

Analisis Sistem Pendingin Pasif Pasca *Shutdown* Dengan Skenario *Severe Accident* pada *Innovative Molten Salt Reactor (IMSR)*

Barlian¹, Andang Widiharto², Sihana³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Fisika FT UGM

Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹ryan_randyka@yahoo.com

²andang@ugm.ac.id

³sihana@ugm.ac.id

Intisari— Telah dilakukan penelitian terhadap sistem pendingin pasif pasca *shutdown* dengan skenario kecelakaan parah (*severe accident*) pada *Innovative Molten Salt Reactor (IMSR)*. Pada penelitian ini dilakukan simulasi mengenai perpindahan panas ke arah silo bejana reaktor secara konduksi, konveksi bebas, dan radiasi. Simulasi diasumsikan dalam kondisi kecelakaan parah yaitu kegagalan integritas batas pemisah antara garam bahan bakar $7\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ dengan garam pendingin 6LiF-NaF-KF dan tidak berfungsinya semua alat penukar kalor pada sistem pendingin pasif utama. Dalam kondisi seperti ini suhu fluida garam dipertahankan tidak melebihi titik didihnya 1673 K untuk menghindari potensi kecelakaan yang lebih parah. Dengan demikian satusatunya mekanisme pendinginan alternatif hanya ada pada transfer panas ke arah permukaan silo bejana reaktor yang di dalamnya terdapat saluran untuk air mendidih masuk dan menjadi media penukar panas. Hasil simulasi menunjukkan bahwa performa pendinginan dengan transfer panas konduksi, konveksi bebas, dan radiasi ke arah silo bejana reaktor mampu mengantisipasi panas peluruhan setelah reaktor *shutdown*. Suhu maksimum dalam bejana reaktor mencapai puncak sekitar 1390 K setelah satu hari reaktor *shutdown* dan kemudian suhu perlahan turun selama proses pendinginan.

Kata kunci— IMSR, sistem pendingin pasif pasca *shutdown*, kecelakaan parah, transfer panas, simulasi.

I. PENDAHULUAN

Seiring meningkatnya populasi dunia maka standar hidup manusia akan kebutuhan sandang, pangan, dan energi menjadi meningkat pula. Saat ini, sumber daya energi bahan bakar fosil (minyak bumi, batubara, dan gas alam) masih mendominasi pemenuhan kebutuhan energi dunia. Penggunaan bahan bakar fosil dewasa ini diketahui menimbulkan dampak lingkungan yang serius yaitu pemanasan global atmosfer dunia (*global warming*) sebagai konsekuensi dari emisi CO₂. Sementara itu, ketersediaan cadangan bahan bakar fosil diketahui semakin menipis. Kenaikan permintaan terhadap kebutuhan energi yang tidak diimbangi dengan ketersediaan energi akan menimbulkan krisis energi di masa depan.

Untuk itu, perlu dikembangkan sumber energi alternatif yang mampu menggantikan peran sumber daya bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi alternatif yang telah banyak dikembangkan adalah sumber daya energi nuklir dan sumber daya energi terbarukan. Namun, secara aspek teknologi dan aspek ekonomi, sumber daya energi nuklir lebih siap diaplikasikan untuk menggantikan sumber daya energi fosil dalam rangka memenuhi kebutuhan energi manusia secara masif, kontinyu dan murah.

Pada tahun 2002 lalu, *Generation IV International Forum (GIF)* yang terdiri dari sepuluh negara menetapkan enam reaktor generasi IV. Salah satunya adalah *Molten Salt Reactor (MSR)*, yaitu konsep reaktor nuklir lama yang dibangkitkan

kembali oleh Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Amerika Serikat [1].

Sebagai salah satu kandidat reaktor nuklir maju, telah dilakukan berbagai pengembangan dan modifikasi guna mengasah kehandalan MSR sebagai salah satu reaktor yang *sustainable, safe, reliable*. Salah satu modifikasi desain reaktor MSR yang sedang dikembangkan di Indonesia saat ini adalah IMSR (*Innovative Molten Salt Reactor*). Dalam rangka mendukung pengembangan desain reaktor maju ini, masih banyak penelitian yang harus dilakukan terutama dalam hal termalhidrauliknya.

Kecelakaan reaktor nuklir Fukushima Daichii menjadikan pembelajaran baru dan penting pada semua desain keselamatan reaktor nuklir terutama skenario kecelakaan yang dipostulatkan. Sebelumnya, hampir semua desain keselamatan reaktor nuklir berfokus pada skenario yang dipostulasikan yaitu *Design Basis Accidents (DBA)*. Apa yang terjadi pada reaktor nuklir Fukushima bahkan telah melewati skenario kecelakaan *design basis accidents*. Maka, bagi semua desain sistem keselamatan reaktor maju masa kini harus mampu menjawab dan mengantisipasi permasalahan kecelakaan parah (*severe accidents*) diluar kecelakaan yang dipostulasikan dalam *design basis accidents*.

Sistem keselamatan pasif diaplikasikan di dalam desain reaktor IMSR terutama saat mengatasi panas peluruhan produk fisi pasca *shutdown*. Dari penelitian sebelumnya kinerja sirkulasi alam gas helium pada sistem pendingin pasif pasca *shutdown* MSR menunjukkan bahwa pendinginan

membutuhkan tekanan kerja yang cukup tinggi. Maka perlu dilakukan lagi analisis sistem pasif pada *decay heat removal* dengan metode lain bahkan dengan skenario kegagalan yang lebih tinggi lagi yaitu konsekuensi terjadinya pelelehan atau kegagalan integritas teras/penampung bahan bakar dalam bejana reaktor nuklir.

Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui kinerja perpindahan panas konveksi, konduksi dan radiasi ke arah horizontal bejana reaktor dalam usaha pendinginan pasif pasca *shutdown* pada skenario *severe accident*. Diharapkan dari penelitian ini diperoleh hasil yang dapat melengkapi data-data desain *Innovative Molten Salt Reactor (IMSR)* yang sudah ada sebelumnya dan sebagai bahan acuan untuk penelitian yang lebih lanjut, maupun sebagai referensi untuk pengembangan *Innovative Molten Salt Reactor (IMSR)*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Awal Perkembangan Molten Salt Reactor

Permulaan perkembangan MSR dimulai pada tahun 1940-an sebagai bagian dari proyek pesawat bertenaga nuklir untuk militer Amerika Serikat. Proyek ini dimulai sebagai respon terhadap ancaman serangan pertama dari Uni Soviet. Antara tahun 1950 sampai dengan 1956 proyek pengembangan pesawat terbang berbahan bakar nuklir aktif dilaksanakan dan menghasilkan *Aircraft Reactor Experiment (ARE)*. ARE merupakan reaktor nuklir kecil yang mensirkulasikan bahan bakar berupa leburan garam. Salah satu eksperimen yang berkesan adalah penggunaan campuran NaF-ZrF₄-UF₄ (53-41-6 % mol) sebagai bahan bakar, BeO sebagai moderator, dan natrium cair sebagai pendingin sekunder [2]. Selanjutnya pada tahun 1960 pengembangan dilanjutkan ke arah reaktor daya berbahan bakar cair yang melahirkan desain *Molten Salt Reactor Experiment (MSRE)*. MSRE adalah reaktor *converter* yang menggunakan pendingin berupa leburan garam campuran 7LiF-BeF₂ (66-34 % mol), bahan bakar berupa 7LiFBeF₂-ZrF₄-UF₄ (65.0-29.1-5.0-0.9 % mol), dan moderator berupa grafit [3].

B. Konsep Dasar MSR baru

Sistem MSR baru, sebagai kandidat reaktor generasi IV memiliki konsep dengan dasar inspirasi penelitian awal MSR yang telah dibahas sebelumnya. Konsep ini mengaplikasikan campuran garam *fible* (75% mol LiF dan 25% mol BeF₂) dengan bahan bakar berupa campuran fisil-fertil, ²³³UF₄ dan ²³²ThF₄, ke dalam teras reaktor yang tersusun dari blok-blok grafit moderator berbentuk heksagonal dengan saluran tengah untuk aliran garam bahan bakar. Garam bahan bakar dialirkan dari bawah teras ke atas di mana reaksi fisi nuklir menginisiasikan pembangkitan panas pada bahan bakar. Garam bahan bakar kemudian dialirkan ke sebuah alat penukar panas untuk mentransfer panas pada pendingin garam sekunder yang tidak mengandung bahan bakar [4].

Kandidat jenis MSR lainnya adalah tipe reaktor dengan spektrum cepat. *Fast-spectrum molten-salt reactors (FSMSRs)* telah menjadi bahan penelitian sejak periode awal 1960-an. Namun, tidak ada reaktor jenis ini yang pernah

dibangun, dan penelitian tidak berjalan dikarenakan alasan kemampuan *material balance* yang tinggi, perpindahan panas, dan eksplorasi kimianya. Sementara konsep-konsep pokok yang mendasari FS-MSRs tidak berubah selama lebih dari beberapa dekade, namun untuk menyempurnakan desainnya sampai saat ini telah banyak dilakukan pengembangan lebih lanjut [5].

C. Pendingin Pasif Pasca Shutdown Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR)

Analisis terhadap sistem pendinginan pasif pasca *shutdown Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR)* pernah dilakukan sebagai investigasi awal. Hasilnya adalah sistem pendinginan ini aman digunakan dengan daya nominal 1000 MW tekanan minimum yang diperbolehkan 46 bar, dan suhu bahan bakar pada awalnya menurun kemudian naik kembali secara perlahan dan konstan pada suhu tertinggi 1592 K. Namun tekanan *hot box* untuk sistem pendinginan dan ketinggian antara reaktor dengan *heat exchanger* masih cukup tinggi sekitar ≥ 45 bar sehingga diperlukan sistem pendinginan bantu untuk mengambil panas peluruhan ini setelah *shutdown* [6].

D. Konveksi Alamiyah Dalam Pendinginan Reaktor Nuklir

Salah satu reaktor suhu tinggi berpendingin garam yaitu *The Advanced High-Temperature Reactor (AHTR)* memiliki karakteristik yang cukup menarik terutama dari segi pendingin pasif pasca *shutdown*-nya. Konsep dasar reaktor berdaya 2400-MWth ini memiliki *loop primer* yang tertutup dan tenggelam dalam tangki berisi garam. Tangki yang berisi garam ini memiliki keuntungan dalam halantisipasi kecelakaan parah seperti kegagalan struktur teras. Garam yang mengandung penyerap neutron akan membuat bahan bakar subkritis jika terjadi pelelehan teras dan menyebabkan bahan bakar keluar dari batas pengungkungnya [7].

III. DASAR TEORI

A. Penjelasan Umum Modul Reaktor IMSR

Modul reaktor IMSR merupakan satu kesatuan integral yang terdiri dari reaktor nuklir, sistem pengambilan kalor dan sistem pendinginan pasca *shutdown*. Desain modul reactor dibuat sedemikian rupa sehingga bahan bakar selalu dalam kondisi :

- 1) Mendapatkan pengungkungan yang baik.
- 2) Berada dalam lingkungan garam pendingin yang berfungsi sebagai media transfer kalor dan sekaligus *shielding*.
- 3) Mendapatkan pendinginan yang efektif (pengambilan kalor).
- 4) Peluang terjadinya kebocoran sangat kecil.

Modul reaktor IMSR terdiri dari beberapa lapis silo berbahan beton, logam, dan keramik yang merupakan material tahan suhu tinggi. Lapisan pertama pada silo dalam dilapisi dengan bahan grafit komposit yang memiliki konduktivitas tinggi. Bejana sistem reaktor ditempatkan dalam silo tersebut. Ruang antara bejana dan silo diisi dengan gas *inert*. Volume

ruang antara ini dibuat minimal untuk meminimalkan jumlah cairan garam yang tumpah jika terjadi kerusakan pada dinding bejana reaktor.

Volume ruang antara bejana dan silo dibuat cukup sehingga dalam kasus terjadinya gempa atau guncangan, dinding bejana tidak bertumbukan cukup keras dengan dinding silo yang dapat menimbulkan kerusakan baik pada dinding bejana maupun dinding silo. Pengaturan reaktor dalam bejana, dinding bejana, lapisan permukaan dalam silo dan silo beton dirancang untuk memenuhi konsep hambatan ganda (*multiple barrier*) bagi terlepasnya material radioaktif (garam bahan bakar) ke lingkungan. Silo beton dilengkapi dengan sistem saluran untuk pendinginan pasif. Sistem saluran ini terdiri dari *inlet*, *outlet* serta sistem saluran yang memiliki percabangan untuk mendapatkan luas permukaan transfer kalor yang cukup.

Sistem saluran ini berfungsi sebagai sistem pengambilan kalor dari bahan bakar pasca *shutdown* ketika mekanisme pendinginan pasca *shutdown* utama (yang juga pasif) mengalami kerusakan dan tidak berfungsi [8].

B. Kecelakaan Yang Mungkin Terjadi Pada IMSR dan Penanganannya

Kecelakaan yang dipostulasikan dapat terjadi pada IMSR adalah :

- 1) Kecelakaan kehilangan aliran bahan bakar (*Loss of Fuel Flow Accident*, LOFFA).
- 2) Kecelakaan kehilangan aliran pendingin (*Loss of Coolant Flow Accident*, LOCFA).
- 3) Kecelakaan kehilangan pelepas kalor untuk operasi normal (*Loss of Heat Sink Accident*, LHSA).
- 4) Kecelakaan pecahnya pipa pendingin *intermediate* yang menghubungkan sistem reaktor dengan sistem turbin.
- 5) Kecelakaan kehilangan integritas sistem bejana reaktor (*Loss of Vessel Integrity Accident* = LVIA).

Semua kecelakaan ini akan dengan sendirinya membawa IMSR ke kondisi *shutdown* sekalipun jika mekanisme untuk men-*shutdown* reaktor gagal dilakukan. Dengan demikian desain IMSR mengaplikasikan konsep *shutdown* pasif, yaitu jika terjadi gangguan yang mengarah kepada kecelakaan akan dengan sendirinya men-*shutdown* reaktor tanpa adanya mekanisme manual [8].

C. Kerusakan Total Integritas Bejana Sistem Reaktor

Dalam kondisi ini, disamping kerusakan batas pemisah garam bahan bakar, garam pendingin primer dan garam pendingin *intermediate*, kerusakan juga terjadi pada bejana sistem reaktor. Peluang kerusakan semacam ini tentu saja sangat kecil. Garam bahan bakar, garam pendingin primer dan garam pendingin *intermediate* akan saling tercampur. Percampuran ini mengencerkan material radioaktif garam bahan bakar dan sekaligus menyebabkan reaktor *shutdown*. Campuran ketiga fluida ini akan mengisi ruang dalam silo beton. Kalor peluruhan ditransfer secara konduksi melalui

dinding silo beton dan selanjutnya diterima oleh fluida pelepas kalor yang mengalir melalui sistem saluran pendinginan pasif silo beton [8].

D. Teori Panas Peluruhan

Pada dasarnya di setiap reaktor nuklir setelah mengalami *shutdown*, masih memiliki sejumlah panas di dalamnya akibat dari energi yang dihasilkan oleh peluruhan produk fisi, yang biasa dikenal dengan panas peluruhan. Disebut peluruhan dikarenakan daya panas tersebut meluruh bersamaan dengan meluruhnya produk fisi yang ada di dalam reaktor. Produk fisi yang dihasilkan oleh bahan bakar nuklir sangat banyak macamnya sehingga para ilmuwan berusaha mengelompokkan produk fisi tersebut agar lebih mudah untuk dilakukan analisa terhadap panas peluruhan di dalam suatu reaktor. Panas peluruhan dari produk fisi dihitung sebagai berikut [9]:

$$Pt = \frac{Po}{Qf + \sum_{n=1}^{23} \frac{Yn}{\lambda n}} \sum_{n=1}^{23} \frac{Yn}{\lambda n} e^{-\lambda n t} \quad (1)$$

E. Governing Equations

Model matematika yang digunakan untuk menyelesaikan pola aliran fluida pada gaya apung berdasarkan hukum kekekalan massa dan momentum. Model matematika ini didefinisikan sebagai persamaan kontinuiti dan persamaan konservasi momentum. Sedangkan untuk menyelesaikan model transfer kalor menggunakan hukum kekekalan energi atau persamaan konservasi energi. Model *boussinesq* ditambahkan untuk mendapatkan efek konveksi alam pada aliran fluida dengan adanya perbedaan densitas.

Persamaan untuk konservasi massa atau persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai berikut,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2)$$

Konservasi momentum dalam sebuah kerangka acuan inersia (non-akselerasi) ditulis sebagai berikut,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} \quad (3)$$

Ruas kiri menunjukkan laju perubahan momentum. Stress tensor τ didapat dari persamaan berikut,

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (4)$$

Bentuk umum persamaan energi dengan transfer panas konduksi adalah sebagai berikut,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho C_p) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_e \quad (5)$$

Pada kondisi batas terjadi pertukaran kalor secara konveksi oleh air mendidih. Secara umum mekanisme perpindahan panas secara konveksi ini diberikan melalui persamaan berikut,

$$q = hA(T_s - T_f) \quad (6)$$

Untuk transfer panas antar dinding permukaan terjadi secara radiasi. Energi radiasi yang dipancarkan oleh suatu permukaan dengan temperatur T_s per satuan luasan disebut dengan daya emisi dan dinyatakan dengan persamaan Stefan- Boltzman yaitu,

$$E = \epsilon \sigma T_s^4 \quad (7)$$

untuk benda real terdapat faktor emisivitas (ϵ) sedangkan untuk benda hitam (*blackbody*), faktor emisivitas (ϵ) = 1.

F. Fenomena Fisis Konveksi Alamiah

Mekanisme pendorong di balik fenomena konveksi alami adalah gaya apung (*buoyancy*). Dalam kasus ini, gaya apung dikaitkan dengan gravitasi. Panas dipindahkan dari dinding yang memiliki suhu lebih tinggi ke partikel udara yang berdekatan mengakibatkan penurunan kerapatan udara dekat dinding. Udara dengan kerapatan yang rendah menjadi naik perlahan ke atas ruang sementara udara yang lebih berat mulai turun ke bawah pada daerah dekat dingin yang memiliki suhu lebih rendah. Akibatnya, terjadi sirkulasi searah jarum jam di dalam area ruang dekat dinding yang memiliki perbedaan densitas fluida akibat adanya perbedaan suhu. Fenomena seperti ini dikenal sebagai pendekatan *Boussinesq*.

Gayut pada bilangan Rayleigh, aliran dalam ruang tertutup dapat dikategorikan sebagai laminar, transisi, atau turbulen. Bilangan Rayleigh adalah perkalian antara bilangan Grashof konveksi bebas dan bilangan Prandtl yang tergantung pada sifat dari fluida kerja, diferensial suhu antara vertikal dinding dan panjang ruang.

IV. PELAKSANAAN PENELITIAN

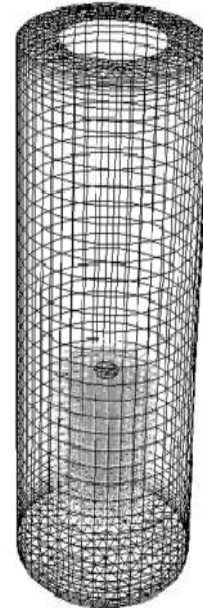
A. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

- 1) Sebuah PC Merk Acer model Aspire 4530 dengan spesifikasi: *Processor* AMD Turion X2 dual-core RM70, RAM 1.75 GB 2.20 GHz DDR2, Sistem operasi Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3.
- 2) GAMBIT 2.2.30, FLUENT 6.2.16, dan Microsoft Visual C++ 6.0.

B. Tata Laksana Penelitian

Pada dasarnya penelitian ini dibagi menjadi tiga tahapan utama. Pertama dilakukan pengumpulan data-data sekunder dan informasi terkait desain IMSR, kedua dilakukan pemodelan desain bejana reaktor IMSR menggunakan program GAMBIT, dan yang ketiga adalah dilakukan simulasi menggunakan analisis CFD menggunakan program FLUENT. Sistem bejana reaktor dimodelkan secara 3D dengan jenis *grid tetrahedron, pyramid, hexahedron, dan prism*



Gambar 1. *Grids* pada sistem bejana reaktor.

menggunakan program GAMBIT 2.2.30, yang kemudian dihitung secara numerik menggunakan program FLUENT 6.2.16. Perhitungan menggunakan model *segregated, implisit*, dan *unsteady* pada penyelesaian model *energy, flow* dan *discrete ordinates*. Pada fluida garam digunakan model *boussinesq* untuk memunculkan efek *buoyancy flows*. Kondisi batas pada daerah atas dan bawah bejana dianggap terisolasi sempurna, sedangkan selimut dinding pada silo bejana terdapat pertukaran panas secara konveksi dan pada batas pemisah antar bahan menggunakan model *non-conformal grids*. Panas peluruhan didefinisikan pada *user-defined function (UDF)* untuk *energy source term* fluida garam. *Under-relaxation factor* diatur lebih rendah 0.1 dari *default* agar konvergensi lebih cepat dicapai dan diskretisasi menggunakan model PRESTO! dengan penyelesain *first order upwind*. Iterasi dilakukan dengan ukuran *time step* tidak lebih dari 60 detik untuk menjaga konvergensi perhitungan.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang merupakan hasil simulasi model yang disimplifikasikan terhadap perpindahan panas ke arah silo bejana dalam skenario *severe accident*.

A. Pemodelan Tangki Penguras Bahan Bakar

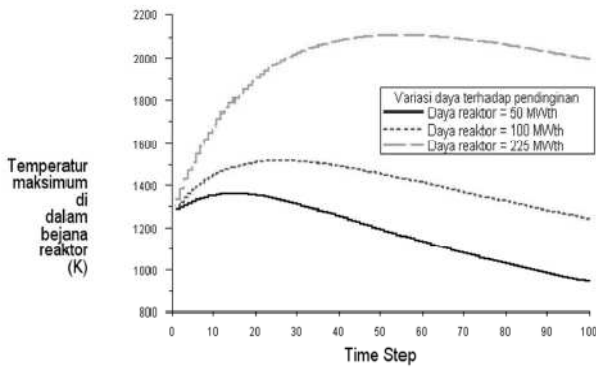
Pemodelan dilakukan pertama kali pada tangki penukar kalor yang masih berisikan bahan bakar dan garam pendingin primer untuk mendapatkan sifat fisis konduktivitas pada semua bahan pada tangki tersebut. Dengan menggunakan *software* FLUENT didapatkan hasil sifat fisis bahan terkait densitas, konduktivitas panas, dan kapasitas panas yang mewakili sifat fisis bahan total yang dianggap *uniform* pada tangki penukar kalor utama, seperti yang terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil data *properties* bahan dalam tangki penukar kalor.

Bahan	Tangki Penukar Kalor Utama	Campuran bahan bakar dan garam pendingin dalam tangki
Densitas (kg/m ³)	2140	2452
Viskositas (kg/m-s)	-	0,00165
Konduktivitas panas (W/m-K)	12,175	0,956
Kapasitas panas (J/kg-K)	1582	1532
Koefisien ekspansi termal (K ⁻¹)	-	1,536 x 10 ⁻⁴

B. Pendinginan Dengan Transfer Panas Secara Murni Konduksi ke Arah Silo Bejana

Dengan memvariasikan daya reaktor menunjukkan hasil kemampuan pendinginan secara murni konduksi optimal berada pada daya sekitar 100 MWth. Jika daya reaktor pada saat sebelum *shutdown* melebihi 200 MWth akan menyebabkan suhu fluida garam melampaui titik didihnya yaitu 1673 K. Terlihat pada Gambar 2 bahwa semakin tinggi daya reaktor maka semakin lama suhu puncak tercapai. Pada daya 100 MWth suhu puncak tercapai setelah 28 jam dan pada daya 50 MWth suhu mencapai puncak setelah 15 jam yang kemudian suhu perlahan turun sampai mencapai suhu yang sangat rendah.

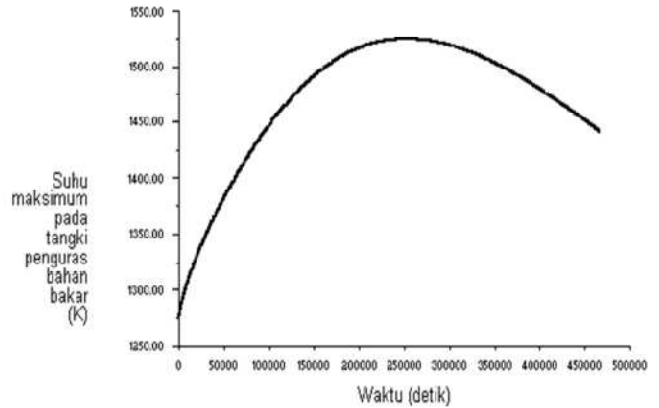


Gambar 2. Grafik perubahan suhu maksimum bahan bakar fungsi waktu dengan proses transfer panas murni konduksi pada berbagai tingkat daya reaktor.

C. Pendinginan Dengan Transfer Panas Secara Konduksi dan Konveksi Alamiyah ke Arah Silo Bejana

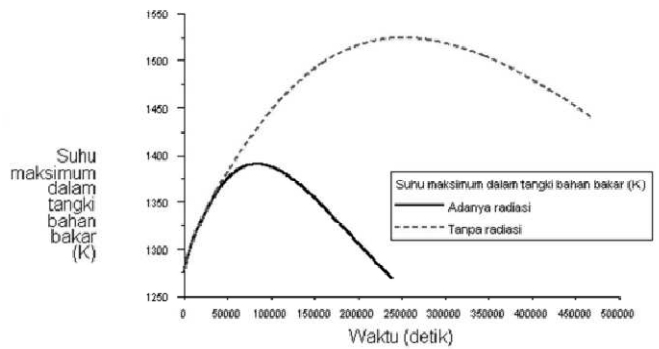
Gambar 3 menunjukkan kinerja transfer panas pada tangki penguras bahan bakar dengan melihat perubahan suhu maksimum selama proses pendinginan. Dari hasil Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa dengan daya operasi reaktor 450 MWth mampu dilakukan pendinginan darurat dengan transfer

panas konduksi dan konveksi ke arah silo bejana tanpa mencapai suhu batas 1673 K. Suhu maksimum mencapai puncak pada suhu 1524 K setelah 3 hari dan selanjutnya suhu perlahan turun sepanjang proses pendinginan.



Gambar 3. Grafik perubahan suhu maksimum pada zona tangki gayut waktu.

D. Pendinginan Dengan Transfer Panas Secara Konduksi, Konveksi Alamiyah, dan Radiasi ke Arah Silo Bejana



Gambar 4. Grafik perubahan suhu maksimum dalam tangki penukar kalor utama dengan dan tanpa adanya transfer panas radiasi.

Suhu maksimum dalam tangki penukar kalor utama ditunjukkan pada Gambar 4 Terlihat bahwa pendinginan dengan adanya radiasi menjadi lebih cepat 2 hari dibandingkan tanpa adanya radiasi. Dalam Gambar 4 menunjukkan pengaruh radiasi melewati fluida garam dalam bejana dan gas argon dalam ruang gap memberikan pendinginan pada suhu puncak sekitar 1400 K setelah 1 hari reaktor *shutdown*.

VI. KESIMPULAN

A. Kesimpulan

- 1) Perpindahan panas konduksi ke arah silo bejana dalam pendinginan pasif tanpa adanya gerakan fluida dan radiasi menunjukkan performa yang kurang baik. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk pendinginan secara konduksi, daya optimum reaktor

sebelum *shutdown* harus berada pada 100 MWth. Daya optimum ini untuk mengantisipasi tidak terjadinya kenaikan suhu melebihi batas suhu didih fluida garam (1673 K) akibat panas sisa peluruhan.

- 2) Dengan adanya pergerakan fluida garam dalam bejana reaktor dapat meningkatkan performa pendinginan sangat baik. Hasil simulasi menunjukkan reaktor dapat didinginkan tanpa melebihi batas suhu didih garam pada daya reactor 450 MWth. Suhu maksimum mencapai puncak pada suhu 1524 K setelah 3 hari dan selanjutnya suhu perlahan turun sepanjang proses pendinginan.
- 3) Dengan adanya pengaruh radiasi dapat mempercepat proses pendinginan fluida garam dari panas sisa peluruhan. Terlihat dari hasil simulasi menunjukkan performa pendinginan hanya membutuhkan 1 hari untuk menurunkan suhu maksimum dalam bejana reaktor dengan suhu puncak dicapai pada 1390 K.

B. Saran

Saran untuk penelitian dimasa yang akan datang adalah pemodelan bejana sistem reaktor dengan perangkat pendinginnya dapat lebih dispesifikkan dengan jumlah *grid* yang lebih besar. Skenario kecelakaan parah dapat disimulasikan dengan lebih detail pada proses keluarnya bahan bakar dari batas pemisah dan mulai bercampur dengan garam pendingin. Proses simulasi ini tentu membutuhkan memori yang cukup besar dalam proses perhitungan, maka perlu digunakan super komputer untuk mensimulasikannya.

REFERENSI

- [1] Department of Energy (DOE) Amerika Serikat, *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System*, DOE Nuclear Energy Advisory Committee and The Generation IV International Forum, U.S., 2002.
- [2] A.P. Fraas and A.W. Savolainen, *Design Report on the Aircraft Reactor Test*, ORNL-2095, Oak Ridge, Tennessee, 1965.
- [3] H.G. MacPherson, *The Molten Salt Reactor Adventure*, Nuclear Science and Engineering, 90:374-380, 1985.
- [4] C.W. Fosberg, *Molten Salt Reactors (MSRs)*, The Americans Nuclear Energy Symposium (ANES 2002) American Nuclear Society Miami, Florida, 2002.
- [5] D. E. Holcomb, G. F. Flanagan, B. W. Patton, J. C. Gehin, R. L. Howard, and T. J. Harrison, *Fast Spectrum Molten Salt Reactor Options*, ORNL/TM-2011/105, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, 2011.
- [6] M.H. Furqon, *Investigasi Awal Sistem Pendinginan Pasif Pasca Shutdown Pada Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR)*, Skripsi, Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2009.
- [7] C.W. Forsberg, *A Modular Radiant-Heat-Initiated Passive Decay-Heat-Removal System For Salt-Cooled Reactors*, Oak Ridge National Laboratory, American Nuclear Society, Boise, Idaho, 2007.
- [8] A.W. Harto, *IMSR General Overview*, Diktat, Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2011.
- [9] A. Agung, *Conceptual Design of A Fluidized Bed Nuclear Reactor : Statics, Dynamics and Safety-related Aspects*, Delft University of Technology, IOS Press, Netherlands, 2007.
- [10] *FLUENT 6.2, User's Guide*, Dokumen teknis, Fluent Incorporated, 2005.
- [11] F.P. Incropera and D.P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer: 4th Edition*, John Willey and Sons, Inc., 1996.
- [12] N.E. Todreas dan M.S. Kazimi, *Nuclear System 1 Thermal Hydraulics Fundamentals*, Hemisphere Publishing Corporation, Massachusetts, 1990.
- [13] R.B. Bird, W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*, Wiley, New York, 1960.