**Molten Salt Reactor: PROSPEK CERAH REAKTOR MAJU BERBAHAN BAKAR THORIUM**

**R. Andika Putra Dwijayanto**

*Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada*

*Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional*

*andika.putra.d@mail.ugm.ac.id*

**ABSTRAK**

***MOLTEN SALT REACTOR: PROSPEK CERAH REAKTOR MAJU BERBAHAN BAKAR THORIUM****. Riset terhadap reaktor generasi IV telah dilakukan berbagai negara hingga saat ini, untuk meningkatkan kualitas dan mengatasi persoalan-persoalan reaktor yang ada pada masa sekarang. Salah satunya adalah riset terhadap reaktor maju Molten Salt Reactor (MSR) yang menggunakan bahan bakar yang dilarutkan dalam garam cair. MSR diklaim memiliki prospek yang bagus untuk digunakan sebagai reaktor generasi IV. MSR menggunakan konsep Full-Passive Safety System dan Inherent Safe untuk menjamin keselamatan reaktor. Mengaplikasikan siklus bahan bakar Thorium, reaktor ini bersifat thermal breeder, yang diperlukan untuk mengurangi penggunaan Uranium-235 dan menjamin sustainabilitas energi. Disamping itu, MSR bekerja pada suhu operasi tinggi, sehingga memungkinkan utilisasi panas keluaran untuk berbagai keperluan termal selain listrik.*

*Kata Kunci : Molten Salt, reaktor maju, sistem keselamatan, siklus Thorium*

**ABSTRACT**

***MOLTEN SALT REACTOR: BRIGHT PROSPECT OF THORIUM-FUELED ADVANCE REACTOR****. Researches toward Generation IV nuclear reactor has been established by various countries up until now, due to increase its quality and to overcome its various problems nowadays. One of them is Molten Salt Reactor (MSR) which utilise fuel dissolved in liquid salt. MSR is claimed to have a bright prospect to be implemented as Generation IV nuclear reactor. MSR uses Full-Passive Safety System and Inherent Safe concept to guarantee reactor safety. By using Thorium fuel cycle, this reactor can work as a thermal breeder, which is needed to reduce the usage of Uranium-235 and maintain energy sustainability. Aside, MSR operates at high temperature, allowing it to utilise its thermal output for various thermal purposes beside electric supply.*

*Keywords : Molten Salt, advance reactor, safety system, Thorium cycle*

**pendahuluan**

K

ebutuhan energi dunia tiap tahun makin meningkat, sementara sumber energi utama yang digunakan saat ini, yaitu batubara dan minyak bumi, jumlahnya terbatas dan bisa habis. Rentang ketersediaan akumulatif minyak bumi yang sudah terbukti diperkirakan hanya cukup sampai 42 tahun lagi. Sementara, laju produksi batubara total dunia diperkirakan sebesar 5,86 trilyun ton per tahun, sehingga cadangan total batubara terbukti dunia diestimasikan bertahan hingga 155 tahun ke depan, dengan asumsi laju pemakaian flat. Adapun cadangan gas alam terbukti di seluruh dunia pada tahun 2006 sebesar 179,83 trilyun meter kubik, dengan estimasi bisa bertahan selama 65 tahun dengan laju konsumsi tetap.[1]

Hal ini meniscayakan perlunya mencari sumber energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energi dunia yang terus meningkat. Salah satu alternatifnya adalah penggunaan energi nuklir, yang selama ini telah terbukti menghasilkan daya secara lebih efisien.

Namun, energi nuklir sendiri bukan tanpa masalah. Bahan bakar utama yang digunakan untuk reaktor nuklir adalah Uranium-235, yang notabene jumlahnya di alam juga terbatas. Kadarnya hanya 0,7 persen dari Uranium alam secara total. Jika diasumsikan bahwa laju konsumsi energi nuklir tetap, maka stok Uranium yang ada diperkirakan bisa bertahan untuk 200 tahun ke depan[2], dengan kemungkinan tambahan 500 tahun apabila cadangan Uranium yang belum tereksplorasi bisa didapatkan. [3] Namun laju konsumsi flat ini tentu tidak mungkin, mengingat penggunaan energi tiap tahun akan terus meningkat. Dengan laju konsumsi demikian dan menggunakan teknologi yang ada saat ini, diperkirakan bahwa *peak* penambangan Uranium-235 akan terjadi pada tahun 2025.[1] Setelah itu, akan terjadi penurunan hasil tambang yang dapat berimbas pada krisis sumber energi nuklir.

Untuk itu, perlu dikembangkan desain reaktor maju yang memiliki fungsi pembiakan. Hal ini perlu demi memanfaatkan sumber energi nuklir lain yang belum bisa digunakan saat ini, misalnya Uranium-238 atau Thorium-232. Selain meningkatkan sustainabilitas, akibat penggunaan bahan bakar yang masih sangat berlimpah, reaktor maju juga didesain agar memiliki laju konsumsi bahan bakar rendah, sistem keselamatan yang lebih tinggi, menghasilkan limbah lebih sedikit, biaya lebih murah, non-proliferasi, serta spektrum penggunaan yang lebih luas.[4]

Salah satu alternatif yang bisa dikembangkan dari desain reaktor maju ini adalah Molten Salt Reactor.

**PEMBAHASAN**

1. *Sejarah*

Riset terhadap Molten Salt Reactor sudah berlangsung sejak lama. Riset ekstensif terhadap Molten Salt Reactor dimulai saat U.S. Aircraft Reactor Experiment mendukung program U.S. Aircraft Nuclear Propulsion. ARE, MSR bersuhu tinggi eksperimental ini dikembangkan di Oak Ridge National Laboratory (ORNL).[5]

Pada tahun 1956, direktur ORNL memperkerjakan MacPherson untuk membentuk sebuah grup di ORNL dengan tujuan untuk membangun pembangkit listrik komersial.[5] Supaya berhasil, mereka membutuhkan garam bahan bakar yang menyerap sedikit sekali neutron, melarutkan banyak Uranium dan Thorium, stabil secara termal, dan kompatibel secara kimiawi dengan material struktur. Diputuskan bahwa fluorida adalah yang terbaik, tapi UF4 memiliki titik lebur yang sangat tinggi (1035 0C). Pencampurannya dengan BeF2 dan LiF menjadikan titik lebur dan viskositasnya berkurang, dan menghasilkan solusi UF4-LiF-BeF2.[6] Konstruksi reaktor percobaan dimulai tahun 1962, dan pembangkit mulai beroperasi pada tahun 1966. Pada tahun 1968, seluruh Uranium diekstrak dan diganti dengan Uranium-233, nuklida fisil dari siklus Thorium. Reaktor ini di-*shutdown* pada tahun 1969 dan pengembangannya kehilangan momentum.[5] Hal ini diakibatkan keputusan untuk mengembangkan hanya satu jenis reaktor pembiak dan rasio pembiakan MSR yang kecil, hanya sedikit diatas satu.[7] Sampai kemudian tahun 2001, reaktor MSR ditetapkan sebagai reaktor generasi 4, yang kemudian memancing para insinyur untuk kembali mengembangkannya.[5]



**Gambar 1. Diagram ARE (Aircraft Reactor Experiment)**

1. *Fitur Utama*

Molten Salt Reactor memiliki beberapa karakteristik unik yang menawarkan potensi energi nuklir yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan dengan mekanisme pemrosesan bahan bakar *online*. MSR merupakan reaktor nuklir yang menggunakan bahan bakar cair dalam bentuk florida panas atau garam klorida alih-alih bahan bakar padat yang biasa digunakan pada reaktor pada umumnya. Bahan bakarnya berbasis garam lebur UF4-BeF2-ThF4-LiF dan menggunakan moderator grafit. Bahan bakar berbasis U dan Th memungkinkan untuk mendesain teras reaktor yang mempunyai kemampuan pembiakan pada spektrum neutron termal sehingga dapat meningkatkan pendayagunaan sumber bahan bakar nuklir alam mencapai 100 kali tingkat penggunaan sekarang. Basis pengembangannya adalah reaktor *breeder* (pembiak) yang menggunakan siklus Thorium. [4]



**Gambar 2. Diagram Molten Salt Reactor dengan siklus Brayton multi-reheat**

Secara umum, MSR memiliki dua subkelas primer. Pada subkelas pertama, material fisil dilarutkan dalam garam lebur. Sementara pada subkelas kedua, garam lebur bertindak sebagai pendingin bertekanan rendah untuk teras berbahan bakar *coated particle*, mirip dengan yang digunakan pada High-Temperature Reactor (HTR). Selain itu, menurut jenis garam bahan bakar dalam terasnya, MSR juga dapat dibagi menjadi tiga kategori: *single-fluid*, *two-fluid*, dan *multi-fluid* MSR. Namun, *multi-fluid* MSR tergolong jarang dan desainnya terlalu rumit.[5]

Mengenai potensi penggunaan reaktor berbahan bakar cair, hal ini sudah diakui sejak lama. Sistem garam-lebur memiliki keuntungan berikut, dalam kaitannya dengan bahan bakar:

- Koefisien ekspansi termal tinggi yang memberikan koefisien reaktivitas suhu negatif yang tinggi. Bahan bakar cair ini akan mengembang saat dipanaskan, sehingga menurunkan laju reaksi nuklir dan membuat reaktor beregulasi secara otomatis, menurunkan daya di teras.[5]

- Reaktor dapat dioperasikan pada suhu tinggi dengan tekanan rendah. MSR dapat beroperasi pada temperatur berkisar 700-750 0C dengan tekanan mendekati tekanan atmosfer. Hal ini dikarenakan penggunaan bahan bakar yang memiliki titik didih tinggi serta material yang tahan suhu tinggi.[8] Keuntungannya ada pada sistem keselamatan, dimana kemungkinan kecelakaan pelepasan material radioaktif dari teras mampu dieliminasi. Selain itu, suhu operasi yang tinggi memungkinkan aplikasi untuk berbagai aplikasi termal, misalnya gasifikasi batu bara dan radiolisis air untuk memproduksi Hidrogen.

Efek lainnya, reaktor yang beroperasi pada tekanan mendekati tekanan atmosfer berimbas pada kebocoran tabung tidak secara otomatis menghasilkan ekspulsi bahan bakar dan pendingin tersebut. Hal ini merupakan keunggulan bagi sistem keselamatan yang memungkinkan pembuangan panas pasif. Garam-garamnya juga memiliki kapasitas panas yang sangat tinggi, jadi mereka bisa menyerap banyak sekali panas dengan konduktivitas termal yang 60 kali lebih rendah dibandingkan Natrium cair yang digunakan di LMFBR.[9]

- Posibilitas untuk pembuangan produk fisi secara kontinu.[5] Produk fisi dan aktinida bisa dikeluarkan dari dalam teras secara *online* saat reaktor sedang beroperasi, dengan aktinida kelak dimasukkan lagi ke saluran bahan bakar. Artinya, saat atom terbelah menjadi atom yang lebih kecil (produk fisi), atom-atom itu bisa dikumpulkan dan dikeluarkan dari reaktor dengan sangat cepat. Hal ini mencegah atom-atom itu menyerap neutron yang kemudian akan meneruskan reaksi berantainya. Akibatnya, efisiensi bahan bakar MSR menjadi sangat tinggi.

- Pemanfaatan material nuklir yang lebih baik dengan mencapai *burn-up* bahan bakar yang lebih tinggi dibandingkan reaktor konvensional dengan bahan bakar Uranium.[5] Nilai *burn-up* aktinida dengan MSR dapat mencapai 96 persen.

- Menghilangkan biaya untuk fabrikasi elemen bahan bakar. Penggunaan bahan bakar garam lebur meniscayakan tidak perlunya penggunaan kelongsong bakar dan perangkat bakar sehingga mengurangi biaya produksi. Di sisi lain, aktinida dengan nomor atom tinggi memiliki massa kritis kecil dan laju kalor peluruhan yang tinggi, menghasilkan tantangan ekonomis dan teknis untuk fabrikasi bahan bakar. Karena MSR tidak menggunakan fabrikasi bahan bakar, hal ini tidak menjadi masalah.[10]

- Tidak ada *neutron loss*, memiliki nilai ekonomis neutron yang tinggi. Karena tidak ada struktur seperti kelongsong, *fuel duct*, *grid spacer*, dan sejenisnya, sehingga tidak ada neutron yang diserap secara tidak perlu oleh material struktur.[9] Hal ini membantu meningkatkan efisiensi bahan bakar dan sustainabilitas.

Belum terlalu lama ini, muncul juga desain baru MSR, yaitu *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR). Desain ini menawarkan MSR dengan desain yang lebih kompak dibandingkan desain yang telah ada, dengan tingkat integrasi desain serta modularitas tinggi. Ditambah, PCMSR bersifat fleksibel akan bentuk daya keluarannya karena suhu operasinya yang tinggi, bisa dikopel dengan sistem konversi daya maupun sistem proses termal, baik dengan suhu rendah, sedang, maupun tinggi.[8]



**Gambar 3. Diagram Reaktor PCMSR**

Untuk sistem pendinginan, MSR tidak menggunakan pendingin berupa air sehingga tidak memungkinkan terjadinya *steam explosion*.[5] Lalu, karena MSR dapat dioperasikan pada suhu tinggi, sistem konversi energinya tidak menggunakan siklus Rankine sebagaimana banyak digunakan pada reaktor nuklir sekarang. MSR menggunakan mesin turbin gas dengan siklus Brayton dengan pendingin gas inert (misalnya Helium). Karena garam lebur memiliki kalor spesifik cukup tinggi, maka MSR dapat dioperasikan dengan beda suhu masukan dan keluaran dari fluida pendingin *intermediate* (demikian juga dengan fluida pendingin primer dan garam bahan bakar) yang tidak terlalu besar.[8] Penggunaan siklus Brayton menghilangkan tantangan teknis pada MSR, misalnya kontrol Tritium yang lebih sederhana, tidak adanya reaksi garam jika terjadi kegagalan pada penukar panas, serta efisiensi yang lebih tinggi.[7]

1. *Siklus Thorium*

Dengan asumsi maksimum sumber Thorium yang ada di alam, cadangan yang ada bisa bertahan selama 887 tahun dengan penggunaan daya 5100 GWe tahun[1], jauh lebih panjang dari asumsi maksimum penggunaan Uranium-235. Hal ini dimungkinkan karena selain jumlah Thorium-232 yang lebih melimpah, juga karena efisiensi *burn-up* reaktor sangat tinggi. Thorium alam 3 kali lipat lebih banyak dibanding Uranium dengan cadangan terbukti yang besar, bahkan jika penggunaan Uranium sekarang hanya sedikit. Contohnya, deposit tunggal baru di Lemhi Pass Idaho baru-baru ini menambahkan 600 ribu ton cadangan Thorium terbukti dunia, menambah cadangan sebesar 50 persen.[11]

MSR menggunakan siklus bahan bakar Thorium pembiak. Material fertil Thorium-232 dibiakkan dalam teras reaktor, dipicu dengan *low-enriched* Uranium sebagai *startup* reaktor, menghasilkan material fisil Uranium-233. Material fisil diperlukan saat *startup* karena Thorium tidak memiliki isotop fisil, sehingga MSR memerlukan material fisil terlebih dahulu agar mampu kritis. Setelah *startup*, cukup menambahkan Thorium sebagai bahan bakar. Rasio pembiakan dengan siklus ini berkisar 1,06. MSR juga bisa menggunakan siklus Thorium denaturasi, dengan menambahkan material fertil Uranium-238 untuk mengurangi material fisil Plutonium yang dihasilkan, tapi konsekuensinya rasio pembiakan turun menjadi hanya sedikit sekali diatas satu.[9]

Operasi dalam kondisi *break even* hanya membutuhkan kurang lebih 800 kg Thorium/GWe tahun yang ditambahkan dalam bentuk ThF4. Material fisil awal yang dibutuhkan hanya sebanyak 200 kg/GWe tahun. Inventori Thorium untuk *startup* bervariasi dari 50 sampai 200 ton/GWe.[11]

Reaksi fisi pada MSR dioptimalkan pada zona teras, sementara reaksi pembiakan dioptimalkan pada zona *blanket*. Hal ini disebabkan pada zona teras, moderator lebih banyak. Akibatnya, neutron lebih banyak diserap Uranium-233 daripada Thorium-233, sehingga reaksi fisi lebih dominan. Sebaliknya, pada zona *blanket*, moderator lebih sedikit, sehingga Thorium-232 lebih besar kemungkinan menyerap neutron daripada Uranium-233. Akibatnya, reaksi pembiakan lebih dominan.[8]

1. *Sistem Keselamatan*

Dari sudut pandang keselamatan, keberadaan bahan bakar dalam garam pendingin menyediakan koefisien umpan balik termal negatif. MSR meregulasi suhunya sendiri secara pasif. Jika reaktor mengalami *overheat*, maka reaktivitas di dalam teras melambat secara otomatis, yang mana disebut koefisien reaktivitas suhu negatif. Thorium menyerap lebih banyak neutron ketika reaktor mengalami *overheat,* yang kita sebut efek Doppler. Ini menyebabkan neutron menjadi lebih sedikit untuk meneruskan reaksi berantai, yang akhirnya mengurangi daya.[12]

Efek kedua berkaitan dengan ekspansi termal bahan bakar. Jika bahan bakar mengalami overheat, ia akan mengembang dan terdorong keluar dari zona teras.[12] Efek ini menyebabkan, dalam kasus *fast* MSR, reaktivitas negatif. Namun, hal ini bisa menyebabkan reaktivitas positif pada *iso-breeding* thermal MSR, yang biasanya bekerja *under-moderated*.[13] Namun, karena dikompensasi dengan efek Doppler, total hasil koefisien umpan balik suhunya juga negatif. Ini merupakan salah satu keunggulan besar dalam keselamatan kritikal dari MSR, utamanya dibandingkan dengan konsep *iso-breeding* lain.

MSR tidak memerlukan reaktivitas lebih untuk mengatasi susut bahan bakar sebagaimana pada LWR, karena jumlah material fisil dapat dpertahankan untuk mencapai kekritisan reaktor. Dengan penggunaan bahan bakar cair sekaligus mode pengisian ulang bahan bakar secara *online*, maka reaktivitas lebih untuk mengkompensasi perubahan letak bahan bakar fisi tidak diperlukan karena komposisi bahan bakar cair selalu seragam terhadap posisi, juga mengakibatkan kebutuhan reaktivitas lebih untuk mengkompensasi racun neutron produk fisi dapat dikurangi.[8]

Bahan bakar garam lebur mengandung sangat banyak material fertil dan sedikit material fisil. Hal ini akan menyebabkan koefisien reaktivitas umpan balik suhu menjadi negatif. Efek ini dapat dirancang supaya lebih mendominasi koefisien reaktivitas umpan balik suhu dari moderator grafit yang bernilai positif. Dengan demikian, koefisien reaktivitas umpan balik suhu dari MSR secara keseluruhan bernilai negatif.[8]

Untuk desain PCMSR, jenis ini menawarkan sistem keselamatan pasif penuh (*Full-Passive Safety System*) baik untuk kecelakaan DBA maupun Beyond DBA.

Kecelakaan DBA pada PCMSR terdiri dari LOFFA (*Lost of Fuel Flow Accident*), LOCFA (*Lost of Coolant Flow Accident*), LHSA (*Lost of Heat Sink Accident*) dan LIVIA (*Loss of Internal Vessel Integrity Accident*). Semua kecelakaan ini akan menyebabkan reaktor menjadi *shutdown*, melalui mekanisme yang ada pada desain reaktor. Kalor peluruhan yang dibangkitkan pasca *shutdown* akan didisipasikan oleh sistem pendinginan pasca shutdown yang bersifat pasif. Dengan keberhasilan penanganan kecelakaan DBA, semua material radioaktif tetap terkungkung dalam sistem reaktor.

Pada kecelakaan *beyond* DBA, terjadi pelepasan material radioaktif dari sistem reaktor. Sistem keselamatan tambahan diperlukan untuk mempertahankan material radioaktif tersebut tetap terkungkung dalam gedung reaktor sehingga kecelakaan parah dapat terhindarkan. Sistem kolam pemadaman (*quench pool*) dan kolam pelesapan kalor pasif berperan besar dalam hal ini.[14]

Salah satu karakteristik paling penting dan fitur yang berkaitan dengan keselamatan dari MSR adalah solubilitas Aktinida dan produk fisi dalam bentuk fluorida pada garam pembawa. Solubilitasnya sangat tergantung pada tipe garam pembawa dan temperatur. Pada dasarnya, produk fisi dapat dibagi menjadi dua jenis: produk fisi dapat terlarut dan tidak dapat terlarut. Produk fisi tidak dapat terlarut bisa dibagi lagi menjadi dua jenis, yaitu logam mulia dan volatil serta produk fisi berupa gas. Aktinida dan produk fisi dapat terlarut akan terlarut dan tetap berada dalam pelarut saat kondisi kecelakaan. Sementara, logam mulia akan menyepuh dirinya pada permukaan metal yang bisa dengan mudah dibuang. Operasi MSR memerlukan pembuangan volatil dan produk fisi gas dari garam, misalnya dengan teknik gelembung Helium.[13]

1. *Tantangan Teknologi*

Hal-hal di atas menunjukkan sebagian keunggulan reaktor MSR sebagai reaktor maju. Namun, bukan berarti desain ini bebas dari tantangan. Diantaranya sebagai berikut.

- Degradasi material. Sejumlah besar elemen terlarut dalam garam dan kontak langsung dengan material pengungkung, dimungkinkan akan terjadinya korosi akibat reaksi fluorida dengan metal dan persoalan sejenis. Logam mulia pada dasarnya akan menyepuh pada permukaan logam yang dingin. Pada reaktor daya, elemen penukar panas menjadi bagian logam paling dingin, sehingga permukaan penukar panas ini perlu diganti secara periodik.[9] Di sisi lain, alloy berbasis Nikel dan Besi rentan terhadap perapuhan karena fluks neutron tinggi.[15]

Beberapa material konstruksi yang secara potensial cocok telah didemonstrasikan di laboraturium. Namun, tes jangka panjang dengan iradiasi dibutuhkan sebelum material itu benar-benar cukup bisa dipercaya untuk digunakan. Material-material yang ada saat ini bisa digunakan untuk suhu mencapai 750 0C. Untuk suhu yang lebih tinggi, seperti misalnya untuk produksi Hidrogen melalui radiolisis, mungkin butuh material baru.[10]

- Perlu perawatan jarak jauh. Reaktor perlu dilakukan perawatan periodik, tapi semua peralatan memiliki radioaktivitas yang tinggi. Perawatan jarak jauh akan diperlukan, dan ini mahal. Beberapa produk fisi mudah untuk dibuang, seperti Xe dan Kr, serta sepuhan logam mulia. Namun, untuk fisi produk yang lebih berat, seperti Aktinida, perlu proses pemisahan yang lebih kompleks, misalnya proses reduksi Bismuth cair, volatilisasi, atau *electroplating*.[9]

- Kompleksitas kimiawi. Dalam kaitannya dengan bahan bakar, sifat termodinamik dari seluruh fase pada sistem multi komponen seperti garam bahan bakar harus dinilai demi mengumpulkan data baru yang penting untuk pengembangan MSR, skema reprosesing, dan kode simulasi. Perilaku fisis dan kimiawi dari garam bahan bakar dan, secara khusus, kopel antara aspek neutronik, termal hidrolik dan kimia perlu diinvestigasi lebih lanjut.[9]

- Keselamatan. MSR memiliki operasi yang fleksibel, tapi memiliki pendekatan keselamatan yang beda dengan reaktor berbahan bakar padat. Pada dasarnya, sistem MSR memang sudah memiliki sifat keselamatan melekat (*inherent safe*), dan bahkan *full-passive safety system* pada desain PCMSR. Namun, riset lebih lanjut untuk penyempurnaan tentu masih diperlukan.

**KESIMPULAN**

Konsep MSR menawarkan fitur-fitur unik seperti efisiensi dan stabilitas termal tinggi, fleksibilitas spektrum neutron, *inherent safe*, tekanan operasi rendah, dan beberapa aspek lain. Fitur-fitur itu sangat mendukung untuk operasi reaktor yang murah dan memiliki sistem keselamatan yang lebih baik, sebagai pemenuhan syarat untuk reaktor generasi IV.

Keunggulan MSR lain diantaranya penggunaan siklus Thorium dengan kemampuan pembiakan (yang berdampak pada sustainabilitas yang tinggi) dan pembakaran Aktinida, serta tidak memerlukan fabrikasi bahan bakar (karena penggunaan garam lebur). Pada aspek keselamatan, koefisien reaktivitas negatif pada void dan umpan balik bahan bakar menawarkan keselamatan yang lebih baik dibanding jenis reaktor lain. Termasuk penggunaan bahan bakar cair yang menghindarkan terjadinya *steam explosion*. Untuk desain PCMSR, ditawarkan pula *Full-Passive Safety System* dengan desainnya.

Pengoperasian MSR terbilang fleksibel. Selain bisa digunakan untuk menghasilkan daya dengan efisien, yang bisa digunakan untuk PLTN dengan lebih baik, suhu operasi yang tinggi memungkinkan pemanfaatan termal pada berbagai spektrum kalor, seperti produksi hidrogen dan gasifikasi batubara pada suhu tinggi dan desalinasi pada suhu lebih rendah. Hal ini sangat menunjang bagi reaktor generasi IV yang diharapkan mampu diutilisasi untuk banyak keperluan, termasuk keperluan industri.

Untuk pengembangan MSR supaya benar-benar siap diproduksi secara komersil, tentu butuh riset dan pengumpulan data lebih lanjut berkenaan dengan keseluruhan bagian reaktor, termasuk risiko terjadinya korosi pada material reaktor dan perawatan. Namun demikian, jika tantangan-tantangan tersebut mampu diatasi, maka reaktor MSR, dengan berbagai keunikan dan keunggulan yang ditawarkannya, bisa dikatakan memiliki prospek yang sangat cerah untuk digunakan di masa depan.

**DAFTAR PUSTAKA**

[1] HARTO, A.W., KUSNANTO, 2013. *Advanced Reactor Technology*. Program Studi Teknik Nuklir Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

[2] http://www.nuclearpowerdaily.com/reports/

How\_Much\_Longer\_Will\_World\_Reserves\_Of\_The\_Nuclear\_Fuel\_Uranium\_Last\_999.html, diakses 1 April 2014

[3] http://nuclearinfo.net/Nuclearpower/Web

HomeAvailabilityOfUsableUranium, diakses 1 April 2014

[4] HARTO, A.W., 2007. *Desain Reaktor Nuklir Maju Bersuhu Tinggi Tipe PCMSR Dengan Sifat Selamat Melekat (Inherent Safe)*. Prosiding Seminar Nasional ke-13 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Jakarta.

[5] SERP, J., et al., 2014. *The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspectives*. Progress in Nuclear Energy xxx (2014) 1–12.

[6] MACPHERSON, H.G., 1958. *Molten Salt Reactors*. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.

[7] FORSBERG, C.W., et al., 2004. *An Advanced Molten Salt Reactor Using High-Temperature Reactor Technology*. 2004 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. Embedded Topical: 2004 American Nuclear Society Annual Meeting American Nuclear Society, Pittsburgh, Pennsylvania. June 13–17, 2004.

[8] HARTO, A.W., 2014. *Passive Compact Molten Salt Reactor – General Overview*. Program Studi Teknik Nuklir Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.

[9] http://www.whatisnuclear.com/reactors/msr.html, diakses 21 Oktober 2014

[10] FORSBERG, C.W., 2002. *Molten Salt Reactors (MSRs).* The Americas Nuclear Energy Symposium (ANES 2002), American Nuclear Society Miami, Florida. October 16–18, 2002

[11] LEBLANC, D., 2009. *Molten Salt Reactors: A new beginning of an old idea.* Nuclear Engineering and Design 240 (2010) 1644–1656.

[12] ELSHEIKH, B. M., 2013. *Safety assessment of molten salt reactors in comparison with light water reactors.* Journal of radiation research and applied sciences 6 (2013) 63-70.

[13] KREPEL, J., et al., 2013*. Fuel cycle advantages and dynamics features of liquid fueled MSR*. Annals of Nuclear Energy 64 (2014) 380–397.

[14] HARTO, A.W., 2013. *Konsep Keselamatan Pasif Secara Total Pada Desain PCMSR*. Prosiding Seminar Nasional ke-19 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta.

[15] ENGEL, J.R., et al., 1980. *Conceptual design characteristics of a denatured molten-salt reactor with once-through fueling*. ORNL/TM-7207. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee.