reaktor maju berbasis pada PWR (*Pressurized Water Reactor*) yang dikembangkan oleh KAERI (*Korea Atomic Energy Research Institute*) sejak tahun 1997. Reaktor SMART termasuk dalam kategori PLTN SMR (*Small and Medium Reactor*). Selain dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, reaktor ini juga didesain untuk mendukung proses desalinasi. SMART didesain mampu membangkitkan energi listrik sebesar 90 MWe, dan sekitar 10% panas sisanya digunakan untuk proses desalinasi. Kapasitas produksi air bersih yang dihasilkan adalah 40.000 ton/hari^[2,3]. Reaktor SMART efektif untuk pasokan listrik wilayah terpencil yang tidak terkoneksi ke jaringan utama dan untuk kompleks industri ukuran relatif kecil.

Penyederhanaan desain SMART dengan desain sistem yang kompak dan modular telah dilakukan untuk memudahkan dalam pengoperasian dan perawatannya. Pengamanan/proteksi air hasil proses desalinasi terhadap kemungkinan kontaminasi bahan radioaktif dan minimalisasi dampak pelepasan radiasi ke lingkungan selama terjadi kecelakaan juga telah dipertimbangkan dalam desain. Peningkatan desain keselamatan dan keandalan juga dilakukan dengan mengadopsi karakteristik desain keselamatan melekat dan fitur sistem keselamatan teknis pasif yang maju.

Komponen utama reaktor SMART meliputi teras reaktor, pembangkit uap, pompa pendingin dan *pressurizer*, ditempatkan dalam

bejana tekan reaktor. Karakteristik desain seperti *pressurizer* gas dengan pengontrolan sendiri dan koefisien temperatur moderator negatif yang besar merupakan fitur keselamatan melekat dari reaktor ini. Nilai koefisien temperatur moderator negatif besar bertujuan agar teras reaktor bebas dari boron terlarut. Dengan adanya fitur keselamatan melekat tersebut, maka reaktor SMART mampu mengantisipasi kecelakaan kehilangan pendingin skala besar (*Large Break Loss Of Coolant Accident/LBLOCA*), mampu meningkatkan pendinginan sirkulasi alami, serta meningkatkan ketahanan reaktor terhadap kondisi transien dan kecelakaan. Pada saat reaktor start up dan operasi secara normal, maka pendinginan teras dilakukan secara konveksi paksa (*forced convection*), sedangkan pada kondisi kecelakaan, pendinginan reaktor menggunakan sirkulasi alam^[4].

Fitur sistem keselamatan teknis pasif reaktor SMART meliputi *shutdown* (pemadaman) reaktor, sistem pengambilan panas sisa pasif (*Passive Residual Heat Removal System/PRHRS*), sistem pendinginan teras darurat pasif (*Emergency Core Cooling System/ECCS*), sistem proteksi reaktor dan sungkup terhadap tekanan lebih (*The Reactor and Containment Overpressure Protections/ROPS and COPS*)^[2,3]. Fitur keselamatan teknis reaktor SMART ditunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Skema Fitur Keselamatan Teknis SMART^[2]

Sistem keselamatan SMART disertai pula dengan desain keselamatan penghalang berganda (*multiple barrier*) yaitu dengan

adanya kelongsong bahan bakar, bejana tekan reaktor, bejana seifguard dan sungkup. Penghalang berganda ini akan meminimalkan pelepasan radioaktif ke lingkungan apabila terjadi kecelakaan. Bejana seifguard adalah bejana yang dibuat dari baja yang kedap dari kebocoran, melindungi semua sistem primer reaktor yang meliputi komponen-komponen teras reaktor, *pressurizer*, katup dan sistem pemipaan. Fungsi utama dari bejana seifguard adalah mengungkung pelepasan radioaktif dari pendingin primer pada peristiwa kecelakaan dasar desain (*design basis accident*). Pada kecelakaan dasar desain diluar yang dipostulasikan, pelepasan uap dari pembukaan *relief valve* bejana seifguard, akan disemburkan kembali ke bagian luar tangki pelindung untuk dikondensasi. Sungkup dibuat dari struktur baja dicor dengan beton, berfungsi mengungkung pelepasan produk radioaktif pada kecelakaan dasar desain di luar postulasi.

Sistem mitigasi kecelakaan parah juga ditambahkan dalam sistem keselamatan teknis. Fungsi dari sistem ini adalah mencegah keluarnya leburan corium yang dihasilkan oleh kecelakaan parah. Pencegahan keluarnya corium ini dicapai dengan fungsi kombinasi dari desain bejana seifguard dan sungkup, dan pengoperasian sistem keselamatan. Suatu celah kecil di bawah bejana reaktor diisi dengan air dari sistem make-up pada saat terjadi kecelakaan parah.

Pendingin bejana dan air dalam tangki *shielding* internal, menyediakan pendinginan eksternal bejana tekan reaktor, mencegah keluarnya corium dari bejana tekan reaktor. Suatu alat *hydrogen igniter* disediakan dalam bejana seifguard untuk menanggulangi hidrogen dalam jumlah besar yang dihasilkan selama kecelakaan parah.

1.1. Sistem Shutdown Reaktor

Reaktor SMART memiliki 2 buah sistem *shutdown* yang saling tidak bergantung yaitu sistem *shutdown* primer dan sistem *shutdown* cadangan. *Shutdown* dapat dicapai dengan salah satu sistem tersebut. Sistem *shutdown* primer yang terdiri dari 32 *shutdown banks* batang kendali yang dibuat dari B₄C (*Boron Carbida*) sebagai material penyerap^[4,5]. *Shutdown banks* batang kendali didesain untuk dapat turun ke teras reaktor dengan gaya gravitasi sehingga mampu menghentikan reaksi berantai. Sistem *shutdown bank* tersebut

mempunyai batas shutdown yang cukup besar, yaitu reaktor dari daya penuh (100%) dapat diturunkan dayanya secara perlahan-lahan sampai kondisi *hot shutdown* (daya tinggal 7%, karena meskipun reaksi fisi sudah berhenti tetapi masih ada panas peluruhan produk fisi). Apabila terjadi kerusakan sistem *shutdown* primer, maka sistem *shutdown* cadangan disediakan, yaitu dengan sistem injeksi boron darurat^[6]. Sistem *shutdown* cadangan dilakukan dengan menginjeksikan boron yang berasal dari dua buah tangki dengan volume 6 m³, masing-masing tangki berisi boron dengan konsentrasi 30 gram asam borat per 1 kg air^[2]. Satu rangkaian aliran (*train*) sudah mampu menurunkan daya reaktor ke kondisi subkritis. Sistem cadangan tersebut merupakan sistem aktif yang bekerja dengan suatu pompa.

1.2. Sistem Pengambilan Panas Sisa Pasif (PRHRS)

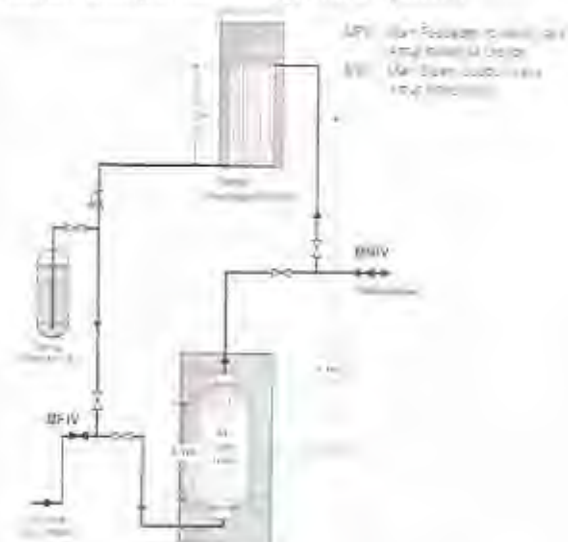
Pada kondisi darurat seperti tidak tersedianya pasokan air umpan atau *station blackout* (kejadian hilangnya semua daya listrik AC yang memasok daya ke semua peralatan keselamatan di suatu PLTN), sistem PRHRS mengambil panas peluruhan di teras reaktor dengan cara konveksi alami. PRHRS juga digunakan untuk pendinginan jangka panjang terutama pada saat *refueling* (proses pengisian ulang bahan bakar). Skema sistem PRHRS ditunjukkan oleh Gambar 2.

Dalam reaktor SMART, sistem PRHRS didesain dengan 4 *train* yang tidak saling bergantung. Pada saat terjadi kecelakaan desain terpostulasi, dengan mengoperasikan 2 *train* sudah cukup mampu mengambil panas peluruhan selama 72 jam setelah kecelakaan terjadi tanpa tindakan intervensi operator. Setiap *train* mempunyai komponen antara lain: penukar panas, tangki kompensasi, tangki pendingin darurat, katup uji dan katup isolasi. Penukar panas direndam dalam air pada tangki pendingin darurat.

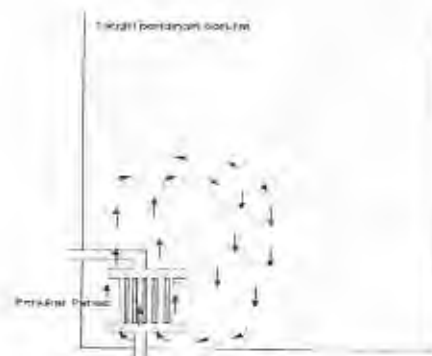
Pada kondisi operasi normal, air umpan masuk ke bagian bawah pembangkit uap, mengalir ke atas dalam tabung koil berbentuk heliks, mengambil panas dari pendingin primer dan keluar pembangkit uap sebagai uap *superheated*, kemudian keluar dan terkondensasi dalam tangki pendingin darurat, dan selanjutnya kembali lagi ke pembangkit uap, demikian seterusnya. Pada kondisi darurat, katup isolasi air umpan dan katup

isolasi uap ditutup, sedangkan katup PRHR dibuka untuk dikoneksikan ke pembangkit uap. Untai tertutup dengan kondisi konveksi alami, dan panas diambil dari sisi primer pembangkit uap menggunakan sistem PRHR.

Tangki pendingin darurat lokasinya cukup tinggi di atas pembangkit uap berguna untuk mengambil panas peluruhan di sisi primer pembangkit uap dengan konveksi alami ketika sistem sekunder kehilangan kemampuan pengambilan panas. Tangki kompensasi ditekankan dengan gas N₂ bertekanan 5 MPa (50 bar). Tangki kompensasi berfungsi sebagai *make-up* akibat kehilangan simpanan air di jalur perpipaan sistem PRHRS dan pembangkit uap, sehingga akan mengisi kekosongan air yang terjadi selama proses *cooldown* (pendinginan). Katup uji dipasang diantara tangki kompensasi dan penukar panas.



Gambar 2. Diagram sistem PRHRS reaktor SMART^[2]



Gambar 3. Skema Tangki Pendingin Darurat^[5]

1.3. Sistem Pendinginan Teras Darurat (Emergency Core Cooling System/ECCS)

Reaktor SMART didesain mampu mengantisipasi potensi adanya LBLOCA yaitu dengan mengeliminasi pipa ukuran besar ke bejana tekan reaktor. Pada kecelakaan *Small Break* LOCA, ECCS (*Emergency Core Cooling System*) berfungsi menyediakan pendinginan dengan akumulator untuk menambah air pendingin di sistem primer. Parameter desain ECCS diperlihatkan dalam Tabel 1.

Dalam reaktor SMART, terdapat 2 *train* ECCS yang tidak saling bergantung dan

operasi dari satu *train* sudah cukup mampu menyediakan pendinginan untuk menambah air pendingin di sistem primer. Masing-masing *train* memiliki tangki air silindris bertekanan gas nitrogen 10 MPa, volume 5 m³, katup serta pipa yang berdiameter 20 mm, yang dikoneksikan ke bejana tekan reaktor. Ketika SBLOCA terjadi, tekanan sistem primer berkurang sehingga di bawah tekanan tangki ECCS, pendingin dalam tangki dialirkan ke bagian atas rongga saluran *pressurizer*. Masing-masing *train* ECCS terdiri dari sistem *make-up* dan sistem injeksi boron darurat.

Tabel 1. Parameter Desain Sistem Keselamatan Pasif Reaktor SMART^[2]

Parameter	Nilai
PRHS	
-Jumlah <i>train</i>	4
-Pengambilan panas/ <i>train</i>	4,6 MW
-Volume total tangki pendingin	2,0 m ³
-Volume gas N ₂ tangki pendingin	0,3 m ³
-Tekanan tangki pendingin	5,0 MPa
-Volume air tangki pendingin darurat	50,0 m ³
ECCS	
-Jumlah <i>train</i>	2
-Tekanan gas N ₂	10,0 MPa
-Volume total/tangki	5,0 m ³
-Volume air/tangki	3,0 m ³
-Sistem koneksi	Sistem <i>make-up</i>
ROPS	
-Jumlah <i>train</i>	2
-Tekanan pembukaan POSRV	17,51 MPa
-Tekanan penutupan POSRV	13,86 MPa
COPS	
-Volume air dalam jacket air	35,0 m ³
-Temperatur air dalam jacket air	50°C
-Volume bejana seifguard	400,0 m ³
-Temperatur/tekanan desain bejana seifguard	250°C/3,0 MPa
-Volume sungkup	3000 m ³
-Temperatur dan tekanan desain sungkup	120°C/0,3 Mpa

1.4. Sistem Proteksi Tekanan Lebih Reaktor dan Sungkup (ROPS/COPS)

Proteksi terhadap tekanan lebih pada reaktor dan sungkup reaktor SMART menggunakan sistem pasif. Fungsi proteksi ini adalah untuk mengurangi tekanan bejana tekan akibat kerusakan sistem kontrol, sehingga nilai tekanan yang terjadi dibawah tekanan

kecelakaan dasar desain. Sistem ROPS terdiri dari dua *train* paralel yang dihubungkan dengan pipa ke *pressurizer*. Dua *train* tersebut juga dihubungkan ke tangki *shielding* internal dengan sistem pemipaan. Masing-masing *train* dilengkapi POSRV (*pilot operated safety relief valve*). Ketika tekanan reaktor naik sampai 17,51MPa, POSRV dibuka dan uap

dikeluarkan ke tangki *shielding* internal melalui peralatan penyembur dan kemudian dikondensasi secara konduksi melalui struktur baja dan jacket air di sekitar bejana seifguard.

Sungkup dibuat dari struktur baja dengan bangunan beton yang menutupi bejana seifguard. Fungsinya adalah untuk mengungkung pelepasan produk radioaktif dibagian dalam sungkup selama kecelakaan dasar desain di luar postulasi berkaitan dengan kehilangan integritas bejana seifguard. Pada beberapa kecelakaan yang menyebabkan kenaikan temperatur, maka akan terjadi peningkatan tekanan sungkup, sehingga pendinginan sungkup dilakukan secara pasif. Akumulasi panas dalam sungkup dipindahkan dengan mekanisme konduksi melalui struktur baja sendiri, dan melalui melalui tangki pendingin darurat (*emergency cooldown tanks/ECT*), yang diinstal di bagian dalam sungkup. Suatu *rupture disc* dan sistem penyaringan disediakan dalam sungkup untuk melindungi struktur baja dari tekanan lebih dan untuk menyaring pelepasan produk radioaktif selama kecelakaan dasar desain di luar postulasi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Reaktor SMART merupakan PLTN generasi III⁺^[7], yang menggunakan sistem keselamatan teknis pasif. Sistem keselamatan teknis pasif yang diimplementasikan pada SMART adalah sistem *shutdown* (pemadaman), sistem pengambilan panas sisa pasif, sistem pendinginan teras darurat pasif, sistem proteksi tekanan lebih sungkup, sistem proteksi reaktor terhadap tekanan lebih dan beberapa sistem yang memitigasi kecelakaan, juga ditambahkan ke dalam sistem keselamatan teknis. Sistem keselamatan tersebut didesain untuk mencegah bahaya teras sekurang-kurangnya 72 jam setelah kejadian, tanpa intervensi tindakan operator dan sumber daya eksternal. Fungsi sistem keselamatan teknis adalah menjaga kestabilan pendinginan reaktor agar tidak terjadi pemanasan lebih pada sistem pembangkit serta mencegah terlepasnya produk radioaktif ke lingkungan dan melakukan pemadaman reaktor setiap saat diperlukan. Reaktor akan dipadamkan dengan sistem *shutdown* reaktor apabila parameter yang diizinkan dalam prosedur operasi terlampaui, yaitu seperti daya reaktor yang terlalu besar, temperatur sistem pendingin terlalu tinggi

dalam jangka waktu yang lama, tekanan sistem pendingin terlalu rendah, laju alir pendingin terlalu rendah, tekanan uap terlalu rendah dan perbandingan air-umpan dengan laju rerata uap tidak sesuai.

SMART mempunyai 2 mode *shutdown* reaktor, yaitu mode operasi normal dan mode operasi abnormal. Pada mode operasi *shutdown* normal, pendingin dalam sistem primer didinginkan sampai kondisi sistem pendingin *shutdown* operasi daya dengan sirkulasi paksa (sistem aktif) karena adanya pompa pendingin utama. Tekanan desain dari sistem pendingin *shutdown* adalah 6 MPa dan temperatur 523 K. Sistem pendingin *shutdown* tersebut berfungsi mengambil panas dalam bejana reaktor dari *shutdown* panas sampai kondisi *refueling*. Sistem sekunder juga dijaga dengan sirkulasi paksa untuk mengurangi laju alir air umpan. Ketika sistem pendingin reaktor mencapai kondisi temperatur sistem pendingin *shutdown*, pendingin primer selanjutnya didinginkan dari kondisi sistem pendingin *shutdown* sampai kondisi *refueling*, menggunakan sistem pendingin *shutdown* tersebut.

Pada mode operasi *shutdown* abnormal, aliran sistem primer berubah menjadi sirkulasi alami (sistem pasif) karena pompa pendingin utama tidak tersedia. Sistem sekunder diisolasi dengan katup isolasi air umpan atau katup isolasi uap (MFIV/MSIV) dan PRHRS diaktuasi. Kemudian sistem primer didinginkan ke kondisi sistem pendingin *shutdown* dengan sirkulasi alami. Setelah sistem pendingin reaktor mencapai kondisi sistem pendingin *shutdown*, pendingin primer akan didinginkan oleh sistem pendingin *shutdown* sampai kondisi *refueling*, sama pada mode operasi *shutdown* normal.

Pada proses operasi *shutdown* abnormal, terdapat tiga jenis sirkulasi alami. Pertama, sirkulasi alami di antara teras reaktor dan sisi primer pembangkit uap dalam sistem pendingin reaktor setelah pompa pendingin utama dihentikan. Panas peluruhan yang dibangkitkan dalam teras reaktor dipindahkan ke sisi primer pembangkit uap dengan sirkulasi alami. Ke dua, sirkulasi alami dalam PRHRS. Ke tiga, sirkulasi alami di sekitar penukar panas di dalam tangki pendingin darurat. Panas yang berasal dari pembangkit uap di transfer ke air dalam tangki pendingin darurat melalui penukar panas. Air panas ditransfer dari

penukar panas yang dilokasikan dibagian bawah tangki air pendingin darurat, dan air yang relatif dingin ditempatkan pada posisi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, air disirkulasi di penukar panas dalam tangki air pendingin darurat dengan sirkulasi alam, seperti terlihat dalam Gambar 3. Air di dalam tangki pendingin darurat tersebut, disirkulasi secara otomatis ketika panas ditransfer dari penukar panas.

Terlihat dalam Gambar 2, sistem PRHRS terdiri dari penukar panas, tangki kompensasi, tangki pendingin darurat, katup uji dan katup isolasi. Pada kondisi operasi normal sistem ini diisolasi dari sistem sekunder. Namun seperti telah disebutkan, pada kondisi kecelakaan, katup isolasi uap dan katup isolasi air umpan akan tertutup otomatis berdasar sinyal trip reaktor. Katup PRHR terbuka secara otomatis, sehingga akan terjadi aliran sirkulasi alami di antara penukar panas dalam tangki pendingin darurat dan pembangkit uap, hal ini dikarenakan adanya *hydraulic head* dan perbedaan densitas di antara pembangkit uap dan penukar panas PRHRS, setelah pembukaan katup PRHR dan penutupan MFIV/MSIV. Jadi setelah trip reaktor, aliran sirkulasi alami akan terbentuk di antara teras reaktor dan pembangkit uap. Dengan sirkulasi alami tersebut, temperatur pendingin dari sistem primer tersebut akan turun sampai tingkat tertentu.

Sebagaimana telah diuraikan, sistem pendinginan teras darurat pasif berfungsi menyediakan pendingin untuk *make-up* air pendingin selama kehilangan inventori pendingin primer pada saat kecelakaan SBLOCA, yaitu dengan menggunakan akumulator yang ditekan gas N_2 . Sistem ini akan aktuasi sekitar 80 detik selama transien, ketika tekanan sistem primer turun di bawah 10 Mpa. Pengeluaran uap yang kontinyu selama SBLOCA menyebabkan penurunan inventori sistem primer dan peningkatan tekanan bejana seifguard. Dengan aktuasi sistem pendinginan teras darurat selama SBLOCA ini, maka akan menjaga level pendingin teras, temperatur pendingin primer dan juga temperatur permukaan kelongsong. Akibat adanya loop sirkulasi diantara tangki pendingin darurat dan sisi *shell* penukar panas, maka akan terjadi pendidihan lokal di puncak sisi *shell* tersebut.

Sistem keselamatan teknis SMART didesain untuk beroperasi secara pasif. Sistem

keselamatan pasif didefinisikan sebagai sistem yang terdiri dari seluruh komponen-komponen pasif, yang tidak memerlukan input eksternal untuk mengoperasikannya. Sistem keselamatan teknis ini menekankan pada gaya gerak secara alami, yaitu aliran sirkulasi alami, gravitasi dan konveksi alami. Salah satu keuntungan dari sistem sirkulasi alami adalah tidak menggunakan komponen aktif seperti pompa sehingga tidak memerlukan sistem pasokan daya AC. Hal ini akan meningkatkan kemudahan konstruksi, operasi dan perawatan sistem, serta mengurangi tindakan operator. Eliminasi pompa dan koneksi perpipaan juga akan mengeliminasi skenario kecelakaan seperti kehilangan aliran pompa dan retaknya seal pompa. Keuntungan lain dari sirkulasi alami adalah adanya perbaikan distribusi aliran dalam teras yaitu lebih uniform^[8]. Konveksi alami mengakibatkan waktu pengambilan panas peluruhan secara pasif dapat menjadi tidak terbatas.

Dengan sistem keselamatan teknis pasif pada SMART, selain menyebabkan pengurangan pompa maka juga menyebabkan pengurangan sejumlah katup dan perpipaan. Dibandingkan dengan PWR konvensional 1000 MWe yang menggunakan sekitar 1100 katup, pada reaktor SMART hanya diperlukan sekitar 180 katup^[9, 10].

KESIMPULAN

Sistem keselamatan teknis SMART terdiri dari sistem *shutdown*, sistem pengambilan panas sisa pasif, sistem pendinginan teras darurat pasif, sistem proteksi tekanan lebih reaktor dan sungkup. Sistem keselamatan tersebut didesain untuk mencegah bahaya teras sekurang-kurangnya 72 jam setelah kejadian, tanpa intervensi tindakan operator dan sumber daya eksternal. Sistem ini menekankan gaya gerak sirkulasi alami, gravitasi dan konveksi yang keuntungannya akan meningkatkan kemudahan konstruksi, operasi dan perawatan sistem, serta pengurangan tindakan operator. Penggunaan sistem keselamatan teknis ini akan menyebabkan pengurangan pompa, katup, dan perpipaan, yang mana pada reaktor SMART ini hanya diperlukan sekitar 180 katup, yang jauh lebih sedikit dibanding reaktor PWR konvensional 1000 MWe yang memerlukan 1100 katup.

DAFTAR PUSTAKA

1. Subaktian Lubis, EBT Listrik Sebagai Infrastruktur, dari www.mgi.esdm.go.id/content/ebt-listrik-sebagai-infrastruktur, (2013)
2. Antariksawan, A. R., dkk., Karakteristik Teras Reaktor Daya Kecil SMART, Prosiding Semnas TKPFN-8, Jakarta, (2002)
3. Kyoo Hwan Bae, et.all., *Safety Evaluation of The Inherent and Passive*, Annals of Nuclear Energy 28, Korea, (2001)
4. Chang, Y. J., et.all., *Thermal Hydraulic Calculation in a Passive Residual Heat Removal System of The SMART-P Plant for Forced and Natural Convection Condition*, Nuclear Engineering and Design 232, Korea, (2004)
5. Young-Jong Chung, *Description of Natural Circulation Systems in the SMART Nuclear Power Plant Design*, SMART R&D Center, KAERI, Korea, dari www.uxc.com/.../Design%20Specific/SMART/. (2013)
6. Young-Jong Chung, et.all., *Passive Cooldown Performance of a 65 MW Integral Reactor*, Nuclear Engineering and Design, SMART Development, Korea Atomic Energy Research Institute, (2008)
7. Kang, C. S., *Advanced Nuclear Reactor Programs in Korea*, 14th Pacific Basin Nuclear Conference, Hawaii, U.S.A., (2004)
8. IAEA, *Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*, Revised TECDOC INTRODUCTION, (2005)
9. IAEA, *Passive Safety Systems and Natural Circulation in Water Cooled Nuclear Power Plants*, IAEA TECDOC 1624, (2009)
10. Moon Hee Chang, et.all., *SMART Behavior Under Over-Pressurizing*, Nuclear Engineering and Design 199, Korea, (2000)