

## KAJIAN SISTEM KESELAMATAN SVBR-100

Sahala M. Lumbanraja

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) – BATAN  
Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan 12710  
Telp/Fax: (021) 5204243 Email: sahalal@batan.go.id

Masuk:

Direvisi:

Diterima:

### ABSTRAK

**KAJIAN SISTEM KESELAMATAN SVBR-100.** Kecelakaan nuklir yang terjadi di PLTN Fukushima Daiichi pada Maret 2011 menyebabkan penerimaan masyarakat terhadap PLTN sebagai sumber energi listrik semakin menurun. Untuk meminimalisir kecelakaan yang mungkin terjadi dilakukan berbagai perubahan rancang bangun dan sistem keselamatan. Kajian dilakukan dengan membandingkan sistem keselamatan aktif terhadap pasif dan melekat, jenis pendingin, dan jenis material kelongsong bahan bakar. Tujuan dari studi ini adalah untuk membandingkan sistem keselamatan dari reaktor berpendingin air dengan reaktor berpendingin logam cair. Sistem keselamatan SVBR-100 sangat tinggi karena diperoleh dari kombinasi rancang bangun reaktor berbentuk integral, bejana monoblok dan pendingin logam cair lead-bismuth eutenic (LBE). Rancang bangun integral dan monoblok meminimalisir kemungkinan kecelakaan karena semua sistem primer berada di dalam bejana reaktor. Jenis pendingin logam cair LBE lebih unggul dari jenis pendingin air karena LBE merupakan bahan inert, sedangkan air tidak. Kelongsong bahan bakar terbuat dari stainless steel tidak reaktif terhadap pendingin (LBE) dan lingkungannya.

**Kata kunci:** SVBR-100, keselamatan pasif dan melekat, LBE, inert.

### ABSTRACT

**ASSESSMENT OF SAFETY SYSTEM SVBR-100.** Nuclear accident occurred at the Fukushima Daiichi NPP in March 2011 led to public acceptance of nuclear power as a source of electrical energy decreases. To minimize accidents that may occur conducted various design changes and safety systems changes. The study was conducted by comparing active safety systems to passive & inherent safety systems, the type of coolant, and the type of cladding. The purpose of this study was to compare the safety system of water-cooled reactors with liquid metal cooled reactors. Safety systems SVBR-100 is very high because it is obtained from a combination of design reactor vessel (integral and monoblock) and liquid metal cooling LBE. Integral and monoblock design minimize the possibility of accidents because of all the primary system is in the reactor vessel. Type of liquid metal coolant lead-bismuth eutenic (LBE) is superior compared to water cooled reactor because LBE is an inert material, while water is not. The fuel cladding of SVBR does not interact with the coolant (LBE) and its environment.

**Keywords:** SVBR-100, passive and inherent safety, LBE, inert.

## 1. PENDAHULUAN

Kecelakaan PLTN Chernobyl dan Fukushima Daachi mengakibatkan penolakan masyarakat terhadap pemanfaatan energi nuklir semakin besar. Kecelakaan ini merupakan kejadian terparah dalam skala kecelakaan nuklir, yaitu level 7 dari INES (International Nuclear Events Scale <sup>[1]</sup>). Umumnya penyebab kecelakaan disebabkan oleh kesalahan manusia, kegagalan teknis, dan pengaruh eksternal. Kecelakaan terparah umumnya terjadi akibat energi panas terakumulasi pada pendingin reaktor sangat tinggi dan melebihi kemampuan material sehingga mengakibatkan kerusakan pada struktur komponen-komponen dalam teras reaktor seperti bahan bakar dan fasilitas nuklir lainnya.

Tuntutan masyarakat terhadap keselamatan dan keamanan operasi PLTN yang semakin tinggi menginspirasi para perancang PLTN untuk mengembangkan PLTN generasi terbaru (Generasi IV) dengan tingkat keselamatan dan keamanan yang lebih tinggi, lebih ekonomis, dan waktu pembangunan yang lebih pendek. Salah satu tipe PLTN generasi IV yang sedang dikembangkan adalah reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactor*, FBR). Rusia mengembangkan SVBR-100, (*Svintsovo-Vismutovyi Bystryi Reaktor, Lead Bismuth Reactor*) dan Jepang mengembangkan 4S (Super Safe Simple, Small) <sup>[2,3]</sup>.

FBR. menggunakan logam cair sebagai pendingin teras reaktor, seperti sodium (Na), lead (Pb), lead-bismuth (Li-Bi). Logam cair mempunyai sifat hampir tidak memperlambat laju neutron (moderasi), konduktivitas panas besar, dan titik didih tinggi.

Negara-negara yang pernah mengoperasikan FBR sebagai pembangkit listrik adalah Amerika Serikat (Enrico Fermi 61 MWe), Perancis (Phenix 250 MWe dan Super Phenix 1200 MWe), Jerman (KNK II 20 MWe dan SNR 300), Jepang (Monju 300 MWe), Kazakstan (BN-350), Inggris Raya (Dounreay DFR 14 MWe, Dounreay PFR 250 MWe) tetapi semua reaktor ini telah ditutup (*shutdown*)<sup>[2]</sup>. Negara yang sedang mengoperasikan FBR untuk pembangkit listrik adalah Rusia (BN-600), sedangkan negara yang sedang dalam tahap konstruksi adalah Cina (CEFR 20 MWe), India (PFBR 470 MWe) dan Rusia (BN-800).

SVBR-100 merupakan reaktor pembiak cepat yang dikembangkan oleh *Institute for Physics and Power Engineering state research center* dan JSC OKB Hidropress<sup>[4]</sup>. Sesuai dengan namanya, PLTN ini berpendingin logam cair *lead bismuth eutectic (LBE)*. PLTN ini dikembangkan dari rancang bangun teknologi pembangkit daya untuk kapal selam Rusia yang telah beroperasi selama 80 reaktor-tahun dari 15 reaktor<sup>[4]</sup>. SVBR-100 merupakan reaktor integral dan modular dari tipe PLTN generasi 4 yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan energi, desalinasi, panas dan produksi hidrogen, khususnya untuk daerah-daerah terpencil, dan kawasan industri. PLTN ini dirancang dapat beroperasi selama 60 tahun. Bahan bakar yang digunakan adalah MOx (campuran UO<sub>2</sub> dan Pu) diperkaya hingga 16,3% dengan siklus pergantian bahan bakar dilakukan 7-8 tahun<sup>[5,6]</sup>.

Aspek keselamatan operasi PLTN dipengaruhi oleh aspek rancang bangun, jenis pendingin, sistem instrumentasi, sumber daya manusia dari operator, dll. Sistem keselamatan dikembangkan sesuai dengan persyaratan keselamatan pasca kecelakaan PLTN Fukushima, yaitu prinsip pertahanan berlapis (*defences in depth*). Kombinasi bejana integral & monoblok, pendingin LBE, dan kelongsong stainless steel meningkatkan sistem keselamatan inheren dan keselamatan pasif SVBR-100. Sirkulasi dari sistem pendinginnya menggunakan sistem sirkulasi alamiah. Sifat keselamatan pasif dan *inherent self-protection* dapat direalisasikan secara maksimal sebab energi potensial yang tersimpan dalam pendingin LBE paling rendah dari jenis pendingin lainnya.

Studi dilakukan berdasarkan atas kajian dari berbagai literatur yang bertujuan untuk memahami sistem keselamatan PLTN generasi terbaru SVBR-100 yang dikembangkan di dunia dan prospeknya diimplementasikan di Indonesia.

## 2. ASPEK KESELAMATAN PLTN SVBR-100<sup>[4,5,7,8,9,10,11]</sup>

Pasca kecelakaan PLTN Fukushima, penolakan masyarakat terhadap PLTN semakin meningkat karena khawatir dan takut terhadap pelepasan zat radioaktif yang dihasilkan. Untuk meyakinkan dan meningkatkan penerimaan masyarakat terhadap pemanfaatan PLTN sebagai sumber energi yang aman dan bersih, maka sistem keselamatan operasi PLTN harus dikembangkan sesuai dengan persyaratan yang telah ditetapkan oleh badan regulasi dan IAEA. Sistem pertahanan berlapis (*defence in depth*) merupakan sistem keselamatan operasional fasilitas nuklir yang aman dan handal. Sistem pertahanan ini dapat ditingkatkan keandalannya dengan mengganti fitur-fitur keselamatan yang selama ini banyak digunakan di PLTN yang telah dan sedang dioperasikan (sistem keselamatan aktif) dengan fitur-fitur keselamatan yang lebih andal dan teruji, seperti sistem keselamatan pasif dan inheren.

Secara umum, prinsip keselamatan yang diterapkan pada PLTN didasarkan pada:

- Pilihan jenis PLTN, jenis pendingin, dan disain. Kombinasi ketiga aspek ini akan memungkinkan untuk menggunakan *inherent self-protection* dan keselamatan pasif secara maksimal.
- Peningkatan reliabilitas dan keselamatan untuk mengurangi dan menyederhanakan sistem keselamatan serta penentuan fungsi keselamatan pada sistem operasi normal.

*Inherent self protection* yang dikembangkan pada reaktor SVBR adalah kombinasi rancang bangun bejana integral, pendingin logam cair LBE dan reaktor pembiak cepat. Kombinasi ini akan meningkatkan reliabilitas sistem keselamatan reaktor, sesuai dengan persyaratan IAEA<sup>[4]</sup>. Ciri dari reaktor integral adalah semua komponen-komponen primer (main coolant pump, steam generator) berada dalam bejana reaktor. Ciri dari pendingin logam cair Li-Bi adalah titik leleh 123,5°C dan titik didih 1670°C, serta bersifat inert. Sedangkan ciri dari reaktor pembiak cepat adalah pengaruh peracunan tidak ada (*no poisoning effect*), dan nilai koefisien temperatur negatif sangat kecil. Karakteristik umum SVBR-100 ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1. Karakteristik umum PLTN SVBR<sup>[5,6]</sup>**

Karakteristik SVBR		
Tipe Reaktor		FBR
Bobot Modul		260 ton
Pendingin		Lead-Bismuth
Daya	Termal	280 MWth
	Listrik	101 MWe
Efisiensi		36%
Suhu	masuk	350°C
	keluar	500°C
Bejana Pengungkung	Tinggi	18,29 m
	Diameter	4,57 m
Modul Reaktor	Tinggi	7,86 m
	Diameter	4,5 m
Bahan Bakar	Jenis	MOx (UO <sub>2</sub> +Pu)
	Bobot 1 siklus	8100 kg U
	Pengayaan	16,3%
	<i>Refueling Interval</i>	7 - 8 tahun
Faktor Kapasitas		90%

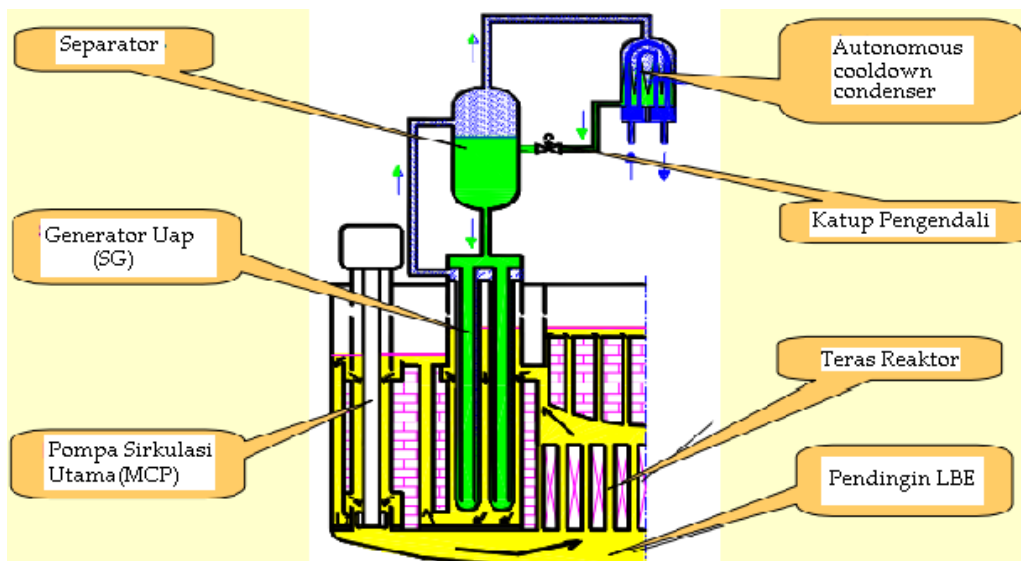
### 2.1. Jenis PLTN

Pilihan jenis PLTN akan mempengaruhi rancang bangun dan jenis bahan struktur yang digunakan. Hal ini akan berdampak pada tingkat keandalan sistem keselamatannya. SVBR-100 merupakan reaktor pembiak cepat berpendingin logam cair LBE dimana perbedaan temperatur operasi dan titik uap sangat besar. Hal ini sangat berbeda dengan PLTN berpendingin air.

### 2.2. Jenis Pendingin

Pilihan terhadap pendingin FBR sangat terbatas karena pendingin harus memenuhi kriteria sebagai berikut<sup>[3,7]</sup> :

- transfer panas sangat baik (konduktivitas tinggi)
- kerapatan daya tinggi
- pembiakan tinggi (*high breeding gain*)
- titik didih tinggi
- titik cair rendah (mendekati suhu ambient)
- tidak mempunyai pengaruh moderasi (perlambatan)
- tersedia cukup



Gambar 1. Pendinginan Otomatis dari SVBR tanpa terhubung ke Turbin<sup>[7]</sup>.

Logam cair merupakan pilihan utama untuk pendingin FBR karena lebih sesuai dengan kriteria di atas, sedangkan air dan gas kurang sesuai. Air bersifat memperlambat neutron (bersifat moderator) dan gas mempunyai kerapatan daya sangat rendah. Jenis pendingin yang banyak digunakan untuk FBR adalah logam cair, seperti sodium), lead, lead-bismuth, dan lain-lain. SVBR-100 berpendingin logam cair LBE yang beroperasi pada suhu kira-kira 500°C dan merupakan bahan inert (tidak bereaksi dengan udara luar) sehingga tidak menimbulkan ledakan/kebakaran jika bocor ke luar teras reaktor<sup>[5,7]</sup>.

### 2.3. Jenis Keselamatan Inheren dan Pasif

Sifat alamiah pendingin LBE adalah mempunyai titik didih dan evaporasi bahang latennya cukup tinggi, yaitu sebesar 1670°C, sementara temperatur operasinya hanya sampai 500°C. Sifat ini akan mengeliminasi kemungkinan kelebihan tekanan (*over-pressure*) pada

sistem primer. Tekanan operasi yang stabil dan tidak melebihi tekanan yang dipersyaratkan akan berkolerasi terhadap meningkatkan reliabilitas teras reaktor.

FBR mempunyai nilai koefisien temperatur negatif, efek reaktivitas void negatif (*negative void reactivity effect*), umpan balik negatif (*negative feedback*), dan tekanan pada sistem primer rendah. NSSS (*nuclear steam supply system*) bebas dari komponen-komponen yang dapat melepaskan hidrogen akibat reaksi termal, radiasi dan kimia dengan pendingin. Pemindahan panas peluruhan (*decay heat removal*) berlangsung secara pasif melalui sirkulasi alamiah. Kombinasi rancang bangun reaktor integral dan jenis reaktor pembiak cepat akan meningkatkan reliabilitas sistem keselamatan SVBR-100 sehingga sesuai dengan kriteria keselamatan yang dikeluarkan oleh IAEA.

#### 2.4. Jenis Disain

SVBR-100 dirancang bersifat modular dan integral. Reaktor modular akan mempersingkat waktu konstruksi dan meningkatkan kualitas konstruksi bangunan karena hampir semua komponen diproduksi di pabrik sesuai standar yang telah ditentukan. Sistem ini akan menjamin tingkat reliabilitas dan keselamatan setiap komponen lebih tinggi. Reaktor ini juga dirancang berbentuk integral dimana semua komponen utama (teras reaktor, pompa sirkulasi utama, generator uap) ditempatkan di dalam bejana reaktor. Bejana reaktor dirancang berbentuk monoblok, dan struktur pengukung reaktor ditempatkan di bawah permukaan tanah. Sedangkan kelongsong bahan bakar terbuat dari bahan stainless steel.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

SVBR-100 merupakan reaktor pembiak cepat yang mempunyai keuntungan dari segi aspek keselamatan, seperti:

- tidak memiliki efek peracunan (*no poisoning effect*) dalam reaktor
- koefisien temperatur negatifnya relatif kecil
- pengendalian batang kompensasi (*compensating rod*) menggunakan algoritma khusus
- kompensasi proses *burn-up* bahan bakar dengan *Pu build-up*

Keempat aspek ini berimplikasi pada margin reaktivitas operasi lebih kecil daripada fraksi neutron perlambatan (*delay neutron fraction*) dan tidak ada prompt neutron lepas (*prompt neutron runaway*).

Kombinasi rancang bangun reaktor berbentuk integral, bejana monoblok dan pendingin logam cair LBE dari SVBR-100 berimplikasi pada tingkat keselamatan yang sangat tinggi. Rancang bangun reaktor integral dan monoblok meminimalisir sistem pemipaan dari sistem pendingin yang bersifat radioaktif. Reaktor memiliki efek reaktivitas void negatif dan umpan balik negatif (*negative feedback*), efisiensi dari batang pengabsorpsi tidak melebihi 1\$.

Radioaktivitas total berbanding lurus terhadap energi termal dan lama operasi reaktor dan tidak tergantung pada jenis reaktor. Energi potensial pendingin sangat mempengaruhi jumlah dan kompleksitas dari sistem pendingin. Pada PLTN berpendingin air dan sodium, energi potensial sangat besar, yaitu 21,9 GJ/m<sup>3</sup> dan 10 GJ/m<sup>3</sup>, sedangkan PLTN berpendingin Li-Bi sebesar 1,09 GJ/m<sup>3</sup>. Besar energi potensial yang terakumulasi pada pendingin akan mempengaruhi kecepatan peningkatan temperatur pendingin. Jika energi potensial semakin besar, maka kecepatan peningkatan temperatur pendingin akan semakin cepat, atau sebaliknya. Pada kasus kecelakaan, khususnya kecelakaan parah, akumulasi energi pada pendingin akan meningkat secara drastis sehingga temperatur pendingin juga akan meningkat secara drastis. Peningkatan suhu hingga titik uap pendingin akan menyebabkan

penguapan pendingin dan meningkatkan tekanan pada sistem reaktor. Tekana yang sangat tinggi dapat menyebabkan kerusakan struktur sistem reaktor..

Reaksi berantai yang terjadi di teras reaktor akan menghasilkan energi panas secara terus menerus dan meningkatkan temperatur teras reaktor. Energi panas yang terjadi harus dikendalikan agar reliabilitas setiap komponen tetap terjamin dan tidak menyebabkan kecelakaan. Oleh karena itu, pilihan pendingin yang digunakan harus sesuai dengan karakteristik setiap reaktor. Setiap pendingin mempunyai karakteristik yang berbeda-beda, pendingin jenis air menyebabkan perlambatan terhadap neutron, sedangkan pendingin logam cair (sodium dan lead-bismuth) tidak bersifat memperlambat neutron. Pilihan jenis pendingin akan berpengaruh juga terhadap tingkat reliabilitas dan efisiensi pembangkit.

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada temperatur 300°C, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 bahwa energi potensial maksimum pendingin Li-Bi lebih kecil daripada pendingin air dan Na. Sedangkan enegi termal yang terakumulasi pada pendingin Li-Bi lebih besar daripada pendingin air dan Na. Akumulasi energi (potensial dan termal) yang tinggi pada pendingin akan menyebabkan laju pemanasannya akan lebih cepat. Jika terjadi kegagalan pada sistem pendingin reaktor, maka laju akumulasi energi yang tinggi akan mengakibatkan kecelakaan parah. Untuk meminimalisir dampak akumulasi energi termal pada reaktor berpendingin air, Na, dan Li-Bi, digunakan perangkat kompresi (seperti pressurizer) Pada reaktor berpendingin air, potensi interaksi energi dengan kelongsong Zr sebesar 11,4. Untuk reaktor pembiak cepat berpendingin Na, potensi interaksi kimianya dengan air dan udara sebesar 51, dan 9,6 secara berturutan. Sedangkan pada reaktor pembiak cepat berpendingin Li-Bi, potensi interaksi kimianya terhadap kelongsong hampir tidak ada. Potensi interaksi energi kimia dengan bahan tertentu yang ada di lingkungan reaktor dapat berdampak serius terhadap reliabilitas reaktor, seperti ledakan gas hidrogen. Na , dan potensi interaksi energi kimia dengan udara pada pendingin Li-Bi lebih kecil dibandingkan dengan pendingin air dan Na. Tetapi energi termal logam cair (Na dan Li-Bi) lebih besar daripada pendingin Li-Bi ketika tidak dikompresi. Untuk mengurangi energi termal pendingin lead-bismuth, dilakukan kompresi terhadap pendingin.

**Tabel 2. Karakteristik dari Beberapa Jenis Pendingin PLTN<sup>[7]</sup>**

	Jenis Pendingin		
	Air	Na	Li-Bi
Temperatur	300 °C	300 °C	300 °C
Energi potensial maksimum (GJ/m <sup>3</sup> )	~21,9	~10	~1,09
Energi Termal	Tanpa kompresi	0,6	~1,09
	Dengan kompresi	~0,15 (PWR)	Tidak ada
Potensi interaksi energi kimia dengan	Zr ~11,4	Air	~5,1
		Udara	~9,6
Potensi interaksi energi kimia dengan udara yang menghasilkan gas hidrogen	~9,6	~4,3	Tidak ada

Dari hasil penelitian dan analisis terhadap berbagai kecelakaan parah yang terjadi selama ini, disebabkan oleh kegagalan operasi sistem pendingin, seperti kecelakaan PLTN TMI, Chernobyl dan Fukushima. Hal ini akan berdampak pada peningkatan suhu bahan bakar, teras reaktor, dan evaporasi bahan pendingin. Akumulasi panas berlebih pada bahan bakar akan menyebabkan kelongsong bahan bakar berinteraksi dengan pendingin. Peningkatan temperatur melebihi titik leleh kelongsong bahan bakar akan menyebabkan interaksi bahan kelongsong dengan pendingin air.

Belajar dari kecelakaan yang terjadi pada PLTN Fukushima Daiichi pada tahun Maret 2011 yang lalu, konsep rancang bangun SVBR-100 mengacu pada sistem keselamatan yang

diterapkan IAEA, yaitu prinsip keselamatan berlapis dengan tingkat keselamatan yang tinggi. Kombinasi pilihan jenis pembangkit, jenis pendingin, kelongsong bahan bakar, sistem keselamatan, dan ukuran pembangkit menjadikan reaktor ini mempunyai tingkat keselamatan yang tinggi. Pilihan terhadap pendingin LBE disebabkan margin temperatur antara temperatur operasi dan titik didih pendingin adalah sangat besar (hampir 1000°C) sehingga tidak mungkin terjadi evaporasi pada pendingin seperti yang terjadi pada PLTN berpendingin air ketika terjadi kegagalan pada sistem pendingin. Struktur pengungkung SVBR dibangun di bawah permukaan tanah sehingga lebih terisolasi dari lingkungan, sedangkan pada PLTN Fukushima Daiichi struktur pengungkung dibangun di atas permukaan tanah. Kelongsong bahan bakar dari SVBR terbuat dari bahan stainless steel yang tidak reaktif terhadap pendingin dan lingkungan sedangkan kelongsong bahan bakar PLTN Fukushima Daiichi sebaliknya. Sistem keselamatan yang dikembangkan pada SVBR adalah sistem keselamatan pasif dan sistem keselamatan melekat (*inheren*), sedangkan pada PLTN Fukushima Daiichi menggunakan sistem keselamatan aktif yang sangat tergantung pada catu daya listrik dan operator. Jika sistem pendingin utama gagal beroperasi yang disebabkan oleh kegagalan sistem catu daya (*station black out, SBO*) maka sistem keselamatan pasif dari SVBR akan berfungsi tanpa bantuan operator selama 14 hari, sedangkan pada PLTN Fukushima Daiichi dibutuhkan peran operator. Ukuran reaktor yang lebih kecil akan berdampak pada reliabilitas pembangkit sehingga lebih tahan terhadap pengaruh gempa bumi. Perbandingan rancang bangun PLTN Fukushima Daiichi dengan SVBR-100 ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4

**Tabel 3. Perbandingan Rancangan PLTN Fukushima dan PLTN Generasi 4 (SVBR-100)<sup>[12]</sup>**

	Fukushima	Generasi 4	Pengaruh positif
Era rancangan	1950-1960 an	2000-2010 an	Pengalaman operasi
Pendingin	Air (titik didih 100 °C)	Pb-Bi	Tidak mungkin terjadi evaporasi
Struktur Pengungkung	Di atas permukaan tanah	Di dalam tanah (Silo)	Lebih terisolasi dari lingkungan
Kelongsong	Zirkonium	Stainless Steel	Tidak reaktif dengan pendingin dan lingkungan
Pelepasan Bahang Peluruhan	Aktif, butuh energi listrik	Pasif dan mampu bertahan lebih dari 14 hari	Kerentanannya lebih kecil saat kecelakaan
Ukuran	Besar	Kecil	Lebih tahan terhadap gempa bumi

Sistem keselamatan SVBR didasarkan pada sistem operasi pasif dimana sistem *fusible lock*, membran (*busting disk*) dan *PHRS* (*passive heat removal systems*) akan bekerja sesuai dengan kriteria keselamatan masing-masing. Kegagalan operasi CRDM (*control rod drive mechanism*) akan menyebabkan temperatur dalam teras meningkat drastis, dan dapat menimbulkan kecelakaan terparah. Untuk mengeliminasi kemungkinan kecelakaan, SVBR-100 mempunyai batang kendali cadangan yang beroperasi ketika terjadi pemanasan berlebih. *Fusible lock* dari batang kendali cadangan akan terbuka ketika temperatur teras reaktor mencapai 700°C. Batang kendali cadangan akan beroperasi secara pasif tanpa bantuan operator, sehingga akan terkendali secara otomatis dan terhindar dari kecelakaan yang mungkin terjadi.

**Tabel 4. Disain SVBR dari *Lesson learned* beberapa kecelakaan<sup>[9]</sup>**

	TMI	Chernobyl	Fukushima	SVBR
Evaporasi pendingin	√			x
Kemampuan memindahkan panas b.b.	√		√	x
Peningkatan suhu dalam teras	√		√	x
Interaksi casing Zr b.b. dengan air		√	√	x
Ekstraksi dan ledakan hidrogen		√	√	x

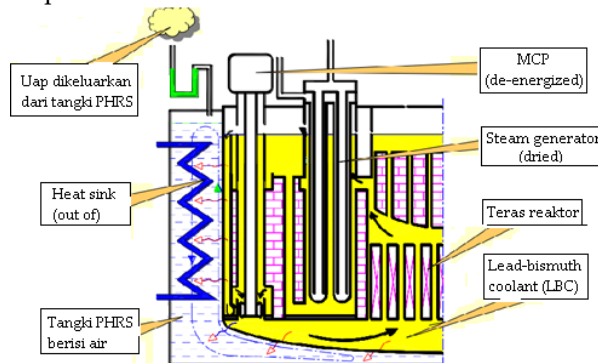
√ = mungkin      x = tidak mungkin

Sistem keselamatan SVBR didasarkan pada sistem operasi pasif dimana sistem *fusible lock*, membran (*busting disk*) dan PHRS (*passive heat removal systems*) akan bekerja sesuai dengan kriteria keselamatan masing-masing. Kegagalan operasi CRDM (*control rod drive mechanism*) akan menyebabkan temperatur dalam teras meningkat drastis, dan dapat menimbulkan kecelakaan terparah. Untuk mengeliminasi kemungkinan kecelakaan, SVBR-100 mempunyai batang kendali cadangan yang beroperasi ketika terjadi pemanasan berlebih. *Fusible lock* dari batang kendali cadangan akan terbuka ketika temperatur teras reaktor mencapai 700°C. Batang kendali cadangan akan beroperasi secara pasif tanpa bantuan operator, sehingga akan terkendali secara otomatis dan terhindar dari kecelakaan yang mungkin terjadi.

Pompa pendingin utama (*main coolant pump*, MCP) gagal beroperasi dapat disebabkan oleh kerusakan MCP, dan/atau sistem kelistrikan padam (*black-out*). Kegagalan sistem pendingin akan meningkatkan akumulasi bahang dalam teras reaktor, sehingga temperaturnya akan meningkat drastis dan terjadi pelelehan bahan bakar dan teras reaktor. Peningkatan temperatur juga akan meningkatkan tekanan dalam bejana reaktor, misalnya, kebocoran pada generator uap (SG) akan menyebabkan temperatur meningkat, dan tekanan dalam teras reaktor juga akan meningkat.

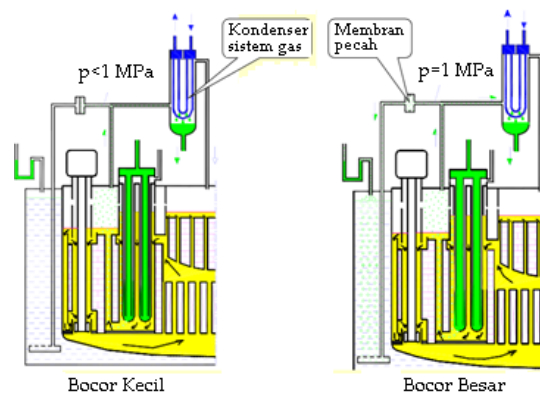
Tangki PHRS tersedia air yang mampu mendinginkan teras reaktor selama 96 jam secara terus menerus jika terjadi kegagalan pada sistem pendingin utama reaktor. Sistem PHRS dirancang untuk meminimalisir kecelakaan yang mungkin terjadi akibat kegagalan sistem pendingin utama reaktor. Proses pendinginan dari PHRS berlangsung secara alamiah tanpa bantuan operator. Pelelehan teras reaktor akibat peningkatan temperatur yang drastis, tidak akan terjadi karena bahang sisa akan ditransfer melalui teras dan bejana monoblok ke dalam air yang ada di tangki PHRS dan uapnya akan dikeluarkan ke lingkungan tanpa bercampur dengan zat radioaktif. Proses pendingin ini ditunjukkan pada Gambar 2.

Untuk menghindari kecelakaan, tekanan di dalam teras reaktor harus dipertahankan pada kondisi yang disyaratkan, yaitu tidak lebih dari 1 MPa. Peralatan pengatur tekanan yang beroperasi secara otomatis diimplementasikan di PLTN ini, yaitu membran (*busting disk*). Jika tekanan di dalam teras mencapai 1 MPa, maka membran (*busting disk*) akan pecah secara otomatis sehingga tekanan berlebih dalam teras reaktor akan berkurang secara drastis, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 2. Proses Pendinginan Teras Reaktor pada Kondisi Kecelakaan<sup>[7]</sup>.**





**Gambar 3. Proses kerja membran (*bursting disk*) ketika tekanan dalam teras meningkat akibat terjadi kebocoran pada SG<sup>[7]</sup>.**

Sifat transfer panas pendingin LBE lebih rendah dari pendingin sodium sehingga daya yang dihasilkan lebih rendah. Reaksi neutron dengan pendingin LBE akan menghasilkan Po-210 yang berasal dari reaksi bismuth dengan neutron. Po-210 dapat mempengaruhi kesehatan dan lingkungan. Logam berat bismuth juga dapat mempengaruhi kesehatan.

#### 4. KESIMPULAN

Sistem keselamatan SVBR didasarkan pada sistem keselamatan berlapis, sesuai dengan kriteria keselamatan yang dipersyaratkan oleh IAEA. Kombinasi rancang bangun reaktor berbentuk integral, bejana monoblok dan pendingin logam cair LBE mempunyai sifat inherent self-protection yang menjamin tingkat keselamatan SVBR-100.sangat tinggi. Pada kondisi kecelakaan parah, pendingin logam cair LBE tidak akan menguap (titik leleh 123,5°C, dan titik didih 1670°C, sementara temperatur operasinya hanya sebesar 500°C) dan tekanan dalam bejana reaktor tidak melebihi 1 MPa. Dan kelongsong bahan bakar tidak akan menghasilkan gas hidrogen (bahan inert) karena terbuat dari stainless steel yang tidak reaktif terhadap pendingin LBE. Tingkat sistem keselamatan SVBR-100 lebih tinggi dari sistem keselamatan PLTN generasi kedua. Logam berat bismuth dapat mempengaruhi kesehatan, dan reaksi antara bismuth dengan neutron akan menghasilkan Po-210 yang juga dapat mempengaruhi kesehatan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. LUMBANRAJA, S M., ARUM, PRS., "Studi Manajemen Kedaruratan pada Kecelakaan Reaktor Nuklir", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV, 2011, Jakarta 2011.
- [2]. SUBKI, MH., "Update on SMR Technology Status and IAEA Programme on Common Technology and Issues for SMRs, IAEA", [http://www.iaea.org/INPRO/cooperation/5th\\_GIF\\_Meeting/Subki.pdf](http://www.iaea.org/INPRO/cooperation/5th_GIF_Meeting/Subki.pdf), diunduh 18 Mei 2012.
- [3]. LUMBANRAJA, S M., WIBOWO, "Reaktor Nuklir Daya Kecil Sistem Modul 4S (Super Safe, Small, and Simple)", Jurnal Pengkajian Sains dan Teknologi Nuklir, PPdIN-BATAN, Juni, 2002.
- [4]. PETROCHENKO, VV., "The Low-power SVBR 100, Nuclear Engineering Internasional", 27 Oktober 2011, <http://www.neimagazine.com/featurethe-low-power-svbr-100>, diunduh 27 Maret 2013.

- [5]. ANTYSHEVA, T., BOROVITSKIY, S., "SVBR-100: New Generation Nuclear Power Plants for Small and Medium-sized Power Applications", [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2011/2011-07-04-07-08-WS-NPTD/2\\_RUSSIA\\_SVBR\\_AKME-eng\\_Antysheva.pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2011/2011-07-04-07-08-WS-NPTD/2_RUSSIA_SVBR_AKME-eng_Antysheva.pdf)
- [6]. LUMBANRAJA, S M., DEWITA, E., "PLTN Modular Daya Kecil SVBR-100", Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir VI, 2013, Jakarta 2013.
- [7]. TOSHINSKY, G I., et.al., "Principles of Providing Inherent Self-Protection and Passive Safety Characteristics of The SVBR-75/100 Type Modular Reactor Installation for Nuclear Power Plants of Different Capacity and Purpose", [http://www.scicet.ru/uploads/assets/file/presentation\\_05.pdf](http://www.scicet.ru/uploads/assets/file/presentation_05.pdf).
- [8]. KUZNETSOV V., BARKATULLAH, N., "Approaches to Assess Competitiveness of Small and Medium Sized Reactors", [http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500\\_CD\\_Web/htm/pdf/topic1/1S01\\_V.%20Kuznetsov\\_PM.pdf](http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic1/1S01_V.%20Kuznetsov_PM.pdf), diunduh 8 April 2012.
- [9]. STEPAN, B., "SVBR-100: New Generation Nuclear Power Plants for Small and Medium-sized Power Applications, Seminar Indonesia-Rosatom Rusia", Maret 2013 Jakarta.
- [10]. ZRODNIKOV, A V., et.al., "Multipurposed Reactor Module SVBR-75/100", Proceeding of ICONE 8. 8<sup>th</sup> International Conference on Nuclear Engineering, April 2-6, 2000, Baltimore, MD USA, ICONE-8072.
- [11]. TOSHINSKY, G I., et.al., "Principles of Inherent Self-Protection Realized in the Project of Small Size Modular Reactor SVBR-100", IAEA-CN-199/395, <http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/Meetings/2013/2013-03-04-03-07-CF-NPTD/T3.5/T3.5.toshinskii.pdf>
- [12]. \_\_\_\_\_, "Safety and Security", [www.gen4energy.com/technology/safety-security/](http://www.gen4energy.com/technology/safety-security/), diunduh 3 April 2013.