

Prospek Desain Reaktor Berbahan Bakar Cair Molten Salt Reactor

Tjipta Suhaemi

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA, Jakarta.
Jl. Tanah Merdeka no.6 Pasar Rebo Jakarta Timur
Telp. +62-21-87782739, Fax. +62-21-87782739

Abstrak – Konsep desain reaktor Generasi IV adalah hasil dari upaya riset teknologi reaktor dan energi nuklir yang melibatkan 10 negara maju dalam Forum Internasional Generasi IV (GIF). Ada beberapa konsep desain reaktor kandidat yang potensial untuk diimplementasikan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia di masa mendatang. Salah satu dari reaktor Generasi IV adalah reaktor MSR (Molten Salt Reactor). Makalah ini membahas studi dan observasi awal desain reaktor MSR dengan melakukan tinjauan komprehensif terhadap deskripsi dan karakteristik desain bahan bakar, tipe pendingin, aspek keselamatan. 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. Reaktor MSR mempunyai keunggulan, antara lain koefisien reaktivitas negatif pada void dan penggunaan bahan bakar cair yang menghindarkan terjadinya steam explosion. Untuk pengembangan MSR supaya benar-benar siap diproduksi secara komersil, tentu butuh riset dan pengumpulan data lebih lanjut berkenaan dengan keseluruhan bagian reaktor, termasuk mengatasi risiko terjadinya korosi pada material reaktor dan perawatan. Dengan berbagai keunikan dan keunggulan yang ditawarkannya, bisa dikatakan MSR memiliki prospek yang sangat cerah untuk digunakan di masa depan.

Kata kunci: Molten Salt Reactor, Aspek Keselamatan, Generasi IV

1 Pendahuluan

Kebutuhan energi dunia tiap tahun makin meningkat, sementara sumber energi utama yang digunakan saat ini, yaitu batubara dan minyak bumi, jumlahnya terbatas dan bisa habis dalam waktu yang tidak terlalu lama. Rentang ketersediaan akumulatif minyak bumi yang sudah terbukti diperkirakan hanya cukup sampai 40-an 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. Adapun cadangan gas alam terbukti di seluruh dunia pada tahun 2006 sebesar 179,83 trilyun meter kubik, dengan estimasi bisa bertahan selama 65 tahun.

Hal ini meniscayakan perlunya mencari sumber energi alternatif untuk memenuhi kebutuhan energy dunia yang terus meningkat. Energi nuklir menjadi salah satu opsi energi alternatif yang sangat strategis dan memainkan peranan penting dalam pemenuhan kebutuhan energi dunia masa depan. Penggunaan energi nuklir telah terbukti menghasilkan daya secara lebih efisien dan memiliki potensi yang sangat menjanjikan. Potensi tersebut antara

lain adalah adanya faktor keselamatan melekat (inherent safety) dan kompatibilitas menghasilkan energi yang kompetitif.

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. Diperkirakan cadangan uranium yang ada diperkirakan bisa bertahan untuk 200 tahun ke depan dengan kemungkinan tambahan 500 tahun apabila cadangan uranium yang belum tereksplorasi bisa didapatkan.

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.

Desain-desain reaktor maju tersebut adalah sistem energi nuklir generasi ke empat yang dikenal dengan sebutan reaktor Generasi IV. Reaktor Generasi IV merupakan hasil upaya riset teknologi reaktor dan energi nuklir yang melibatkan negara maju dalam Forum Internasional Generasi IV (GIF, Generation IV International Forum). Forum ini meletakkan basis untuk pengembangan sistem energi nuklir masa depan. Hal ini merupakan sebuah tantangan karena secara khusus, reaktor-reaktor tersebut harus memenuhi standar tinggi dalam keselamatan nuklir, manajemen limbah dan resistansi proliferasi. Reaktor Generasi IV harus mendapatkan lisensi untuk dikonstruksi dan dioperasikan dalam proses biaya-efektif agar supaya kompetitif dengan sumber energi lain. Akhir Desember 2002 GIF telah melakukan review berbagai konsep reaktor dan akhirnya memutuskan enam konsep desain reaktor kandidat yang potensial dan layak diimplementasikan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia di masa mendatang, yaitu: 1. Very High Temperature Reactor (VHTR), 2. Super-Critical-Water-cooled Reactor (SCWR), 3. Molten Salt Reactor (MSR), 4. Gas-cooled Fast Reactor (GFR), 5. Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), dan 6. Lead-cooled Fast Reactor (LFR).

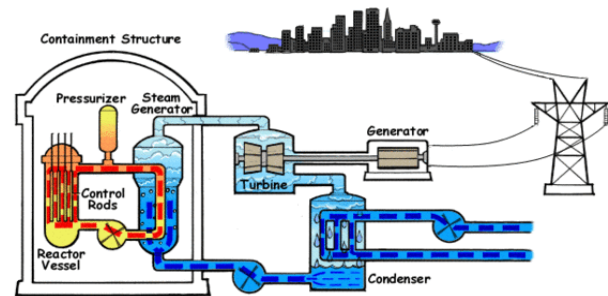
Dalam makalah ini akan dibahas studi dan observasi awal desain reaktor MSR dengan melakukan tinjauan komprehensif terhadap deskripsi dan karakteristik desain bahan bakar, tipe pendingin. Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah dengan melakukan penelusuran pustaka, pengumpulan data sekunder, dan melakukan analisis perbandingan terhadap konsep desain reaktor MSR, khususnya dibandingkan dengan desain PLTN jenis LWR. *Molten Salt Reactor* (MSR) adalah salah satu jenis reaktor generasi IV yang sedang dikembangkan saat ini. Reaktor generasi IV dikembangkan untuk menjawab beberapa tantangan, seperti menipisnya persediaan U-235 yang selama ini menjadi satu-satunya bahan nuklir yang dipakai pada pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), menekan dampak dan probabilitas terjadinya kecelakaan reaktor, meminimalkan limbah nuklir, dan meningkatkan nilai ekonomi dari reaktor. Reaktor yang berkembang sekarang pada dasarnya hanya mampu memanfaatkan U-235. Uranium di alam hanya mengandung 0,71% U-235. Ditambah adanya beberapa kerugian (*losses*) pada proses pengolahan bahan bakar nuklir, sehingga teknologi reaktor sekarang hanya mampu memanfaatkan sekitar 0,6% hingga 0,7% sumber daya nuklir uranium alam. Di sisi lain 99,29% U-238 yang terdapat di uranium alam dan bahan fertil lainnya seperti Th-232 sama sekali belum bisa digunakan dengan teknologi saat ini.

2 Dasar Teori

Sejarah

Bahan bakar yang digunakan pada PLTN di dunia adalah uranium dalam bentuk padat dengan pendingin air atau yang disebut *Light Water Reactor* (LWR) yang memiliki 3 varian yang disebut : *Pressurised Water Reactor* (PWR), *Boiling Water Reactor* (BWR) dan *Super Critical Water*

Reactor (SCWR). PLTN jenis PWR dan BWR adalah pembangkit yang terbanyak di pakai di dunia. Bagan PLTN jenis PWR diperlihatkan pada Gambar 1. Pada mulanya jenis reaktor PWR dikembangkan untuk penggerak kapal selam oleh perusahaan Westinghouse dan laboratorium pemerintah Amerika Serikat (Oak Ridge National laboratory). Nautilus adalah salah satu produk kapal selam bertenaga nuklir jenis PWR yang beroperasi dari tahun 1954 sampai tahun 1980. Berbekal keberhasilan membuat reaktor untuk kapal selam, kemudian perusahaan Westinghouse membangun PLTN komersial. PWR adalah jenis reaktor daya yang paling banyak digunakan di dunia dewasa ini.



Gambar 1. Desain PLTN jenis Pressurized Water Reactor

Sejak awal penelitian nuklir selalu di danai oleh militer, sejak Manhattan Project yang menciptakan bom atom Hiroshima-Nagasaki. Kebutuhan untuk menciptakan bom nuklir yang lebih dahsyat dan unsur terpenting memerlukan plutonium yang tidak di dapat di alam hanya bisa diperoleh melalui proses fisi nuklir. Banyak yang menduga bahwa sesungguhnya reaktor LWR hanyalah sebuah pabrik plutonium terselubung. Sebagai contoh 1000 MW reaktor PWR menghasilkan sekitar 230 kg/tahun plutonium yang cukup untuk membuat 30 bom atom skala Hiroshima. Sementara dengan thorium masalah ini sama sekali tidak ada, artinya Thorium sangat sulit di jadikan senjata atom atau yang disebut anti proliferasi.

Sejak saat itu berkakhirlah pamor Thorium/MSR sampai tidak pernah lagi ada pembahasan MSR dalam dunia fisika nuklir, bahkan sampai sekarang MSR tidak pernah di ajarkan di Fakultas Teknik Nuklir di dunia. sampai kejadian setelah Fukushima pada tahun 2011 para ahli nuklir mulai mengkaji ulang desain reaktor pendingin air dan berbahan bakar padat. Pemikiran untuk memakai bahan bakar cair mulai muncul kembali dan tentunya salah satu yang sudah terbukti adalah MSR.

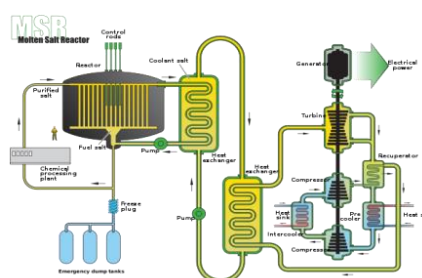
Salah satu anggota Manhattan Project yaitu Dr Alvin Weinberg mengusulkan untuk menggunakan Thorium sebagai bahan bakar reaktor daya sipil (PLTN). Keuntungan penggunaan thorium adalah memiliki efisiensi lebih dari 90% dibanding uranium yang hanya dibawah 3% ditambah reaksi fisi thorium tidak menghasilkan Plutonium sehingga lebih aman. Ternyata hal ini justru yang tidak membuat Thorium menarik bagi pihak militer yang masih membiayai riset nuklir saat itu sehingga penelitian Thorium di hentikan pada tahun 1969.

Pada saat itu, Weinberger telah menciptakan sebuah reaktor khusus sipil dengan tingkat keamanan yang jauh lebih tinggi yang sangat berbeda dengan LWR yang sesungguhnya di ciptakan oleh Weinberg juga tetapi di desain untuk kepentingan Militer khususnya Kapal Selam (USS Nautilus). Reaktor baru ini disebut Molten Salt Reactor (MSR) karena mempergunakan pendingin garam cair dan bahan bakar cair yang sangat cocok untuk thorium dan sebelum akhirnya di tutup telah beroperasi di Oak Ridge National Laboratory selama 20,000 jam tanpa masalah.

Sejak awal dikembangkannya MSR oleh ORNL, terdapat dua jenis reaktor yaitu *single fluid* dan *two fluid*. Namun desain *single fluid* yang akhirnya terus dikembangkan oleh ORNL karena *single fluid* memiliki desain yang lebih sederhana sehingga biaya konstruksinya juga lebih rendah. Desain *two fluid* memang lebih kompleks, namun di sisi lain desain ini memiliki nilai *conversion ratio* yang lebih tinggi daripada *single fluid*.

Fitur Utama MSR

MSR adalah sistem energi nuklir epitermal/termal yang memanfaatkan bahan bakar cair dan digunakan untuk pembakaran aktinida dan produksi listrik, hidrogen dan bahan bakar fisil. Produk fisil, fertil dan fisi dilarutkan ke dalam garam fluorida cair bertemperatur tinggi dengan titik didih yang sangat tinggi (1400°C). Bahan bakar garam cair mengalir melalui teras reaktor yang bermoderator grafit. Dalam reaktor, fisi terjadi di dalam bahan bakar cair yang mengalir dan dipanaskan hingga ~700°C. Bahan bakar kemudian mengalir ke dalam penukar panas utama dan panas ditransfer ke pendingin garam cair sekunder. Desain MSR dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Desain Molten salt Reactor

Pada Molten Salt Reactor terdapat 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 fluorida panas atau garam klorida alih-alih bahan bakar padat yang biasa digunakan pada reaktor pada umumnya. Bahan bakarnya berbasis garam cair UF_4 - BeF_2 - ThF_4 - LiF dan menggunakan moderator grafit. Dengan bahan bakar berbasis U dan Th dimungkinkan 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* (pemiak) yang menggunakan siklus Thorium.

Secara umum, MSR memiliki dua subkelas primer. Pada subkelas pertama, material fisil dilarutkan dalam garam cair. Sementara pada subkelas kedua, garam cair bertindak sebagai pendingin bertekanan rendah untuk teras berbahan bakar *coated particle*. 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.¹

Sistem larutan garam memiliki keuntungan berikut, dalam kaitannya dengan bahan bakar: Koefisien ekspansi termal tinggi yang memberikan koefisien reaktivitas suhu negatif yang tinggi. Ketika dipanaskan, bahan bakar cair ini akan mengembang sehingga menurunkan laju reaksi nuklir dan membuat reaktor beregulasi secara otomatis serta menurunkan daya di teras.

Reaktor dapat dioperasikan pada suhu tinggi dengan tekanan rendah. MSR dapat beroperasi pada temperatur berkisar 700-750 °C dengan tekanan mendekati tekanan atmosfer. Hal ini dikarenakan penggunaan bahan bakar yang memiliki titik didih tinggi serta material yang tahan suhu tinggi. 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. Reaktor MSR bekerja dalam tekanan normal (1 ATM) sehingga tidak membutuhkan struktur pelindung yang berat yang membuat konstruksi MSR jauh lebih murah. Sementara reaktor LWR bekerja pada tekanan 144 ATM atau setara pada kedalaman 1,5 km dibawah laut, ketebalan betonnya saja 1,5 meter. Tekanan yang tinggi dapat menimbulkan ledakan bila terjadi kebocoran atau meltdown seperti pada kasus Fukushima.

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.

Pembuangan produk fisi dapat dilakukan secara kontinu. 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* MSR bisa mencapai kisaran 90 persen.

Pengurangan biaya untuk fabrikasi elemen bahan bakar. Penggunaan bahan bakar garam cair meniscayakan tidak perlunya penggunaan kelongsong bakar dan perangkat bakar. 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.¹

Pada reaktor MSR ini tidak ada *neutron loss*, sehingga MSR 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.¹ Hal ini membantu meningkatkan efisiensi bahan bakar dan sustainabilitas.

Sistem Pendinginan

MSR tidak menggunakan pendingin berupa air sehingga tidak memungkinkan terjadinya *steam explosion*. Dikarenakan 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 cair 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]

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.

Efek kedua berkaitan dengan ekspansi termal bahan bakar. Jika bahan bakar mengalami *overheat*, ia akan mengembang dan terdorong keluar dari zona teras. 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 dipertahankan 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.

Bahan bakar garam cair 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.

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.

Beberapa keunggulan MSR vs LWR

Desain MSR selama lebih dari 50 tahun tidak ada yang melirik tetapi ketika pada tahun 2000 berbagai ahli dan pelaku industri nuklir berkumpul untuk membahas desain reaktor nuklir generasi ke IV dan desain MSR terpilih sebagai salah satu dari 6 reaktor yang di setuju sebagai reaktor generasi ke IV yang handal dan satu-satunya yang sudah terbukti.

Bila reaktor MSR dengan bahan bakar thorium dan garam cair dibandingkan dengan reaktor LWR, maka didapatkan beberapa keunggulan MSR, yaitu :

1. **Limbah lebih sedikit** : MSR mengkonsumsi lebih dari 90% bahan bakar dibanding LWR yang hanya 3% sehingga sisa limbah radioaktif sangat kecil dengan tingkat radioaktif jauh lebih kecil di banding uranium dan plutonium dan limbah tersebut dapat di campur lagi sebagai bahan bakar MSR. Sebagai perbandingan 1000 MW PLTN LWR menghasilkan limbah 35 ton sementara MSR hanya 170 Kg.
2. **Konversi lebih efisien** : Karena MSR bekerja pada tempratur yang cukup tinggi sekitar 700 C dibanding

LWR yang hanya 300 C maka MSR dapat mengkonversi panas menjadi listrik jauh lebih efisien di banding LWR dengan tingkat konversi mendekati 50% bahkan jauh lebih baik daripada batubara dan gas yang membuat tingkat keekonomisan sangat tinggi.

3. **Anti meltdown** : Karena bahan bakar dan pendingin MSR sudah dalam keadaan cair (melt) maka MSR tidak mungkin terjadi meltdown. Reaksi fisi MSR dapat berhenti dalam sekejap (dalam hitungan menit) tanpa adanya decay heat yang berkepanjangan. Tidak seperti LWR bahkan setelah control rod dimasukkan untuk menghentikan reaksi fisi tetapi decay heat pada temperatur 900 C masih tetap berlangsung yang menyebabkan akumulasi gas Hidrogen dapat menyebabkan terjadi meltdown dan ledakan yang meruntuhkan struktur pelindung -- seperti kasus Fukushima.
4. **Keselamatan pasif** : Ketika terjadi hilangnya listrik atau bencana lainnya maka garam cair akan meluncur ke tempat penampungan di bawah tanah secara otomatis tanpa bantuan listrik atau manusia secara gravitasi dan karena tidak adanya pemanasan maka dalam waktu singkat garam cair akan mengeras menjadi kristal sehingga aman. -- hal inilah yang di sebut "passive safety" atau "walk away safety" yang hampir menjadi kriteria utama semua jenis reaktor generasi ke IV, tentunya bagi jenis LWR hal ini sangat sulit di laksanakan dengan mudah, karena prinsip LWR adalah pendingin air, maka untuk melaksanakan fungsinya pompa air harus bekerja.
5. **Modularitas** : Sejak awal prinsip desain MSR dibuat sangat sederhana dengan pemikiran dapat di fabrikasi di pabrik lalu di angkut kelokasi dibanding dibuat di lokasi hampir semua PLTN saat ini yang di bangun di lokasi. -- Hal ini bertujuan membuat biaya yang murah (karena fabrikasi) dan pembangunan yang cepat. Di perkirakan di butuhkan hanya 24 bulan untuk membangun 1000 MW dibanding 5 – 7 tahun untuk LWR. -- Modularity saat ini menjadi bagian dari design philosophy dari Advanced Reactor program yang di biayai oleh AS.
6. **Skalabilitas** : Hal ini juga merupakan prinsip desain MSR sejak awal. Dengan bahan bakar cair dan reaktor yang sederhana membuat MSR dapat di buat sangat kecil atau sangat besar. Bayangkan saat itu saja (1957) Weinberger sudah mendesain reaktor cair ARE (Aircraft Reactor Experiment) dengan daya 2,5 MW untuk propulsi mesin jet bomber yang dapat terbang nonstop selama beberapa bulan tapi sayang program tersebut di batalkan karena alasan politis. -- Saat ini beberapa perusahaan startup Thorium banyak yang mendesain dengan reaktor skala kecil seperti 25 MW, 50 MW dan 250 MW yang di tujukan untuk negara2 berkembang. Hal ini tidak mungkin di lakukan oleh reaktor LWR konvensional. Sangat ideal untuk Indonesia bagian Timur yang konsumsi listrik rendah.
7. **Tidak membutuhkan air** : Hampir semua PLTN memakai pendingin air oleh sebab itu harus dibangun di pinggir laut atau sungai besar. Karena MSR

memakai garam cair bukan air sebagai pendingin maka TMSR tidak harus di bangun di pinggir laut atau sungai karena tidak membutuhkan air dalam jumlah besar, sehingga dapat di posisikan di tengah daratan seperti wilayah Kalimantan Tengah atau di perbatasan Kalimantan.

8. **Load following** : Mungkin salah satu keunggulan MSR yang pastinya akan di sukai oleh PLN adalah *Load Following* karena bahan bakarnya cair maka daya yang di hasilkan dapat di naikan dan di turunkan dalam waktu cepat. Hal ini berguna khususnya pada waktu-waktu beban puncak yang biasanya hanya berlangsung tidak lebih dari 2 jam. Sebagian besar pembangkit listrik PLN adalah *base load* (PLTU dan PLTA) dimana sulit untuk menaikkan dan menurunkan daya dengan cepat sehingga PLN harus memakai pembangkit listrik seperti Genset diesel atau Gas yang biayanya mahal untuk mensuplai daya pada beban puncak -- Artinya MSR memiliki kemampuan *base load* dan *load following* yang tidak di miliki oleh jenis reaktor bahan bakar pada seperti LWR dan HTGR.
9. **Keekonomian tertinggi** : Salah satu keunggulan yang terpenting adalah keekonomian yang tinggi. Karena prinsip modularity, scalability menjadikan MSR sebagai desain reaktor yang paling sederhana dan menjadikan biaya pembangunan murah bahkan lebih murah dari PLTU di perkiraan rata-rata dibawah USD 2,5 Juta per MW bandingkan dengan LWR yang di kisaran 7 – 8 Juta per MW . Di tambah harga thorium juga sangat murah dan efisiensi yang tinggi maka biaya produksi listrik MSR tidak akan lebih dari USD 3 sen/kwh, sementara rata-rata biaya produksi listrik PLN saat ini di apasti tas 10 – 12 sen dan tarif listrik di kisaran 9 sen. *Sistem Keselamatan*

Tantangan Teknologi

Meskipun hal-hal di atas menunjukkan sebagian keunggulan reaktor MSR sebagai reaktor maju, bukan berarti desain ini bebas dari tantangan. Tantangan tersebut di antaranya sebagai berikut :

Kemungkinan terjadinya degradasi material. Sejumlah besar elemen terlarut dalam garam dan kontak langsung dengan material pengungkuh, 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. Di sisi lain, alloy berbasis nikel dan besi rentan terhadap perapuhan karena fluks neutron tinggi.

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 termodinamika dari seluruh fase pada sistem multi komponen seperti garam bahan bakar harus dinilai demi mengumpulkan data baru yang penting untuk pengembangan MSR, skema reprocessing, 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.

3 Simpulan dan Saran

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 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. 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.

Kepustakaan

- [1] Ardisasmita. M.S and M.Bunjamin, "Komputasi dalam Ilmu Pengetahuan dan Teknologi", Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jakarta, 2010.
- [2] Deutsch. J and E. Moniz, "The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study", Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [3] _____, "Report to Nuclear Energy Research Advisory Committee, Washington: Technical Roadmap Report", United States Subcommittee on Generation IV Technology Planning on A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2003.
- [4] Mac Donald. P.E., *et al.*, "Feasibility Study of Supercritical Light Water Cooled Reactors for Electric Power Production: 12-th Quarterly and Final Report", INEEL/EXT04-2530, 2001.
- [5] _____, "Generation IV Nuclear Energy Systems Ten-Year Program Plan", Office of Advanced Nuclear Research, DOE Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Volume 1, March, 2005.
- [6] Scott. I, "Static Fuel Molten Salt Reactors. Simpler, Cheaper and Safer", Moltex Energy, 2015.
- [7] Scott. I., "Past and Planned Molten Salt Work in the UK, Moltex Energy, 2015.