
REAKTOR *INNOVATIVE MOLTEN SALT* (IMSR) DENGAN SISTEM KESELAMATAN PASIF MENYELURUH

Andang Widi Harto
Fakultas Teknik Fisika, UGM, Yogyakarta
Email: andangftn@yahoo.com

Diterima editor 15 November 2010
Disetujui untuk publikasi 27 Januari 2011

ABSTRAK

REAKTOR *INNOVATIVE MOLTEN SALT* (IMSR) DENGAN KESELAMATAN PASIF MENYELURUH. Pengembangan Teknologi Reaktor Nuklir pada masa mendatang mengarah pada peningkatan aspek keselamatan, peningkatan pendayagunaan bahan bakar, reduksi limbah radioaktif, ketahanan terhadap proliferasi bahan-bakar nuklir dan peningkatan aspek ekonomi. reaktor *Innovative Molten Salt* (IMSR) adalah reaktor nuklir yang menggunakan bahan bakar cair berupa garam lebur *fluoride* (${}^7\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4\text{-MaF}_x$). Reaktor IMSR didesain sebagai reaktor pembiak termal, yaitu membiakkan U-233 dari Th-232. Hal ini untuk menjawab permasalahan sustainabilitas ketersediaan sumber daya bahan bakar nuklir dan reduksi limbah radioaktif. Dalam aspek keselamatan, desain reaktor IMSR memiliki sifat *inherent safe*, yaitu koefisien umpan balik daya yang negatif serta memiliki fitur-fitur keselamatan pasif. Fitur-fitur keselamatan pasif terdiri dari sistem *shutdown* pasif, sistem pendinginan pasif pasca *shutdown* serta sistem pendinginan pasif untuk produk fisi. Kecelakaan yang berpotensi terjadi pada IMSR, yaitu kecelakaan kehilangan aliran bahan bakar, kecelakaan kehilangan aliran pendingin, kecelakaan kehilangan kemampuan pengambilan kalor serta kecelakaan kerusakan integritas sistem reaktor, dapat ditangani sepenuhnya secara pasif hingga mencapai kondisi *shutdown* selamat.

Kata kunci: keselamatan pasif, *inherent safe*, IMSR

ABSTRACT

INNOVATIVE MOLTEN SALT REACTOR (IMSR) WITH FULL PASSIVE SAFETY. *The next Nuclear Reactor Technology developments are directed to the increasing of the aspects of safety, fuel utility, radioactive waste reduction, proliferation retention and economy. Innovative Molten Salt Reactor (IMSR) is a nuclear reactor design that uses fluoride molten salt (${}^7\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4\text{-MaF}_x$). IMSR is designed as a thermal breeder reactor, i.e. to produce U-233 from Th-232. This is the answer of natural nuclear fuel sustainability and radioactive waste problems. In term of safety aspect, IMSR design has inherent safe characteristics, i.e. negative power feedback coefficient, and passive safety features. The passive safety features are passive shutdown systems, passive post shutdown cooling system and passive radioactive waste cooling system. The potentially accidents in IMSR, i.e. loss of fuel flow accident, loss of coolant flow accident, loss of heat sink accident and loss of reactor system integrity, can be handled totally passively until the safe shutdown condition is achieved.*

Key words: passive safety, inherent safe, IMSR

PENDAHULUAN

Teknologi reaktor nuklir pada masa mendatang mengarah pada peningkatan aspek keselamatan, peningkatan pendayagunaan bahan bakar, reduksi limbah radioaktif, ketahanan terhadap proliferasi bahan-bakar nuklir dan peningkatan aspek ekonomi [1]. Peningkatan aspek keselamatan dilakukan dengan memaksimalkan sifat *inherent safe* (misalnya koefisien reaktivitas umpan balik daya yang bernilai negatif) serta penerapan fitur-fitur keselamatan pasif. Fitur-fitur keselamatan pasif terdiri dari sistem *shutdown* pasif dan sistem pendinginan pasif pasca pemadaman (*shutdown*).

Sistem pemadaman pasif adalah suatu mekanisme yang akan memadamkan reaktor yang dipicu oleh gangguan yang mengarah kepada kecelakaan. Sebagai contohnya adalah mekanisme yang akan memadamkan reaktor yang langsung dipicu oleh kegagalan pompa pendingin. Dewasa ini terdapat sekitar 400 unit PLTN dengan total daya terbangkit 400 GWe [2]. Akan tetapi hampir sebagian besar reaktor nuklir sekarang menggunakan isotop fisil U-235 yang sangat langka bagi bahan bakar reaksi fisinya. Dengan hal ini, maka cadangan bahan bakar nuklir alam yang telah terbukti hanya mampu untuk mensuplai PLTN 50 tahun ke depan [3].

Estimasi kebutuhan bahan bakar fertil untuk reaktor pembiak termal adalah 0,8 ton per GWey berupa material fertil, dibandingkan dengan 170 ton ekivalen uranium alam untuk reaktor LWR. Limbah yang terbentuk diestimasi sebesar 0,8 ton per GWey yang didominasi oleh produk fisi yang berumur paruh pendek [4]. Hal ini berbeda dengan limbah LWR yang mencapai 20 ton per GWey yang 95 % -nya adalah transuranium yang berumur paruh panjang.

Pada reaktor pembiak, diperlukan pemrosesan bahan bakar untuk mempertahankan komposisi bahan bakar fisil dan fertil supaya reaktor dapat mencapai kondisi kritis dan sekaligus dapat melangsungkan proses pembiakan. Untuk mencapai ketahanan proliferasi, reprocessing bahan bakar sebaiknya dilakukan di dalam gedung reaktor [5].

Dengan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil serta dampaknya (terutama pemanasan global), maka penggunaan energi nuklir merupakan alternatif yang potensial. Akan tetapi perkembangan energi nuklir dengan teknologi sekarang (LWR) akan menimbulkan problema ketersediaan bahan bakar dan akumulasi limbah nuklir. Problema ini dapat diatasi dengan pengembangan teknologi reaktor pembiak.

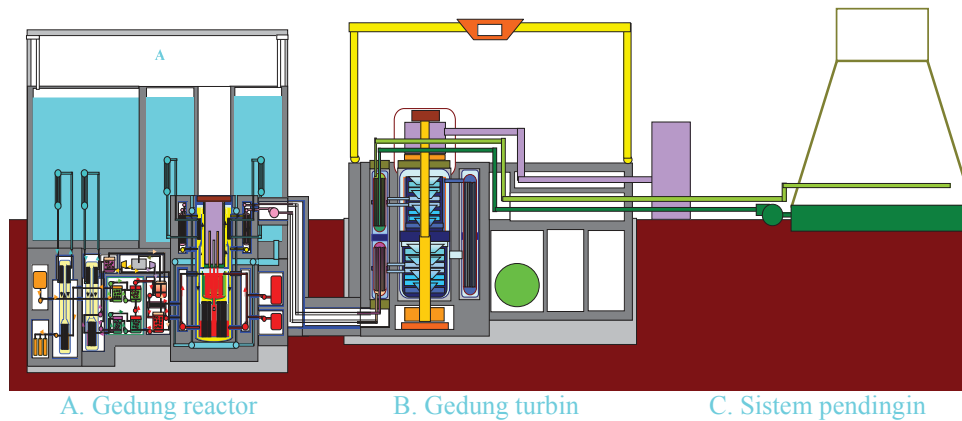
Dalam aspek keselamatan, aplikasi sistem keselamatan pasif pada teknologi reaktor nuklir masa depan merupakan hal yang menjadi sangat urgen, terutama dengan belajar pada kasus reaktor Fukushima. Hal inilah yang menjadi alasan pentingnya mengembangkan reaktor pembiak yang memiliki karakteristik keselamatan tinggi, yaitu memiliki sifat keselamatan melekat dan memiliki sistem keselamatan pasif secara menyeluruh. IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*) adalah reaktor nuklir yang diusulkan untuk dikembangkan dengan tujuan ini.

DESKRIPSI REAKTOR IMSR (INNOVATIVE MOLTEN SALT REACTOR)

Deskripsi Umum

Reaktor IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*) adalah reaktor pembiak termal tipe Molten Salt. Reaktor IMSR didesain untuk membiakkan U-233 dari Th-232. Reaktor IMSR dirancang dengan nilai CR sekitar 1,05 – 1,10 sehingga U-233 yang terbentuk lebih diutamakan untuk keperluan reaktor itu sendiri (tidak dimaksudkan untuk mengakumulasi U-233). IMSR juga dirancang sesuai dengan kecenderungan pengembangan teknologi reaktor

masa depan, yaitu konsep reaktor modular. Gambar 1 menunjukkan diagram skematik reaktor IMSR yang menjadi acuan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Diagram skematik IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*)

Gedung reaktor (*Reactor Building*) IMSR, seperti ditunjukkan dalam Gambar 2, berfungsi untuk menempatkan sistem reaktor (*Reactor System*), sistem pemrosesan bahan bakar *on line* (*on line fuel reprocessing system*), sistem penambahan bahan bakar sistem pendinginan pasif untuk sistem reaktor pasca pemadaman dan sistem pendinginan pasif untuk sistem pemrosesan bahan bakar .

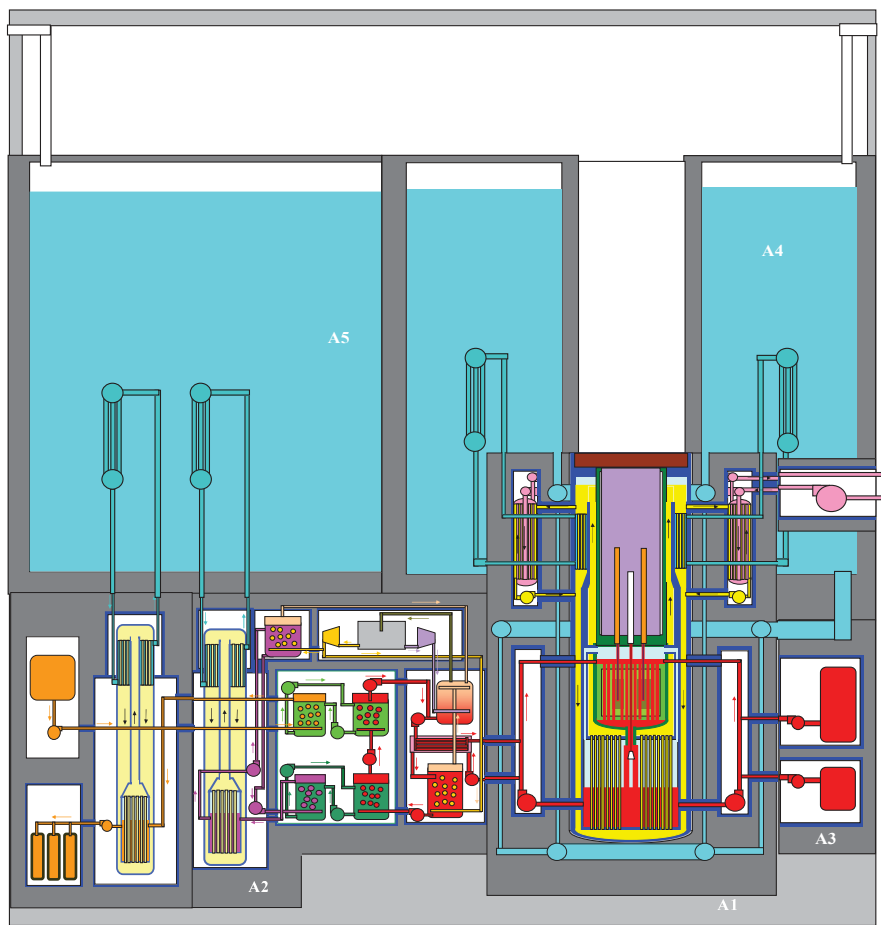
Sistem Reaktor

Sistem Reaktor IMSR terdiri dari Reaktor (teras dan blanket), sistem pendinginan dalam kondisi operasi normal, sistem pendinginan *pasca shutdown* serta sistem kendali. Semua ini didesain sebagai kesatuan sistem secara integral. Diagram skematik sistem reaktor IMSR dapat dilihat pada Gambar 3.

Filosofi desain dari sistem reaktor IMSR adalah sebagai berikut :

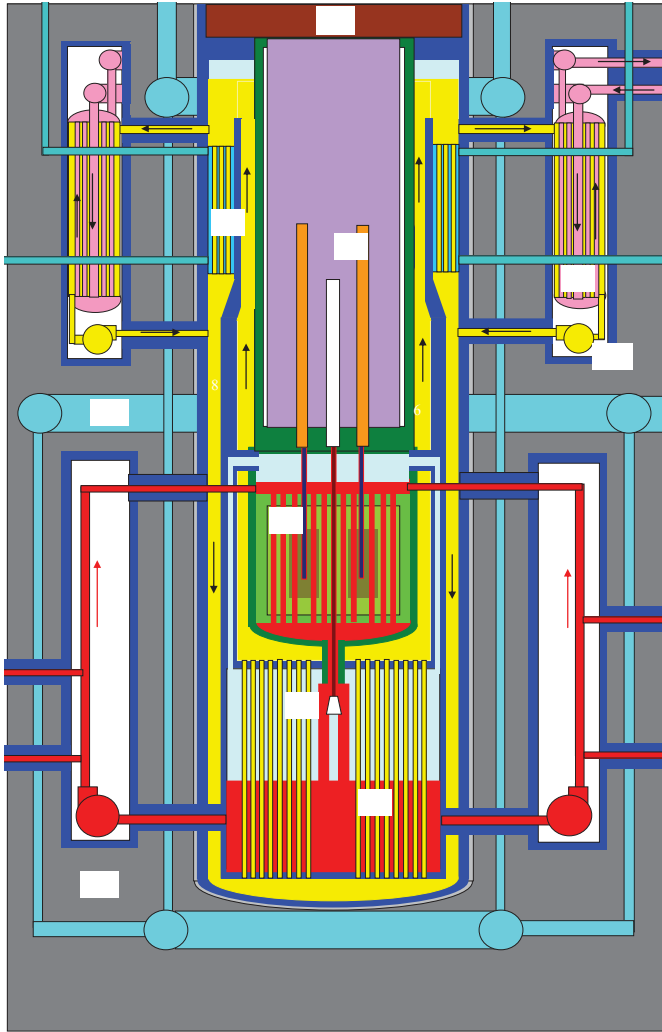
1. Mengungkung bahan bakar (meminimalkan peluang tumpahnya bahan bakar)
2. Memungkinkan bahan bakar selalu mendapatkan pendinginan
3. Mengusahakan bahwa bahan bakar hanya mencapai kondisi kritis hanya pada saat reaktor dioperasikan.

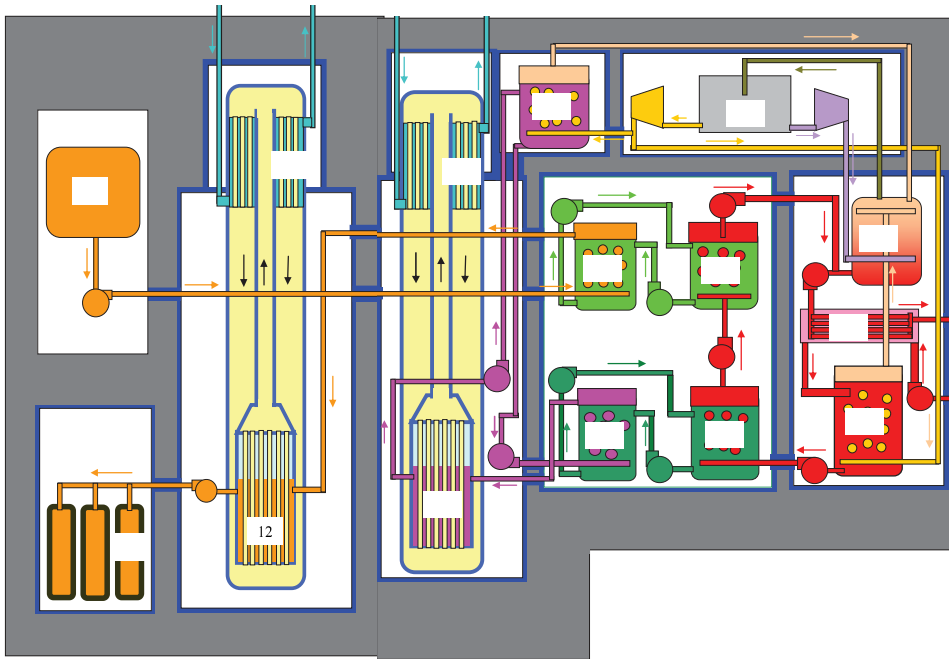
Sistem reaktor IMSR berupa bejana terbuat dari *hasteloy* dengan di dalamnya dilapisi grafit komposit yang memiliki kedalaman cukup. Reaktor terdapat pada posisi bawah bejana. Di bawah reaktor terdapat alat penukar kalor utama. Sebagian besar ruang dalam bejana diisi oleh pendingin primer yang berupa garam lebur $6\text{LiF}\text{-BeF}_2$. Penggunaan Li-6 adalah karena sifatnya yang menyerap neutron. Hal ini bertujuan supaya bahan bakar pada alat penukar kalor dapat dipastikan dalam kondisi subkritis.



- A1. Sistem reaktor
- A2. Sistem reprocessing bahan bakar
- A3. Sistem penambahan bahan bakar
- A4. Sistem pendinginan pasif reaktor
- A5. Sistem pendinginan pasif reprocessing bahan bakar

Gambar 2. Gedung reaktor IMSR.





- Memperbaiki aspek neutronik reaktor dengan meminimalkan kandungan isotop produk fisi yang bersifat racun neutron.
- Mengurangi beban pembangkitan kalor pasca pemadaman

Sistem proses ulang bahan bakar secara on line dimulai dengan proses fluorinasi. Proses ini bertujuan untuk menyelamatkan U dan Pu dari proses ekstraksi berikutnya. Selanjutnya U dan Pu ini dikembalikan ke reaktor setelah dilakukan proses defluorinasi. Setelah defluorinasi, garam bahan bakar dikontakkan dengan logam cair Li-Bi [6]. Dalam hal ini, Li pada logam cair Li-Bi akan mendesak komponen logam pada garam bahan bakar. Dalam proses Pa akan lebih suka ke fase Li-Bi sedangkan Th akan lebih suka berada pada fase garam [7]. Selanjutnya, Pa yang sudah berada pada fase Li-Bi diekstraksi dan disimpan pada tangki peluruhan Pa dan dibiarkan meluruh menjadi U-233. Secara berkala, dilakukan proses defluorinasi sehingga U-233 yang terbentuk dapat diambil dan dikembalikan ke reaktor setelah dilakukan proses defluorinasi.

Setelah dilakukan pengambilan Pa, garam bahan bakar dialirkan ke sistem ekstraksi produk fisi. Pada sistem ini, juga digunakan Li-Bi dengan komposisi Li terhadap Bi yang berbeda dengan Li-Bi yang digunakan untuk ekstraksi Pa. Komposisi ini dapat ditentukan sesuai dengan sensitivitas komponen yang akan diekstraksi [7].

Selanjutnya dilakukan diekstraksi dan produk fisi ditampung dalam tangki pendinginan produk fisi dalam bentuk garam fluoride. Tangki pendinginan produk fisi dilengkapi dengan sistem pendinginan pasif dan dirancang untuk dapat menampung dan mendinginkan produk fisi hingga beberapa (puluhan) tahun. Setelah pembangkitan kalor peluruhan menjadi cukup rendah, produk fisi dimasukkan dalam tangki limbah produk fisi dan disegel serta dibiarkan menjadi padat.

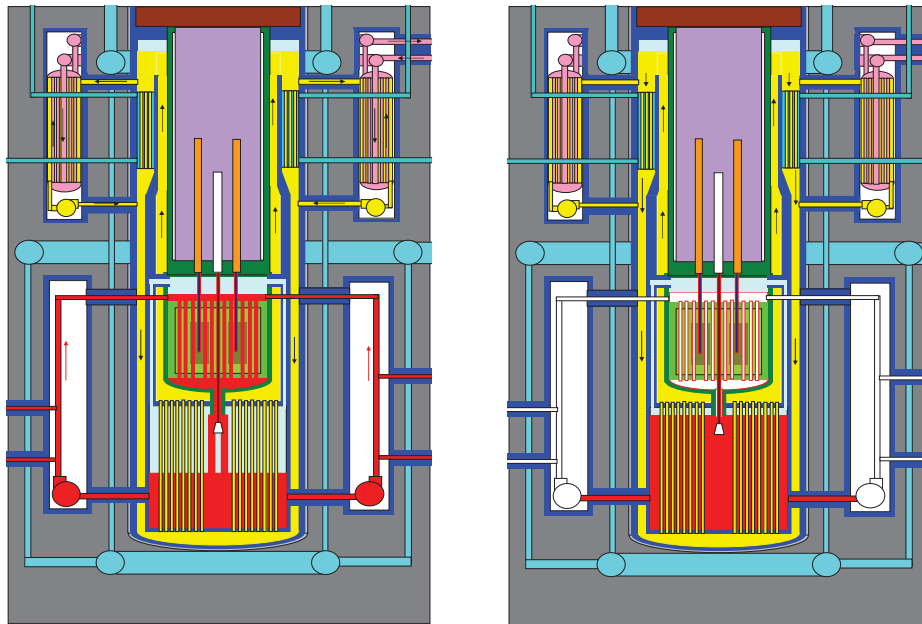
Sistem Reaktor pada Operasi Normal

Gambar 5A menunjukkan diagram alir IMSR pada kondisi operasi normal. Untuk mengoperasikan reaktor, pompa bahan bakar harus dihidupkan. Pompa bahan bakar selanjutnya mengangkat bahan bakar dari alat penukar kalor utama dan mengisikannya ke reaktor. Pada reaktor, terdapat moderator grafit yang memungkinkan kondisi kekritisan dapat dicapai. Alat penukar kalor utama menjadi hanya terisi bahan bakar sebagian.

Pada reaktor, bahan bakar dibiarkan mengalir ke bawah secara grafitasi menuju alat penukar kalor utama. Pada bagian bawah reaktor terdapat *plug* yang pembukaannya dapat diatur untuk mengatur laju aliran bahan bakar secara sinkron dengan pengaturan kemampuan pompa bahan bakar. Laju aliran bahan bakar ini diatur sesuai dengan daya yang diinginkan.

Plug dirancang untuk gagal dalam kondisi membuka. Dengan demikian, jika *plug* atau pompa bahan bakar gagal, maka bahan bakar akan mengalir kebawah dengan laju alir lebih besar daripada laju alir pengisiannya sehingga reaktor menjadi kosong dari bahan bakar. Dengan demikian sistem pompa bahan bakar dan *plug* merupakan sistem *shutdown* pasif yang dimaksudkan.

Pada saat reaktor beroperasi, pompa pendingin primer juga dihidupkan. Pendingin dari alat penukar kalor utama mengalir naik melalui riser. Dengan dihidupkannya pompa pendingin primer, maka pendingin dialirkan ke alat penukar kalor *intermediate* (*Intermediate Heat Exchanger*). Pada alat penukar kalor *intermediate*, kalor ditransfer ke garam *intermediate* dan selanjutnya ditransfer ke alat pemanas sistem turbin. Selanjutnya, pendingin dialirkan melalui *downcomer* kembali ke alat penukar kalor utama.



B. Kondisi pemadaman

Gambar 5. Diagram aliran reaktor IMSR

Sistem Reaktor pada Kondisi Pemadaman

Gambar 5B menunjukkan diagram aliran IMSR pada kondisi *shutdown*. Dalam kondisi *shutdown*, pompa bahan bakar dan pompa pendingin primer tidak beroperasi. Sementara itu, seluruh bahan bakar mengisi alat penukar kalor utama. Karena pada alat penukar utama kalor tidak terdapat moderator dan berada dalam lingkungan pendingin yang mengandung Li-6, maka bahan bakar secara pasti berada dalam kondisi subkritis.

Kalor peluruhan dari bahan bakar akan ditransfer ke pendingin. Dengan kedalaman bejana sistem reaktor yang cukup, akan terjadi sirkulasi alam pendingin. Pendingin primer mengalir naik melalui riser dan menuju ke alat penukar kalor pasca *shutdown* (*Post Shutdown Heat Exchanger*). Kalor akan ditransfer melalui alat penukar kalor pasca *shutdown* dan selanjutnya ditransfer ke sistem pendinginan pasif untuk sistem reaktor pasca *shutdown* (*Passive Reactor Heat Sink System*).

Pendingin primer yang lebih dingin selanjutnya mengalir turun melalui *down comer* dan menuju kembali ke alat penukar kalor utama untuk mengambil kembali kalor peluruhan bahan bakar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Filosofi Keselamatan Pada Desain IMSR

Reaktor IMSR dirancang sebagai reaktor yang memiliki sifat keselamatan tinggi. Sifat keselamatan tinggi ini berupa sifat keselamatan melekat serta aplikasi sistem keselamatan pasif. Sifat keselamatan melekat yang terpenting adalah koefisien reaktivitas suhu yang bernilai negatif. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa bahan bakar garam *fluoride* dengan moderator grafit memiliki koefisien reaktivitas suhu yang negatif [8, 9].

Selain itu, desain sistem reaktor yang diusulkan sebagaimana telah diuraikan di atas dimaksudkan untuk mampu mengaplikasikan sistem keselamatan pasif secara menyeluruh, yaitu yang berupa :

- sistem *shutdown* pasif
- sistem pendinginan *pasca shutdown* pasif

Dalam sistem *shutdown* pasif, semua gangguan yang akan mengarah kepada kecelakaan, akan mengakibatkan fenomena yang akan men-*shutdown* reaktor jauh sebelum kecelakaan terjadi. Untuk lebih jelasnya hal ini, akan dibahas kecelakaan-kecelakaan yang mungkin pada IMSR serta bagaimana kecelakaan tersebut dapat ditangani sepenuhnya secara pasif sehingga reaktor mencapai kondisi *shutdown* selamat (*safe shutdown*).

Reaktor IMSR menggunakan bahan bakar dan pendingin yang berupa garam lebur yang dioperasikan pada tekanan atmosferik. Dengan demikian, tidak akan pernah terjadi kecelakaan yang bersifat ekspansi dan diikuti kehilangan pendingin dalam jumlah besar. Garam bahan bakar dan pendingin dioperasikan pada kondisi cair dalam lingkungan material yang didesain sesuai dengan kondisi tersebut. Pada reaktor IMSR, inventory pendingin dan moderator grafit jauh lebih besar daripada inventory bahan bakar, sehingga kenaikan suhu hingga merusak integrasi sistem reaktor (bejana dan beton pengungkung) sulit terjadi.

Desain IMSR menempatkan bahan bakar dan pendingin primer dalam suatu wadah yang bersifat integral. Dengan desain semacam ini, peluang tumpahnya bahan bakar dan pendingin primer sangat kecil.

Dengan demikian jenis kecelakaan yang mungkin terjadi adalah :

- Kecelakaan kehilangan aliran bahan bakar
- Kecelakaan kehilangan aliran pendingin
- Kecelakaan kehilangan kemampuan pengambilan kalor
- Kecelakaan kerusakan integritas komponen sistem reaktor

Kecelakaan Kehilangan Aliran Bahan Bakar (*Loss of Fuel Flow Accident*)

Kecelakaan kehilangan aliran bahan bakar terjadi akibat gangguan kinerja pompa sirkulasi bahan bakar atau kegagalan pada *plug*. *Plug* dirancang sedemikian rupa sehingga jika gagal akan berada dalam kondisi bukaan maksimum. Dalam kondisi ini laju aliran pengosongan reaktor secara grafitasi dirancang untuk lebih besar daripada laju pengisian bahan bakar ke reaktor (teras dan blanket) yang mampu dilakukan secara maksimal oleh pompa sirkulasi bahan bakar. Dengan demikian, pada akhirnya semua bahan bakar akan menuju alat penukar kalor utama dan reaktor akan kosong dari bahan bakar. Hal ini tentu saja menuju ke kondisi pemadaman. Pendinginan terjadi secara pasif sebagaimana telah diuraikan pada uraian tentang kondisi pemadaman.

Dalam kasus kehilangan kemampuan pemompaan bahan bakar secara parsial, laju aliran bahan bakar menjadi berkurang. Hal ini pertama kali akan meningkatkan suhu bahan bakar. Berbagai penelitian dan perhitungan numerik telah menunjukkan bahan bahan bakar garam fluoride memiliki koefisien reaktivitas suhu negatif [6,9]. Kenaikan suhu ini akan membuat reaktor menjadi subkritis dan dayanya turun hingga mencapai kesetimbangan (kritis) pada tingkat daya lebih rendah. Dengan demikian, reaktor IMSR dapat menggunakan pengaturan kemampuan pompa bahan bakar untuk mengendalikan daya.

Jika pompa sirkulasi bahan bakar sepenuhnya gagal, maka tidak terdapat lagi kemampuan untuk mengisi bahan bakar bagi reaktor. Reaktor pada akhirnya akan *shutdown* dan bahan bakar semuanya berada pada alat penukar kalor utama. Dengan demikian, mekanisme gagalnya pompa bahan bakar merupakan salah satu dari mekanisme sistem *shutdown* pasif.

Kecelakaan Kehilangan Aliran Pendingin primer (*Loss of Coolant Flow Accident*)

Kehilangan aliran pendingin primer disebabkan oleh kegagalan pompa pendingin primer atau sumbatan aliran pendingin primer. Jika kehilangan aliran ini bersifat parsial, misalnya pompa pendingin primer berkurang kemampuannya, maka akan terjadi kenaikan suhu. Sifat bahan bakar yang memiliki koefisien reaktivitas suhu negatif akan menurunkan daya reaktor menyesuaikan dengan kemampuan pompa pendingin primer. Maka kemampuan pompa pendingin primer dapat diatur untuk digunakan sebagai mekanisme pengaturan daya reaktor.

Jika pengurangan kemampuan ini terjadi cukup besar, maka terjadi kenaikan suhu cukup tinggi. *Plug* dirancang untuk melebur pada suhu tertentu sehingga jika kenaikan suhu ini melebihi titik lebur *plug*, maka *plug* akan melebur sehingga bahan bakar mengalir ke alat penukar kalor utama dan reaktor menjadi *shutdown*.

Dengan demikian kegagalan pompa pendingin primer juga merupakan salah satu sistem pemadaman. Pendinginan selanjutnya dilakukan secara alamiah dengan menggunakan mekanisme pendinginan pasca pemadaman.

Kecelakaan Kehilangan Kemampuan Pengambilan Panas (*Loss of Heat Sink Accident*)

Kecelakaan kehilangan kemampuan pengambilan panas terjadi akibat kegagalan sistem konversi (sistem turbin), kegagalan pada alat penukar panas *intermediate* maupun terjadi pada saat jaringan listrik keluaran harus dimatikan.

Untuk kehilangan kemampuan pengambilan panas secara parsial, maka yang pertama kali terjadi adalah kenaikan suhu bahan bakar. Hal ini akan menurunkan daya reaktor karena sifat bahan bakar berupa koefisien reaktivitas suhu yang negatif. Dalam kondisi setimbang, daya reaktor akan menyesuaikan dengan kemampuan pengambilan panas. Jika kehilangan kemampuan pengambilan panas terjadi dalam fraksi cukup besar, maka kenaikan suhu bahan bakar menjadi cukup tinggi dan melampaui titik lebur *plug*. *Plug* akan melebur sehingga bahan bakar mengalir ke alat penukar panas utama dan reaktor menjadi pemadaman.

Dengan demikian hal ini juga merupakan sistem pemadaman pasif lainnya. Pendinginan selanjutnya dilakukan secara alamiah dengan menggunakan mekanisme pendinginan pasca pemadaman.

Kecelakaan Kerusakan Integritas Sistem Reaktor

Kerusakan integritas sistem reaktor yang dimaksudkan di sini meliputi kerusakan batas pemisah antara bahan bakar dan pendingin primer. Kerusakan tersebut bisa berupa kerusakan tubing pada alat penukar kalor utama atau kerusakan dinding pemisah yang memisahkan bahan bakar dengan pendingin primer.

Kerusakan semacam ini akan menyebabkan bahan bakar tercampur dengan pendingin primer dan kemudian campuran tersebut mengisi ruang sistem reaktor. Dalam kondisi ini, campuran bahan bakar dan pendingin primer tidak akan mencapai kondisi kritis karena konsentrasi bahan bakar menjadi sangat rendah ditambah dengan adanya Li-6 pada pendingin primer. Dalam kondisi semacam ini, kerapatan pembangkitan kalor pada campuran akibat peluruhan radioaktif menjadi sangat rendah.

Pendinginan dapat dilangsungkan secara sirkulasi alam dengan menggunakan sistem pendinginan pasca pemadaman.

KESIMPULAN

Telah diuraikan konsep reaktor IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*), yang merupakan reaktor pembiak termal. Reaktor IMSR dirancang sebagai reaktor dengan sifat keselamatan melekat dan memiliki fitur-fitur keselamatan pasif, yaitu sistem pemadaman pasif dan sistem pendinginan pasca pemadaman yang juga bersifat pasif. Sistem pemadaman pasif menggunakan kegagalan hingga level tertentu, yaitu kegagalan pompa sirkulasi bahan bakar, pompa pendingin primer dan sistem pengambilan kalor untuk memadamkan reaktor.

DAFTAR PUSTAKA

1. OECD/NEA. Nuclear energy. Trends in nuclear fuel cycle. Paris, France; 2001
2. The Virtual Nuclear Tourist. Nuclear power plant around the worlds. Available from: URL: <http://www.nucleartourist.com>. Accessed June 2010.
3. Energy Watch Group. EWG Paper No 1-06, Uranium Resources and Nuclear Energy; 2006
4. Harto. A. Fuel burn-up calculation passive compact Molten Salt Reactor (PCMSR) with on line fuel reprocessing for very long time operation. Proceeding of the 3rd Asian Physics Symposium (APS), Bandung; 2009.
5. Forsbeg, C. W., Peterson, P. F., Zhao, H.H. An advanced Molten Salt Reactor using high temperature reactor technology. International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP '04) Embedded International Topical Meeting, 2004 American Nuclear Society Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania; 2004.
6. Uhlir. Reprocessing of Molten Salt Reactor fuel. Nuclear Research Institute Rez plc, Czech Republic; 2009
7. Whatley. M. E. McNeese, L. E. Carter, W. L. Ferris, L. M., and Nicholson, E. L. Engineering development of the MSBE fuel recycle. Chemical Engineering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee; 1969
8. Harto. A. Studi dinamika pemsr pada komposisi bahan bakar setimbang dengan pendekatan kinetika reaktor titik. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi, P2EN, BATAN; 2007.
9. Zhang, D.L., Qiu, S.Z., Su, G.H., Liu, C.L., Qian, L.B. Analysis on the neutron kinetics for a Molten Salt Reactor. Progress in Nuclear Energy. 2009; 52: 624 – 636.