

INNOVATIVE MOLTEN SALT REAKTOR (IMSR), PENGEMBANGAN MSR UNTUK MEMENUHI SEMUA PERSYARATAN REAKTOR MAJU

Andang Widi Harto

Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada

ABSTRAK

INNOVATIVE MOLTEN SALT REAKTOR (IMSR), PENGEMBANGAN MSR UNTUK MEMENUHI SEMUA PERSYARATAN REAKTOR MAJU. Teknologi Reaktor nuklir pada masa mendatang mengarah pada peningkatan aspek keselamatan, peningkatan pendayagunaan bahan bakar, reduksi limbah radioaktif, ketahanan terhadap proliferasi bahan-bakar nuklir serta peningkatan aspek ekonomi. Innovative Molten Salt Reactor (IMSR) adalah reaktor nuklir yang menggunakan bahan bakar cair berupa garam lebur fluoride ($7\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4\text{-MaF}_x$). IMSR didesain sebagai reaktor pembiak termal, yaitu membiakkan U-233 dari Th-232. Hal ini untuk menjawab permasalahan pendayagunaan bahan bakar dan reduksi limbah radioaktif. Dalam aspek keselamatan, desain IMSR memiliki sifat inherent safe 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.

Kata kunci: IMSR, Reaktor Maju, Keselamatan

ABSTRACT

INNOVATIVE MOLTEN SALT REACTORS (IMSR), MSR DEVELOPMENT TO MEET ALL REQUIREMENTS OF ADVANCED REACTOR. Nuclear reactor technology in the future lead to increased safety, improved fuel utilization, reduction of radioactive waste, proliferation resistance of nuclear fuel as well as increased economic aspects. Innovative Molten Salt Reactor (IMSR) is a nuclear reactor that uses liquid fuel in the form of molten fluoride salts ($7\text{LiF-ThF}_4\text{-UF}_4\text{-MaF}_x$). IMSR is designed as a thermal breeder reactor, which is U-233 bred from Th-232. This is to answer the problems of utilization of fuel and radioactive waste reduction. In the aspect of safety, design IMSR has inherent properties safe and has passive safety features. Passive safety features consist of a passive shutdown systems, passive cooling system after shutdown as well as passive cooling system for the fission products.

Keywords: IMSR, Advanced Reactor, Safety

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 serta 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 *shutdown*.

Sistem shutdown pasif adalah suatu mekanisme yang akan men-shutdown reaktor yang dipicu oleh gangguan yang mengarah kepada kecelakaan. Sebagai contohnya adalah mekanisme yang akan men-shutdown reaktor yang langsung dipicu oleh kegagalan pompa pendingin.

* Corresponding author. Tel/Fax: -
Email address: andangftn@yahoo.com

Sementara itu, pendinginan setelah *shutdown* dilakukan dengan sirkulasi pendingin secara alamiah.

Permasalahan bahan bakar dan limbah nuklir diatasi dengan merancang reaktor sebagai reaktor pembiak (*breeding*). Dengan reaktor pembiak, bahan bakar yang harus disuplai ke reaktor setelah mencapai kesetimbangan pada dasarnya adalah material fertil. Material fisil akan terbentuk di reaktor dan langsung bereaksi fisi. Estimasi kebutuhan bahan bakar fertil untuk reaktor pembiak termal adalah 0,8 ton per GW_e dibandingkan dengan 170 ton ekivalen uranium alam untuk reaktor LWR. Limbah yang terbentuk diestimasi sebesar 0,8 ton per GW_e yang didominasi oleh produk fisi yang berumur paruh pendek [2,3]. Hal ini berbeda dengan jumlah limbah LWR yang mencapai 20 ton per GW_e yang 95 % -nya adalah transurium yang berumur paruh panjang.

Pada reaktor pembiak, diperlukan pemrosesan ulang 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, pemrosesan ulang bahan bakar sebaiknya dilakukan di dalam gedung reaktor [4].

IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*)

Deskripsi Umum

IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*) adalah reaktor pembiak termal tipe Molten Salt. ISMR didesain untuk membiakkan U-233 dari Th-232. Dengan demikian, bahan bakar yang disuplai setelah tercapai kondisi kesetimbangan adalah Th-232. IMSR dirancang dengan nilai CR sedemikian rupa 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.

Diagram skematik IMSR dapat dilihat pada Gambar 1.

Gedung Reaktor (*Reactor Building*)

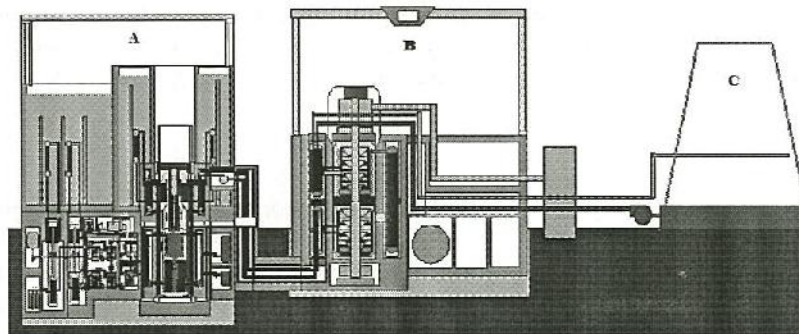
Gedung Reaktor (*Reactor Building*) IMSR berfungsi untuk menempatkan Sistem Reaktor (*Reactor System*), Sistem Reprosesing Bahan Bakar "On Line" (*On Line Fuel Reprocessing System*), Sistem Penambahan Bahan Bakar (*Fuel Make Up System*), Sistem Pendinginan Pasif untuk Sistem Reaktor Pasca Shutdown (*Passive Reactor Heat Sink System*) dan Sistem Pendinginan Pasif untuk Sistem Reprosesing Bahan Bakar (*Passive Fuel Reprocessing Heat Sink System*).

Sistem pendinginan pasif baik untuk Sistem Reaktor maupun Sistem Reprosesing Bahan Bakar berupa Kolam Air yang cukup besar. Pada bagian bawah kolam air terdapat alat penukar kalor di mana fluida penghantar kalor dari Sistem Reaktor dan Tangki Penyimpanan Bahan Radioaktif (limbah produk fisi) serta Tangki Peluruhan Pa melepaskan kalor ke kolam tersebut.

Pada saat reaktor shutdown, air kolam diestimasi cukup untuk menerima kalor peluruhan hingga sekitar dua bulan. Jika air telah menguap habis, pendinginan dapat dilanjutkan dengan menggunakan udara secara konveksi alamiah. Dengan demikian, pendinginan pasca shutdown dapat dilakukan secara alamiah untuk jangka waktu sangat lama. Diagram skematik Gedung Reaktor IMSR dapat dilihat pada Gambar 2.

Gedung Reaktor (*Reactor Building*)

Gedung Reaktor (*Reactor Building*) IMSR berfungsi untuk menempatkan Sistem Reaktor (*Reactor System*), Sistem Reprosesing Bahan Bakar "On Line" (*On Line Fuel Reprocessing System*), Sistem Penambahan Bahan Bakar (*Fuel Make Up System*), Sistem Pendinginan Pasif untuk Sistem Reaktor Pasca Shutdown (*Passive Reactor Heat Sink System*) dan Sistem Pendinginan Pasif untuk Sistem Reprosesing Bahan Bakar (*Passive Fuel Reprocessing Heat Sink System*).

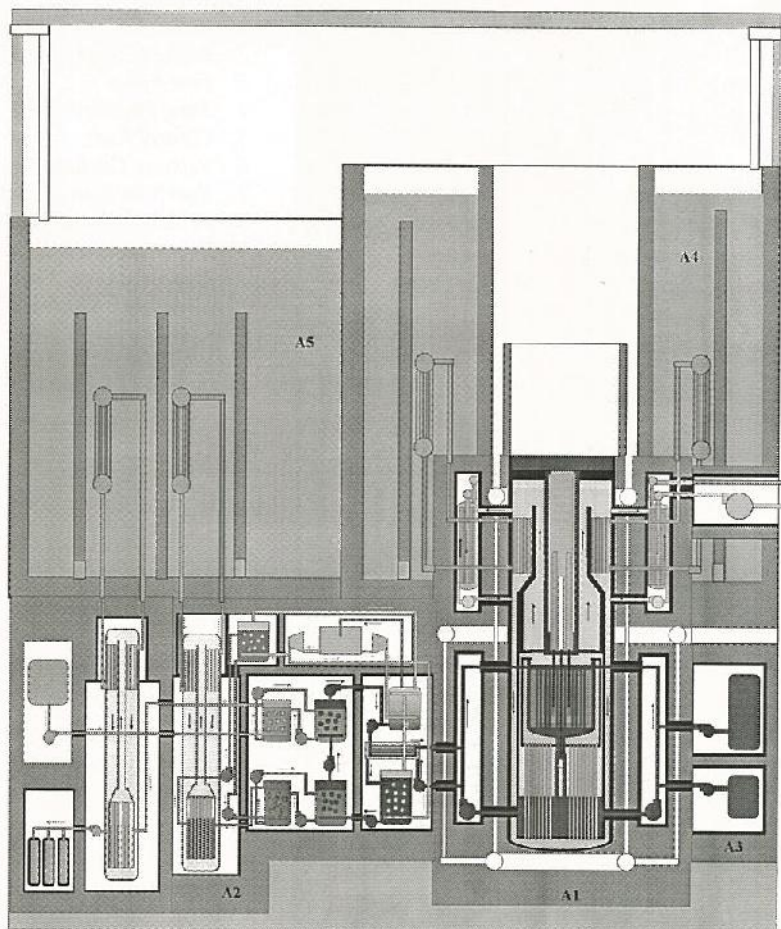


A. Gedung Reaktor

B. Gedung Turbin

C. Sistem pendingin

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



A1. Reactor System

A2. On Line Fuel Reprocessing System

A3. Fuel Make Up System

A4. Passive Reactor Heat Sink System

A5. Passive Fuel Reprocessing Heat Sink System

Gambar 2. Gedung Reaktor IMSR.

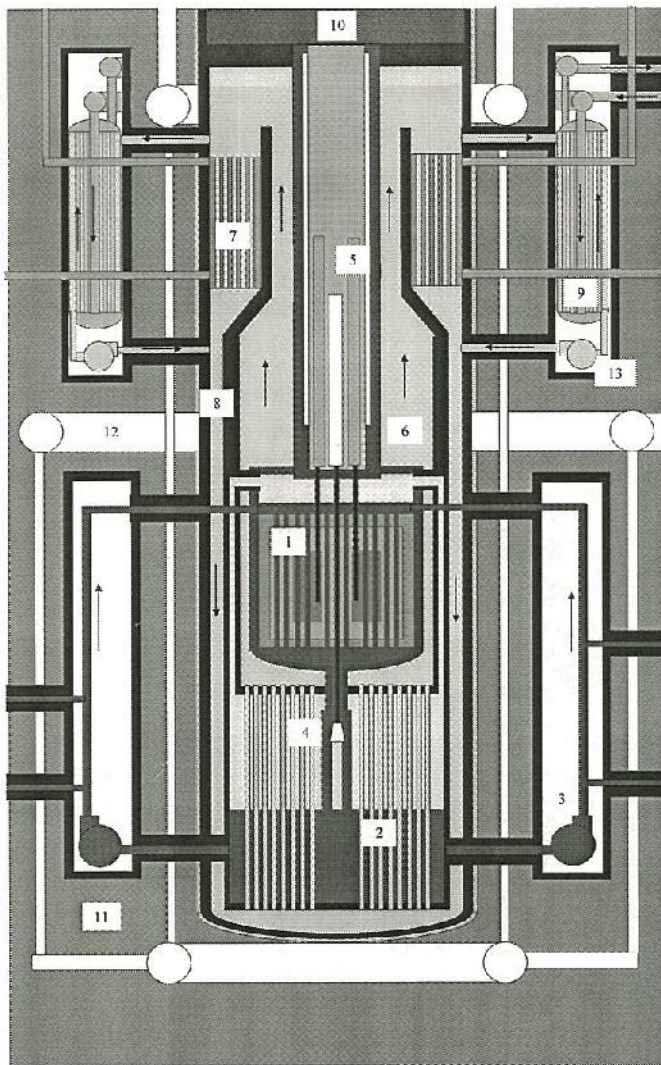
Sistem pendinginan pasif baik untuk Sistem Reaktor maupun Sistem *Reprocessing* Bahan Bakar berupa Kolam Air yang cukup besar. Pada bagian bawah kolam air terdapat alat penukar kalor di mana fluida penghantar kalor dari Sistem Reaktor dan Tangki Penyimpan Bahan Radioaktif (limbah produk fisi) serta Tangki Peluruhan Pa melepaskan kalor ke kolam tersebut.

Pada saat reaktor shutdown, air kolam diestimasi cukup untuk menerima kalor peluruhan hingga sekitar dua bulan. Jika air telah menguap habis, pendinginan dapat dilanjutkan dengan menggunakan udara secara konveksi alamiah. Dengan demikian, pendinginan pasca shutdown dapat dilakukan secara alamiah untuk jangka waktu sangat lama. Diagram skematik Gedung Reaktor IMSR dapat dilihat pada Gambar 2.

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.



REMARKS :

1. Reactor (Core and Blanket)
2. Primary Heat Exchanger
3. Fuel Pump
4. Flow Regulator Plug
5. Control Rods
6. Primary Coolant Riser
7. Post Shutdown Heat Exchanger
8. Primary Coolant Down Comer
9. Intermediate Heat Exchanger
10. Reactor System Plug
11. Concrete Containment
12. Concrete Containment Air Cooling Duct
13. Primary Coolant Pump

Gambar 3. Sistem Reaktor IMSR

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.

Dalam keadaan shutdown, seluruh bahan bakar mengisi alat penukar kalor utama. Karena pada alat penukar utama kalor tidak terjadi proses moderasi 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. Kalor akan ditransfer melalui Alat Penukar Kalor Pasca Shutdown (*Post Shutdown Heat Exchanger*) dan selanjutnya ditransfer ke Sistem Pendinginan Pasif untuk Sis-

tem Reaktor Pasca Shutdown (*Passive Reactor Heat Sink System*).

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.

Dengan demikian, 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 se-

hingga 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 dihidupkan. 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.

Jika pompa pendingin primer berkurang kemampuannya, akan terjadi kenaikan suhu. Sifat bahan bakar yang memiliki koefisien reaktivitas suhu negatif akan menurunkan daya reaktor menyesuaikan dengan kemampuan pompa pendingin primer. Jika kenaikan suhu cukup tinggi, maka plug dirancang untuk melebur pada suhu tertentu sehingga bahan bakar mengalir ke alat penukar kalor utama dan reaktor menjadi shutdown. Dengan demikian hal ini juga merupakan sistem shutdown pasif yang dimaksudkan.

Sistem Reprosesing Bahan Bakar On Line

IMSR sebagaimana MSR (Molten Salt Reactor) menggunakan bahan bakar cair. Salah satu keistimewaan penggunaan bahan bakar cair adalah kemampuan reprosesing bahan bakar secara on line^[5]. Diagram skematik sistem reprosesing bahan bakar on line pada IMSR dapat dilihat pada Gambar 4.

Tujuan utama dari Sistem Reprosesing Bahan Bakar On Line adalah :

1. Mengambil Pa dari bahan bakar
2. Mengambil Produk fisi dari bahan bakar

Pa-233 terbentuk ketika Th-232 menyerap neutron. Jika Pa-233 tetap berada dalam reaktor, maka dapat terjadi dua kemungkinan, yaitu :

1. meluruh menjadi U-233 (yang merupakan hal yang diharapkan)
2. menyerap neutron menjadi Pa-234 dan selanjutnya meluruh menjadi U-234

Proses yang kedua tidak diharapkan karena dua hal yaitu:

1. Pa-233 menjadi racun neutron yang mengganggu reaktor dari aspek neutronik
2. Produk peluruhan berupa U-234 tidak memiliki arti secara neutronik

Dengan demikian, maka dengan mengekstrak Pa-233 dan mengeluarkan dari reaktor, maka Pa-233 tidak be-

rada dalam medan radiasi neutron sehingga proses serapan neutron dapat dihindari dan Pa-233 berkesempatan lebih banyak untuk meluruh menjadi U-233 yang diharapkan. Di samping itu, kritikalitas reaktor dapat dijaga dengan meminimalkan jumlah Pa-233 dalam teras reaktor.

Sementara itu ekstraksi produk fisi dilakukan dengan dua tujuan, yaitu :

1. memperbaiki aspek neutronik reaktor dengan meminimalkan kandungan isotop produk fisi yang bersifat racun neutron.
2. Mengurangi beban pembangkitan kalor pasca shutdown

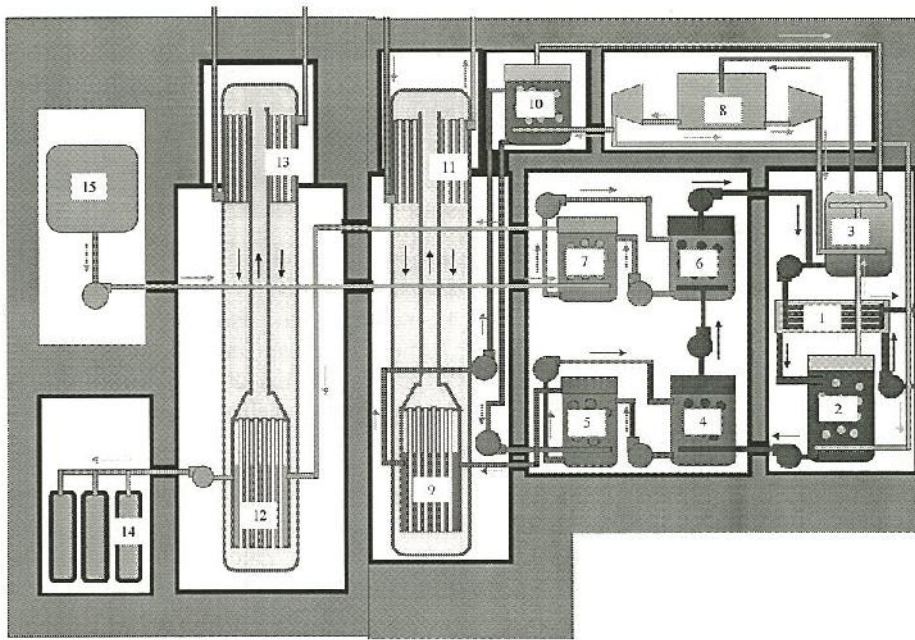
Sistem reprosesing bahan bakar on line dimulai dengan proses fluorinasi. Proses ini bertujuan untuk menyelamatkan U dan Pu dari proses berikutnya yaitu ekstraksi. U dan Pu ini selanjutnya dikembalikan ke reaktor setelah dilakukan proses defluorinasi.

Proses berikutnya adalah ekstraksi Pa. Garam bahan bakar dikontakkan dengan logam cair Li-Bi^[6]. Li pada logam cair Li-Bi akan mendesak komponen logam pada garam bahan bakar. Dalam Pa akan lebih suka ke fase Li-Bi sedangkan Th akan lebih suka berada pada fase garam^[6]. Pa yang sudah berada pada fase Li-Bi selanjutnya didekstraksi dan disimpan pada tangki peluruhan Pa dan dibiarkan meluruh menjadi U-233. Secara berkala, dilakukan proses fluorinasi 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^[6].

Selanjutnya dilakukan deekstraksi dan produk fisi ditampung dalam tangki pendinginan produk fisi dalam bentuk garam flouride. 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.



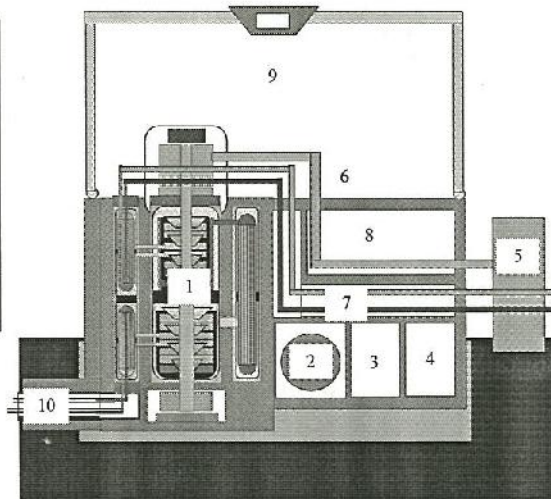
REMARKS

- | | |
|--------------------------------------|---|
| 1. Regenerative Heat Exchanger | 9. Protactinium Decay Tank |
| 2. Fuel Fluorination Tank | 10. Protactinium Fluorination Tank |
| 3. Defluorination Tank | 11. Passive Protactinium Tank Heat Exchanger |
| 4. Protactinium Extraction Tank | 12. Fission Product Decay Tank |
| 5. Protactinium Deextraction Tank | 13. Passive Fission Product Decay Tank Heat Exchanger |
| 6. Fission Product Extraction Tank | 14. Fission Product Container |
| 7. Fission Product Deextraction Tank | 15. Lithium Fluoride Salt Make Up System |
| 8. Gas Processing System | |

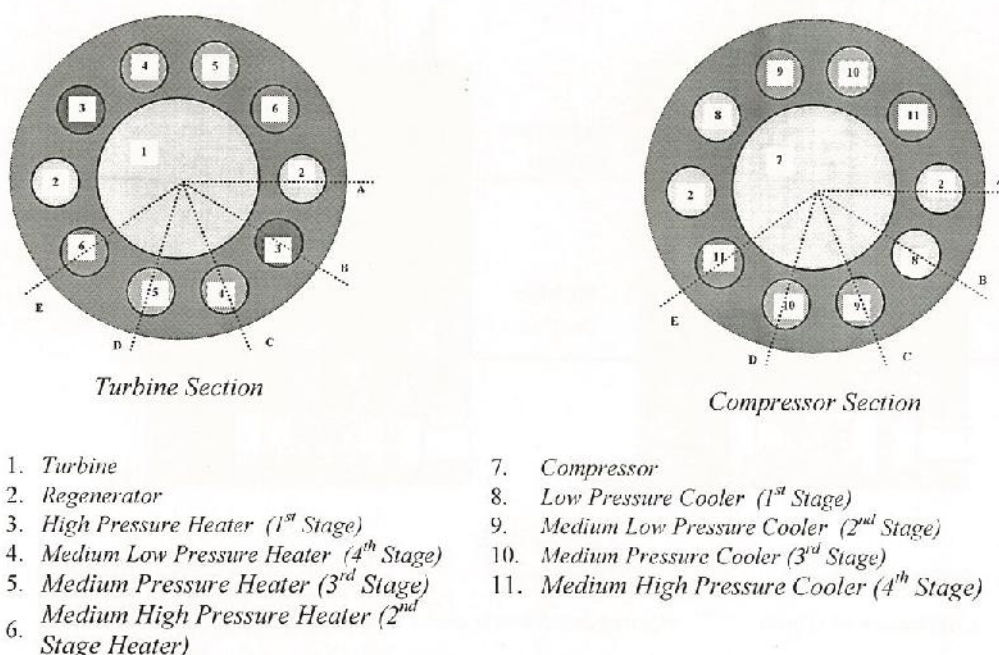
Gambar 4. Sistem Reprosesing Bahan Bakar "On Line"

REMARKS :

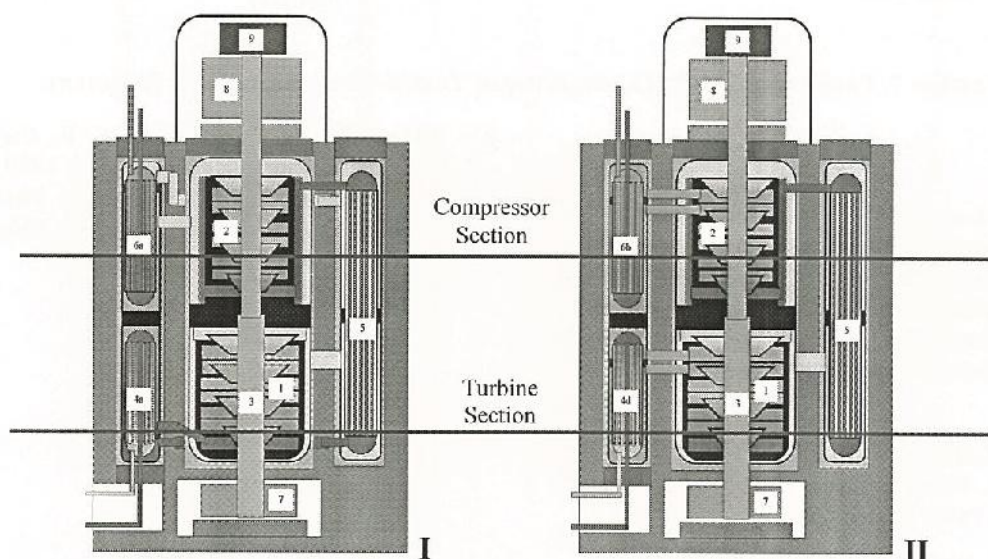
1. Turbine System
2. Helium Accumulator Tank
3. Helium Purification System Compartment
4. Auxiliary Machine Compartment
5. Main Transformer
6. Main Electric Bus
7. Turbine Coolant Piping Gallery
8. Auxiliary Power Compartment
9. Turbine Building Hall
10. Turbine Heating Fluid Piping Gallery



Gambar 5. IMSR Turbine Building



Gambar 6. Pandangan Horizontal Kompartemen Turbin-Kompresor IMSR

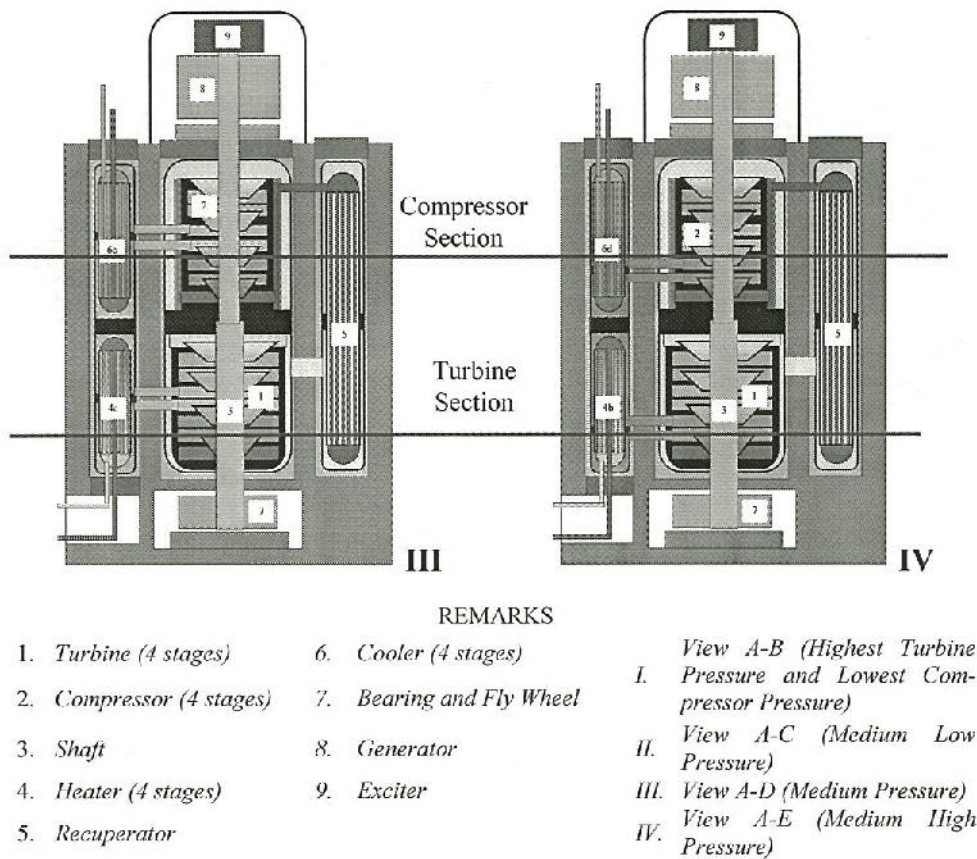


Gambar 7. Pandangan Vertikal Kompartemen Turbin-Kompresor IMSR

Gedung Turbin dan Sistem Turbin

IMSR menggunakan sistem turbin gas multi reheat, multi cooling dan regeneratif. Sebagai fluida kerja, digunakan helium. Pada tulisan ini, digunakan sistem turbin gas dengan 4 tingkat pemanasan dan 4 tingkat pendinginan.

Gambar 5 menunjukkan diagram skematik dari layout Gedung Turbin. Sistem Turbin IMSR dalam hal ini dirancang sebagai sisten turbin integral. Sistem turbin dan komponen-komponennya ditempatkan pada suatu kompartemen beton. Gambar 6 menunjukkan Pandangan Horizontal Kompartemen Turbin-Kompresor IMSR sedangkan Gambar 7 menunjukkan Pandangan Vertikal Kompartemen Turbin-Kompresor IMSR



Gambar 7. Pandangan Vertikal Kompartemen Turbin-Kompresor IMSR (lanjutan)

KESIMPULAN

Telah diuraikan konsep IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*), yang merupakan variasi dari MSR. IMSR adalah reaktor pembiak termal yang dirancang sebagai reaktor dengan sifat keselamatan melekat dan memiliki fitur-fitur keselamatan pasif, yaitu sistem shutdown pasif dan sistem pendinginan pasca shutdown yang juga bersifat pasif.

DAFTAR PUSTAKA

1. OECD/NEA, Nuclear Energy, "Trends in Nuclear Fuel Cycle", Paris, France (2001)
2. HARTO. A., 2009, Sistem Kogenerasi Nuklir
3. HARTO. A., 2009, Teknologi Reaktor Maju
4. FORSBEG, C. W., PETERSON, P. F., ZHAO, H.H., 2004, An advanced Molten Salt Reactor Using High Temperature Reactor Technology, ICAPP.2004.MSR.Paper, 2004 International Congress on Advanced in Nuclear Power Plants (ICAPP '04) Embedded International Topical Meeting, 2004 American Nuclear Society Annual Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania.
5. UHLIR, 2009, Reprocessing of Molten Salt Reactor Fuel, Nuclear Research Institute Rez plc, Czech Republic

6. WIIATLEY. M. E., McNeese, L. E., Carter, W. L., Ferris, L. M., and Nicholson, E. L., 1969, Engineering Development of The MSBE Fuel Recycle, Chemical Engineering Division, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee