
ANALISIS TRANSIEN PADA PASSIVE COMPACT MOLTEN SALT REACTOR (PCMSR)

M. Makrus Imron, Andang Widi Harto, dan Sihana
Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Jl. Grafika No. 2
Yogyakarta 55281

Diterima editor 22 Maret 2010
Disetujui untuk dipublikasi 27 Mei 2010

ABSTRAK

Penggunaan bahan bakar cair berupa garam $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ pada *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR) menyebabkan pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengendalikan laju aliran bahan bakar dan pendingin. Sedangkan dari sistem keselamatan, penggunaan bahan bakar cair menjadikan PCMSR memiliki karakter keselamatan melekat (*inherent safety*) yang baik. Pada penelitian ini telah dilakukan analisis transien PCMSR pada tiga kondisi, yaitu: ketika terjadi perubahan laju aliran bahan bakar, ketika terjadi perubahan laju aliran pendingin dan ketika terdapat kegagalan pada sistem pelepasan panas (*loss of heat sink*). Penelitian dilakukan dengan memodelkan reaktor pada kondisi tunak menggunakan paket program. *Standart Reactor Analysis Code* (SRAC). Selanjutnya dari keluaran paket program SRAC diperoleh data-data yang meliputi fluks neutron, konstanta grup, konstanta peluran prekursor neutron, fraksi neutron kasip untuk perhitungan transien. Penelitian ini menunjukkan bahwa penurunan laju aliran bahan bakar sebesar 50 % dari laju bahan bakar sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 78 % dari daya sebelumnya. Dan penurunan laju aliran pendingin sebesar 50 % dari laju pendingin sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 63 % dari daya sebelumnya. Sedangkan pada saat terjadi *loss of heat sink* daya PCMSR menunjukkan penurunan.

Kata Kunci: PCMSR, transien, daya, laju aliran.

ABSTRACT

The use of liquid fuels in the form of molten salts $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$ in Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR) makes power control at PCMSR can be done by controlling the flow rate of fuel and coolant. In addition, from safety systems aspect, the use of liquid fuels makes PCMSR has good inherent safety characteristics. In this study transient analysis has been carried out on three conditions of PCMSR, namely when the fuel flow rate is changing, when the coolant flow rate is changing and when there is loss of heat sink condition. This research is conducted with reactor modeling at steady state condition using Standard Reactor Analysis Code (SRAC). Next from SRAC's output, neutron flux, neutron group constant, delayed neutron constant, delayed neutron fraction are obtained for transient calculation. This study showed that the decreasing of fuel flow rate by 50 % from the previous rate of fuel, causing power on PCMSR decreased to 78 % from the previous power. And the decreasing of coolant flow rate by 50 % from the previous rate of fuel, causing power on PCMSR decreased to 63 % from the previous power. Meanwhile, in the event of loss of heat sink showed a decrease of PCMSR's power.

Keywords: PCMSR, transient, power, flow rate.

PENDAHULUAN

Pada akhir tahun 2002 *Generation IV International Forum* (GIF) yang beranggotakan 10 negara telah menetapkan 6 reaktor nuklir generasi ke-4. Satu diantara enam reaktor nuklir yang ditetapkan oleh GIF adalah *Molten Salt Reactor* (MSR) [1]. MSR terlihat lebih unik dibandingkan dengan 5 reaktor generasi ke-4 lainnya, karena menggunakan bahan bakar cair berupa leburan garam.

Diantara reaktor berbahan bakar cair yang telah dikembangkan adalah *Passive Compact Molten Salt Reactor* (PCMSR). Salah satu pengembangan yang dilakukan pada PCMSR adalah penggunaan alat penukar kalor antara yang terintegrasi dengan teras (*compact heat exchanger*) yang terbuat dari bahan grafit [2]. Tujuan penggunaan *compact heat exchanger* untuk mereduksi inventori bahan bakar sekaligus sebagai zona yang dioptimalkan untuk pembiakan. Penempatan alat penukar kalor antara yang terintegrasi dengan teras dapat mengurangi kandungan bahan bakar dalam teras hingga mencapai 60 %, dan mengurangi ukuran alat pendingin hingga 20 % bahkan lebih. Teknologi *compact heat exchanger* telah dikembangkan untuk kebutuhan penambangan minyak lepas pantai [3].

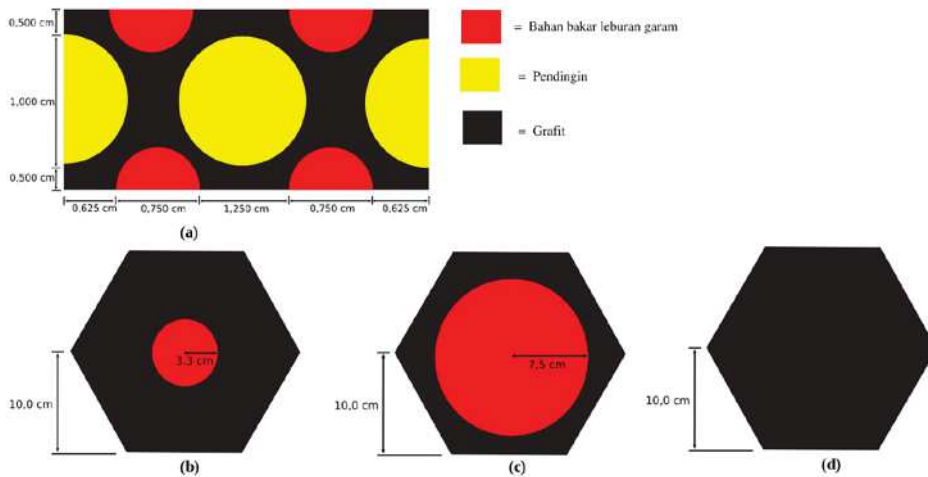
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan laju aliran bahan bakar dan pendingin terhadap perubahan daya reaktor serta perubahan daya reaktor ketika terjadi *loss of heat sink*.

METODOLOGI

Seperti terlihat pada Gambar 1, teras PCMSR tersusun dari blok grafit berbentuk heksagonal, kecuali pada zona alat penukar kalor. Perangkat bahan bakar pada zona teras berupa blok grafit yang berlubang pada bagian tengahnya untuk saluran bahan bakar. Pada zona teras ini reaksi fisi dioptimalkan agar didapatkan faktor multiplikasi efektif di atas satu.

Perangkat bahan bakar pada zona *blanket* memiliki bentuk dan ukuran yang sama dengan perangkat bahan bakar pada zona teras, hanya saja memiliki radius saluran bahan bakar lebih besar agar produksi material fisil pada zona ini besar, atau dengan kata lain memiliki rasio konversi di atas satu.

Sedangkan perangkat untuk reflektor hanya berupa blok grafit utuh yang memiliki ukuran sama dengan perangkat bahan bakar pada zona teras. Zona alat penukar kalor tersusun dari blok grafit berbentuk balok, yang memiliki saluran untuk pendingin dan bahan bakar.



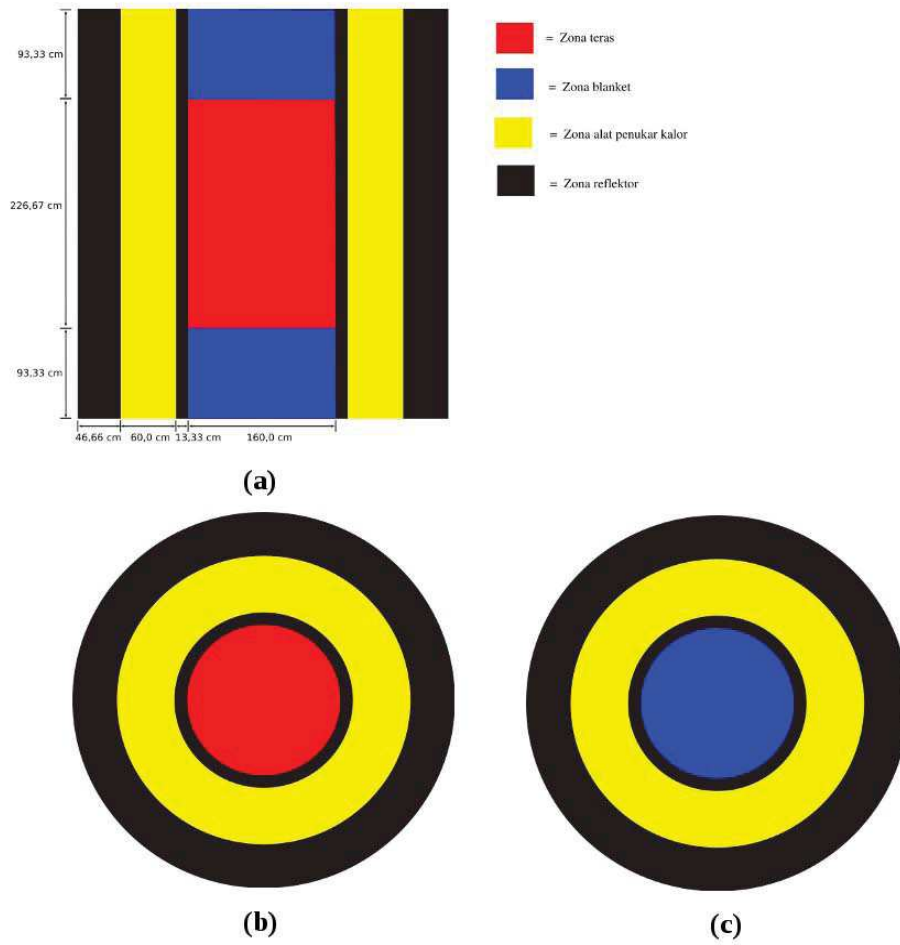
Gambar 1. Perangkat PCMSR. (a) Perangkat alat penukar kalor. (b) Perangkat bahan pada zona teras. (c) Perangkat bahan pada zona blanket. (d) Perangkat Reflektor

Zona alat penukar kalor juga dioptimalkan untuk produksi material fisil sehingga diharapkan PCMSR memiliki rasio konversi di atas satu.

Selanjutnya perangkat bahan bakar, reflektor dan alat penukar kalor disusun sedemikian rupa untuk membentuk beberapa zona, yaitu zona teras, zona blanket, zona reflektor dan zona alat penukar kalor seperti terlihat pada Gambar 2. Bahan bakar leburan garam masuk melalui bagian bawah teras, selanjutnya melewati zona blanket bagian bawah, kemudian melewati zona teras dan mengalami reaksi fisi sehingga menerima kalor, kemudian melewati zona blanket bagian atas dan selanjutnya keluar melalui pipa yang disalurkan ke alat penukar kalor. Dari arah yang berlawanan dengan bahan bakar, pendingin mengalir pada saluran pendingin yang kemudian mengambil sebagian kalor dari bahan bakar sehingga suhu pendingin naik. Selanjutnya pendingin menuju alat penukar kalor berikutnya untuk melepaskan kalor pada gas helium.

Tabel 1. Parameter-parameter PCMSR

Parameter	Nilai
Daya termal	1000 MWth
Efisiensi	50 %
Bahan bakar:	
Komposisi <i>fresh fuel</i>	LiF-BeF ₂ -ThF ₄
LiF	37,5 % mol
BeF ₂	12,5 % mol
ThF ₄	50 % mol
Volume di dalam reaktor	6,01 m ³
Laju aliran	7000 kg/s
Suhu masuk/keluar	1323 K/1423 K
Pendingin:	
Komposisi	LiF-BeF ₂
LiF	75 % mol
BeF ₂	25 % mol
Volume di dalam reaktor	4,14 m ³
Laju aliran	77000 kg/s
Suhu masuk/keluar	1223 K/1277 K



Gambar 2. Susunan dan pembagian zona pada PCMSR. (a) Tampang lintang arah radial. (b) Tampang lintang arah radial pada zona teras. (c) Tampang lintang arah radial pada zona blanket.

TEORI

Pemodelan Netronik PCMSR Pada Kondisi Transien

Pemodelan netronik pada reaktor PCMSR dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan difusi seperti terlihat pada persamaan (1):

$$\begin{aligned} \frac{1}{\nu_g} \frac{\partial \phi}{\partial t} = & -D_g B_g^2 - \left(\Sigma_{a,g} + \sum_{g'=g+1}^G \Sigma_{g \rightarrow g'} \right) \phi_g \\ & + \sum_{g'=1}^{g-1} \Sigma_{g' \rightarrow g} \phi_{g'} + (1 - \beta) \chi_{g,p} \sum_{g'=1}^G \nu_{g'} \Sigma_{f,g'} \zeta_{f,g'} \phi_{g'} \\ & + \chi_{g,D} \sum_{i=1}^I \lambda_{D,i} \overline{C_{D,i}} \end{aligned} \quad (1)$$

Semua besaran persamaan (1) menggunakan notasi standar.

Dengan mengabaikan difusi pada prekursor neutron kasip, persamaan neutron kasip dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{\partial C_{D,i}}{\partial t} = \lambda_{eff,D,i} C_{D,i} + \beta_i \sum_{g=1}^G \nu_g \Sigma_{f,g} \zeta_{f,g} \phi_g \quad (2)$$

dimana λ_{eff} adalah tetapan peluruhan prekursor neutron grup i . Dalam perhitungan PCMSR besarnya tetapan peluruhan menjadi lebih besar karena adanya efek aliran bakar dan ekstraksi produk fisi yang nilainya

$$\lambda_{eff,D,i} = \frac{\dot{m}_{R,F}}{A_{R,F} \rho_F} \eta_{E,D,i} + \lambda_{D,i} \quad (3)$$

dengan $\dot{m}_{R,F}$ adalah laju lairan massa ekstraksi bahan bakar, $A_{R,F}$ tampang lintang saluran aliran bahan bakar, ρ_F densitas bahan bakar dan $\eta_{E,D,i}$ efisiensi ekstraksi bahan bakar.

PCMSR merupakan reaktor yang beroperasi pada spektrum neutron termal, dimana neutron dilahirkan pada spektrum energi cepat selanjutnya dimoderasi dalam waktu yang sangat singkat menjadi neutron termal yang selanjutnya diserap bahan bakar. Hal ini menyebabkan fluks neutron pada spektrum neutron cepat mendekati kondisi tunak (*steady state*). Pendekatan seperti ini dikenal dengan *flux linkage* [4].

Pemodelan netronik PCMSR pada penelitian ini menggunakan tiga grup energi neutron dan menggunakan pendekatan *flux linkage*, sehingga neutron grup 1 dan 2 tidak lagi gayut terhadap waktu. Sehingga besarnya fluks neutron untuk masing-masing grup diperlihatkan oleh persamaan (5).

Dimana ρ adalah reaktivitas (dengan notasi berbeda untuk membedakan dengan densitas) yang nilainya didefinisikan sebagai

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (4)$$

Pemodelan Transfer Energi pada PCMSR

Reaksi fisi yang dialami nuklida bahan bakar akan menghasilkan energi berupa kalor yang selanjutnya ditransfer ke pendingin pada *compact heat exchanger*. Sebagian besar energi fisi tersimpan dalam bahan bakar, hanya 5 % -7.5 % yang tersimpan pada struktur grafit [5]. Transfer kalor ke pendingin dapat melalui konduksi, konveksi dan radiasi. Namun pada penelitian ini, perpindahan panas melalui konduksi dan radiasi diabaikan karena memiliki pengaruh sangat kecil.

Pada PCMSR selain bahan bakar bereaksi fisi di daerah teras dan *blanket*, reaksi fisi juga terjadi pada daerah penukar kalor. Sehingga pemodelan transfer energi dilakukan pada dua daerah, yaitu daerah teras dan *blanket* serta daerah alat penukar kalor [4].

Persamaan energi bahan bakar pada zona teras dan blanket dapat dituliskan sebagai berikut [4]:

$$\mathcal{G}_F \frac{\partial \rho_F C_{P,F} T_{F, rav}(z)}{\partial t} = - \frac{\dot{m}}{N_F A_F} \frac{\partial}{\partial z} C_{P,F} T_{F, rav}(z) - \frac{U_{FM} S_F}{N_F A_F} (T_{F, rav}(z) - T_{M, rav}(z)) + q'''_{F, rav}(z) \quad (5)$$

dengan

\mathcal{G} adalah fraksi volume

N banyaknya saluran,

U koefisien transfer panas,

S perimeter tiap saluran dan z posisi aksial dihitung dari bagian bawah reaktor. Indeks F menunjukkan bahan bakar, M moderator, rav rata-rata arah radial. Sedangkan notasi yang lain menggunakan notasi standar.

Dan persamaan energi moderator pada zona teras dan *blanket* dapat dituliskan sebagai berikut [4]:

$$(1 - \mathcal{G}_F) \frac{\partial \rho_M C_{P,M} T_{M, rav}(z)}{\partial t} = - \frac{U_{FM} S_F}{N_F A_F} (T_{F, rav}(z) - T_{M, rav}(z)) + q'''_{M, rav}(z) \quad (6)$$

Selanjutnya persamaan (6) dan (7) diintegrasikan ke arah aksial sepanjang saluran L (panjang arah aksial) kemudian dijumlahkan.

Pada alat penukar kalor, bahan bakar mengalir pada arah aksial dari atas ke bawah sedang pendingin mengalir pada arah aksial dari bawah ke atas. Karena reaksi fisi juga terjadi pada alat penukar kalor, maka selain terjadi perpindahan kalor dari bahan bakar ke pendingin, pada alat penukar kalor juga terjadi pembangkitan panas.

$$\phi_1 = \frac{(1-\beta)v_1 \sum_{f,1} \zeta_{f,1} \phi_3 + \sum_{i=1}^6 \lambda_{D,i} \bar{C}_{D,i}}{\left[\begin{aligned} &\Sigma_{a,1} (1 - B^2 L_1^2) + \Sigma_{1 \rightarrow 2} + \Sigma_{1 \rightarrow 3} \\ &- (1-\beta) \left(v_1 \sum_{f,1} \zeta_{f,1} + v_2 \sum_{f,2} \zeta_{f,2} \left(\frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2}}{\Sigma_{a,2} (1 - B^2 L_2^2) + \Sigma_{2 \rightarrow 3}} \right) \right) \end{aligned} \right]} \quad (7a)$$

$$\phi_2 = \left(\frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2}}{\Sigma_{a,2} (1 - B^2 L_2^2) + \Sigma_{2 \rightarrow 3}} \right) \phi_3 \quad (7b)$$

$$l_p \frac{d\phi_3}{dt} = \left(\frac{P-\beta}{1-P} \right) \phi_3 + \frac{\sum_{i=1}^6 \lambda_{D,i} \bar{C}_{D,i}}{(1-P)v_3 \sum_{f,3} \zeta_{f,3}} \quad (7c)$$

Persamaan energi bahan bakar pada zona alat penukar kalor dapat dituliskan dengan menggunakan persamaan (8) [4], dimana indeks H menunjukkan bahan bakar pada zona alat penukar kalor dan indeks G struktur grafit pada daerah alat penukar kalor.

$$\begin{aligned} \mathfrak{G}_H \frac{\partial \rho_H C_{P,H} T_{H,rav}(z)}{\partial t} &= - \frac{\dot{m}}{N_H A_H} \frac{\partial}{\partial z} C_{P,H} T_{H,rav}(z) \\ &- \frac{U_{HG} S_H}{N_H A_H} (T_{H,rav}(z) - T_{G,rav}(z)) + q'''_{H,rav}(z) \end{aligned} \quad (8)$$

Persamaan energi struktur grafit pada zona alat penukar kalor dapat dituliskan menggunakan persamaan (9) [4].

$$(1 - \mathfrak{G}_H - \mathfrak{G}_C) \frac{\partial \rho_G C_{P,G} T_{G,rav}(z)}{\partial t} = - \frac{U_{FG} S_F}{N_F A_F} (T_{F,rav}(z) - T_{G,rav}(z)) + q'''_{G,rav}(z) \quad (9)$$

Persamaan energi pendingin pada zona alat penukar kalor dapat dituliskan sebagai berikut menggunakan persamaan (10).

$$\begin{aligned} \mathfrak{G}_C \frac{\partial \rho_C C_{P,C} T_{C,rav}(z)}{\partial t} &= \\ &- \frac{\dot{m}}{N_C A_C} \frac{\partial}{\partial z} C_{P,C} T_{C,rav}(z) \\ &- \frac{U_{GC} S_F}{N_F A_F} (T_{C,rav}(z) - T_{G,rav}(z)) \\ &+ q'''_{C,rav}(z) \end{aligned} \quad (10)$$

Dimana indeks C menunjukkan pendingin.

Selanjutnya persamaan (8), (9) dan (10) diintegrasikan ke arah aksial sepanjang saluran L . Jika diasumsikan suhu rata-rata bahan bakar pada teras dan *blanket* sama dengan suhu rata-rata bahan bakar pada alat penukar kalor, maka didapatkan persamaan diferensial untuk menentukan suhu bahan bakar dan pendingin. Persamaan 11 digunakan untuk menentukan suhu bahan bakar [4]:

$$\Omega L \frac{d}{dt} \bar{T}_{F,rav} = Q_{TOT-NC} - \frac{N_H A_H}{N_C A_C} U_{GC} S_C L (\bar{T}_{F,rav} - \bar{T}_{C,rav}) \quad (11)$$

Dimana nilai Ω ditunjukkan oleh persamaan (12), dan nilai Q_{TOT-NC} ditunjukkan oleh persamaan (13) [4]:

Sedangkan persamaan (14) digunakan untuk menentukan suhu pendingin [4],

$$\Omega = \left(N_F A_F \vartheta_F + N_H A_H \vartheta_H \right) \left(\bar{\rho}_F \bar{C}_{p,F} + T_{F,rav} \left(\bar{\rho}_F \frac{\partial \bar{C}_{p,F}}{\partial T_F} + \bar{C}_{p,F} \frac{\partial \bar{\rho}_F}{\partial T_F} \right) \right) + \left(\begin{array}{l} N_F A_F (1 - \vartheta_F) \\ + N_H A_H (1 - \vartheta_H - \vartheta_C) \end{array} \right) \left(\bar{\rho}_M \bar{C}_{p,M} + T_{F,rav} \left(\bar{\rho}_M \frac{\partial \bar{C}_{p,M}}{\partial T_M} + \bar{C}_{p,M} \frac{\partial \bar{\rho}_M}{\partial T_M} \right) \right) \quad (12)$$

$$Q_{TOT-NC} = N_F A_F (q'''_{F,rav} + q'''_{M,rav}) + N_H A_H (q'''_{H,rav} + q'''_{G,rav}) \quad (13)$$

$$N_C A_C \vartheta_C \left(\bar{\rho}_C \bar{C}_{p,C} + T_{C,rav} \left(\bar{\rho}_C \frac{\partial \bar{C}_{p,C}}{\partial T_C} + \bar{C}_{p,C} \frac{\partial \bar{\rho}_C}{\partial T_C} \right) \right) L \frac{d}{dt} T_{C,rav} = 2 \dot{m}_C (\bar{C}_{p,C,in} T_{C,rav,in} - \bar{C}_{p,C,out} T_{C,rav,out}) + U_{GC} S_H L (T_{F,rav} - T_{C,rav}) + Q_{NC} \quad (14)$$

dengan nilai Q_{NC} adalah [4]:

$$Q_{NC} = N_C A_C q'''_{C,rav} L \quad (15)$$

Koefisien Transfer Panas

Perhitungan koefisien transfer panas pada PCMSR menggunakan korelasi khusus untuk leburan garam yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Cox yang didasarkan pada data eksperimen yang dihasilkan ORNL menggunakan leburan garam MSBR [6].

$$Nu = 0.089 \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) Pr^{0.33} \left(\frac{\mu_{bulk}}{\mu_{surf}} \right) \quad (16)$$

Dimana μ_{bulk} adalah viskositas leburan garam pada suhu rata-rata leburan garam (*bulk temperature*) sedangkan μ_{surf} merupakan viskositas leburan garam pada permukaan grafit. Sebagai pendekatan pada penelitian ini, nilai μ_{bulk}/μ_{surf} dianggap sama dengan 1.

Persamaan Reaktivitas Pada PCMSR

Selama kondisi transien PCMSR, akan timbul banyak perubahan parameter pada reaktor, salah satunya adalah perubahan suhu material reaktor. Perubahan suhu pada PCMSR memberikan pengaruh yang besar terhadap perubahan tampang lintang makroskopis

material sebagai akibat adanya efek dopler. Perubahanampang lintang makroskopis dapat memberikan efek reaktivitas positif atau negatif pada reaktor.

Pada beberapa penelitian sebelumnya [6-8] menunjukkan bahwa campuran bahan bakar flibe dan pendingin flibe memiliki koefisien reaktivitas suhu negatif. Sehingga kenaikan suhu bahan bakar atau pendingin akan menyebabkan daya reaktor turun.

Pada penelitian ini diasumsikan suhu bahan bakar pada zona teras dan blanket serta suhu bahan bakar pada zona alat penukar kalor adalah sama, demikian juga suhu struktur grafit. Sehingga besarnya reaktivitas yang diberikan akibat perubahan suhu ditunjukkan pada persamaan (17).

TATAKERJA

Penelitian diawali dengan memodifikasi masukan SRAC untuk PCMSR pada komposisi bahan bakar setimbang yang telah dibuat oleh Zuyyina [9]. Selanjutnya data-data meliputi fluks neutron, konstanta grup, konstanta peluruhan prekursor neutron, fraksi neutron kasip dan lain-lain diambil dari keluaran yang dihasilkan oleh paket program SRAC untuk digunakan menghitung parameter-parameter PCMSR pada kondisi transien.

Implementasi ke Kode Program

Semua persamaan diferensial simultan pada penelitian ini diselesaikan dengan metode Adaptive Runge-Kutta. Untuk melakukan semua perhitungan penulis memodifikasi kode yang telah ditulis oleh Jaan Kiusalaas[10].

$$\frac{dP_T}{dt} = \frac{\left(\begin{array}{l} (N_F A_F \mathcal{G}_F + N_H A_H \mathcal{G}_H) \alpha_{TF} (\bar{T}_F) \frac{\bar{T}_{F, rav}}{dt} \\ + N_H A_H \xi \mathcal{G}_C \alpha_{TC} (\bar{T}_C) \frac{\bar{T}_{C, rav}}{dt} \\ + (N_F A_F (1 - \mathcal{G}_F) + N_H A_H (1 - \mathcal{G}_H)) \xi \alpha_{TM} (\bar{T}_M) \frac{\bar{T}_{M, rav}}{dt} \end{array} \right)}{N_F A_F (\mathcal{G}_F + (1 - \mathcal{G}_F) \xi) + N_H A_H (\mathcal{G}_H + (1 - \mathcal{G}_H) \xi)} \quad (17)$$

Perhitungan Fluks Neutron

Perhitungan fluks neutron terdiri satu persamaan diferensial yaitu pada perhitungan fluks neutron grup ke-3 (persamaan 7c) dan dua persamaan aljabar biasa pada pada perhitungan fluks neutron grup ke-1 dan ke-2 (persamaan 7a dan 7b). Persamaan differensial diselesaikan dengan menggunakan metode *Adaptive Runge-Kutta* dengan nilai awal fluks neutron pada kondisi setimbang yang diperoleh dari ouput SRAC.

Perhitungan Konsentrasi Prekursor Neutron Kasip

Persamaan neutron kasip untuk enam grup neutron kasip terdiri dari enam persamaan diferensial. Nilai awal $C_{D,i,0}$ dihitung dengan menghilangkan suku transien pada persamaan (2).

Perhitungan Suhu Rata-rata Bahan Bakar dan Pendingin

Suhu rata-rata bahan bakar dihitung menggunakan persamaan (11) dan pendingin dihitung menggunakan persamaan (14) dengan syarat awal diperoleh dari input SRAC.

Persamaan-persamaan tersebut diselesaikan menggunakan metode *Adaptive Runge-Kutta*. Khusus untuk perhitungan suhu pendingin, penulis mengabaikan suku Q_{NC} pada persamaan (14) dengan asumsi fraksi energi termal yang dihasilkan pada pendingin sangat kecil.

Perhitungan Daya Reaktor

Perhitungan daya reaktor PCMSR (Q_{TOT-NC}) dilakukan dengan mengambil data besarnya densitas daya untuk masing-masing zona dibagi besarnya fluks pada zona tersebut dari keluaran SRAC. Selanjutnya daya pada kondisi transien dihitung dengan mengalikan data tersebut dengan besarnya fluks pada kondisi transien.

Perhitungan Reaktivitas Suhu

Perhitungan reaktivitas dilakukan dengan memanfaatkan nilai yang dihasilkan dari perhitungan suhu bahan bakar. Syarat awal untuk perhitungan reaktivitas sama dengan nol. Karena pada kondisi tunak, hampir tidak ada reaktivitas yang diberikan pada reaktor.

Pada penelitian ini, hanya diperhitungkan reaktivitas yang berasal dari bahan bakar. Hal ini dilakukan karena reaktivitas suhu bahan bakar memiliki nilai yang besar dibanding pada pendingin. Selain itu, pada penelitian sebelumnya [9] diketahui bahwa koefisien reaktivitas suhu grafit pad PCMSR memiliki nilai sedikit positif, sehingga dapat diasumsikan koefisien reaktivitas suhu pendingin yang nilainya sedikit negatif dapat mengkompensasi reaktivitas suhu grafit yang memiliki nilai sedikit positif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini akan mempelajari pengaruh laju aliran bahan bakar dan laju aliran pendingin terhadap daya reaktor, sehingga diharapkan pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengatur laju aliran bahan bakar. Penelitian ini juga akan mempelajari kondisi reaktor ketika turbin tidak bekerja secara normal yang menyebabkan transfer kalor pada alat penukar kalor terganggu sehingga suhu masukan pada teras reaktor sama dengan suhu keluarannya.

Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan analisis transien PCMSR pada tiga kondisi, yaitu:

1. Ketika terjadi perubahan laju aliran bahan bakar,
2. Ketika terjadi perubahan laju aliran pendingin, dan
3. Ketika terdapat kegagalan pada sistem pelepasan panas (*loss of heat sink*) akibat gangguan pada turbin.

Pengaruh Laju Aliran Bahan Bakar Terhadap Daya Reaktor

PCMSR beroperasi normal pada daya 1000 MWth dengan laju aliran bahan bakar sebesar 7000 kg/s. Selanjutnya akan disimulasikan pemberian input undak (*step input*) berupa perubahan laju aliran bahan bakar. Laju aliran bahan bakar diturunkan menjadi 50% dari laju aliran bahan bakar sebelumnya pada detik ke-100 kemudian dikembalikan pada laju aliran bahan bakar sebelumnya pada detik ke-800. Gambar 3 menunjukkan suhu rata-rata bahan bakar, suhu rata-rata pendingin, dan daya PCMSR akibat pemberian input undak berupa perubahan laju aliran bahan bakar.

Penurunan laju aliran bahan bakar menyebabkan kenaikan suhu bahan bakar karena berkurangnya bahan bakar pada teras sedangkan kalor yang diberikan sebelumnya relatif lebih besar. Sedangkan penurunan suhu pendingin disebabkan kalor yang diberikan berkurang sedangkan laju aliran pendingin tetap.

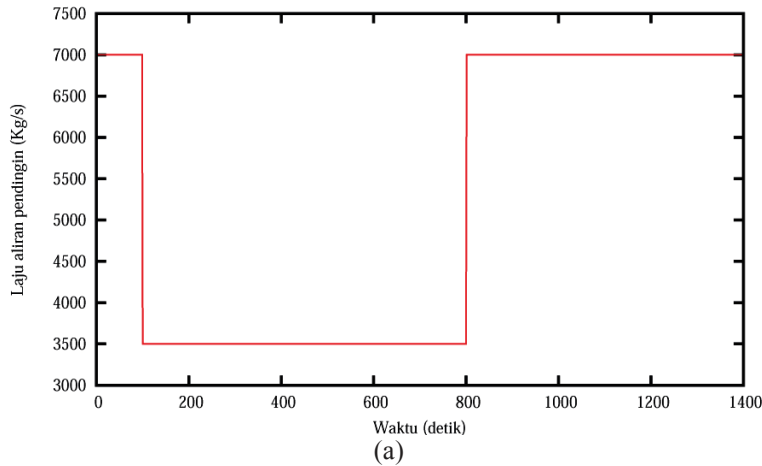
Pada Gambar 3c terdapat adanya *overshoot* yang seharusnya tidak terjadi. Hal ini bisa jadi disebabkan karena perhitungan numerik yang digunakan tidak mampu menangani secara baik perhitungan yang dihadapi [11].

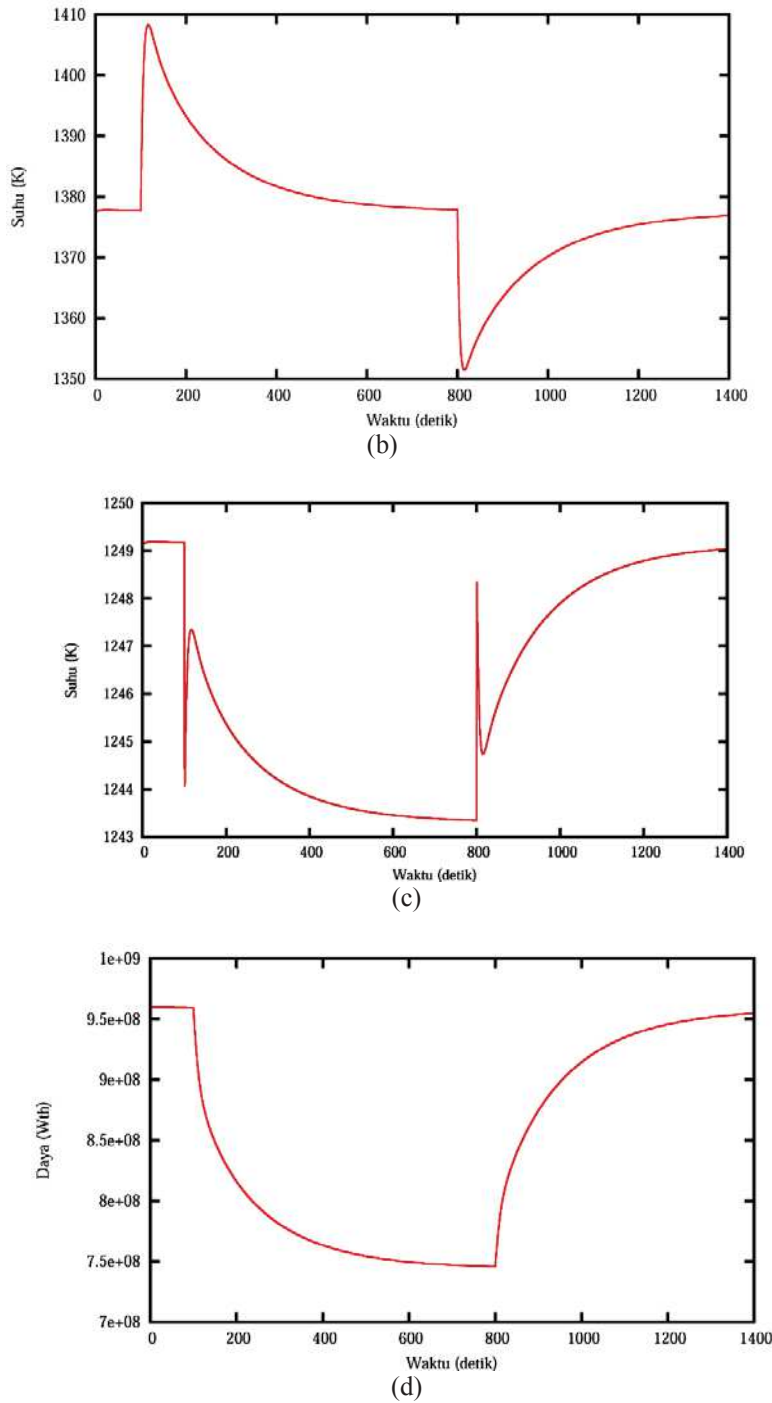
Kenaikan suhu bahan bakar dapat memberikan umpan balik reaktivitas negatif pada PCMSR karena PCMSR memiliki koefisien reaktivitas suhu yang bernilai negatif. Adanya umpan balik reaktivitas negatif akan mengakibatkan daya reaktor turun. Prinsip inilah yang mendasari pengendalian daya pada PCMSR menggunakan laju aliran bahan bakar dan menunjukkan bahwa PCMSR memiliki karakteristik sistem keselamatan melekat (*inherent safety*)

Suhu rata-rata maksimum bahan bakar ketika laju bahan bakar diturunkan adalah sekitar 1409 K, nilai ini tidak melebihi titik pendidihan bahan bakar yaitu sebesar 1673 K. Selain itu, suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin cenderung kembali normal katika terjadi perubahan daya pada PCMSR.

Penurunan laju bahan bakar juga menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 78 % dari daya sebelumnya. Selanjutnya ketika laju aliran bahan bakar kembali normal, maka daya pada PCMSR juga kembali pada daya semula. Ini menunjukkan bahwa daya pada PCMSR dapat dikendalikan dengan mengendalikan laju aliran bahan bakar.

Perlu diperhatikan bahwa pada penelitian ini daya normal pada Gambar 3 tidak persis sebesar 1000 MWth, yaitu sebesar 960 MWth. Hal ini disebabkan karena perbedaan besarnya daya antara perhitungan netronik dengan perhitungan termohidrolik.





Gambar 3. Perubahan parameter PCMSR terhadap perubahan laju aliran bahan bakar. (a) Grafik laju aliran bahan bakar. (b) Grafik suhu rata-rata bahan bakar terhadap waktu. (c) Grafik suhu rata-rata pendingin terhadap waktu. (d) Grafik daya reaktor terhadap waktu terhadap waktu

Pengaruh Laju Aliran Pendingin Terhadap Daya Reaktor

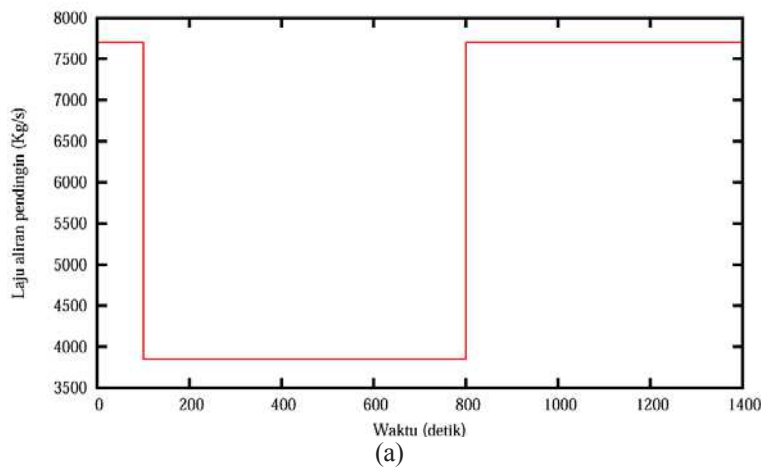
Pada keadaan normal, laju aliran pendingin pada PCMSR sebesar 7700 kg/s. Selanjutnya akan disimulasikan pemberian input undak berupa perubahan laju aliran pendingin. Laju aliran pendingin diturunkan menjadi 50 % dari laju aliran pendingin sebelumnya pada detik ke-100 kemudian dikembalikan pada laju aliran pendingin sebelumnya pada detik ke-800. Gambar 4 menunjukkan suhu rata-rata bahan bakar, suhu rata-rata pendingin, dan daya PCMSR akibat pemberian input undak berupa perubahan laju aliran pendingin.

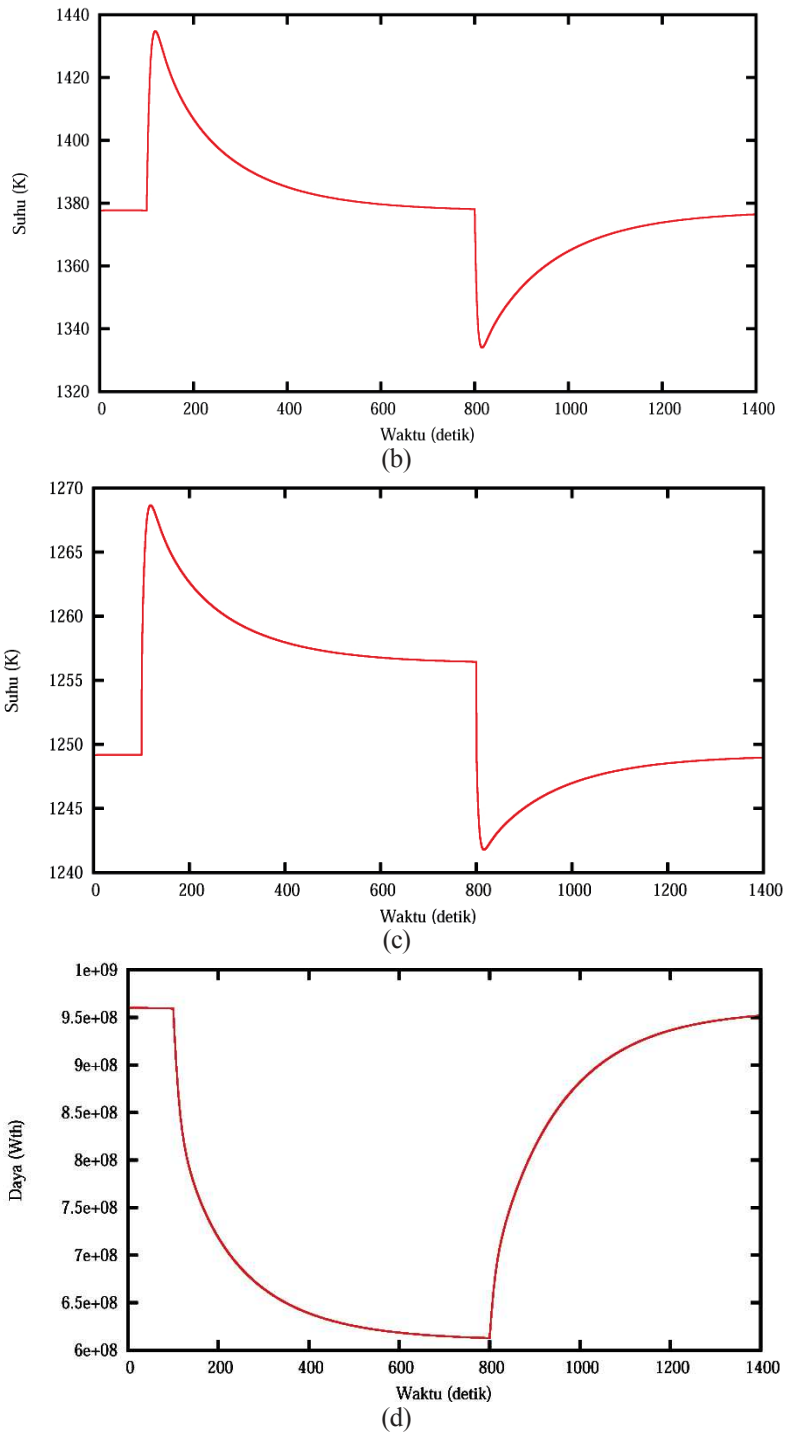
Penurunan laju aliran pendingin pada PCMSR dapat menyebabkan kenaikan suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin. Kenaikan suhu bahan bakar disebabkan jumlah kalor yang ditransfer ke pendingin berkurang sebagai akibat berkurangnya volume pendingin. Sedangkan kenaikan suhu pendingin disebabkan volume pendingin berkurang.

Kenaikan suhu bahan bakar selanjutnya memberikan umpan balik reaktivitas negatif yang menyebabkan penurunan daya PCMSR. Selain itu, umpan balik reaktivitas negatif juga menyebabkan penurunan suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin sehingga suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin kembali normal.

Suhu rata-rata maksimum bahan bakar dan pendingin berturut-turut adalah sekitar 1435 K dan 1268 K. Suhu sebesar ini tidak melebihi batas titik pendidihan bahan bakar dan pendingin. Suhu titik pendidihan untuk pendingin adalah sebesar 1703 K. Penurunan laju pendingin sebesar 50 % dari laju bahan bakar sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 63 % dari daya sebelumnya. Selanjutnya ketika laju aliran bahan bakar kembali normal, maka daya pada PCMSR juga kembali pada daya semula. Hal ini menunjukkan bahwa pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengendalikan laju aliran bahan bakar dan laju aliran pendingin.

Selain itu, dapat diketahui bahwa perubahan laju aliran pendingin dapat menyebabkan perubahan daya yang lebih besar dibandingkan perubahan laju aliran bahan bakar.





Gambar 4. Perubahan parameter PCMSR terhadap perubahan laju aliran pendingin. (a) Grafik laju aliran pendingin. (b) Grafik suhu rata-rata bahan bakar

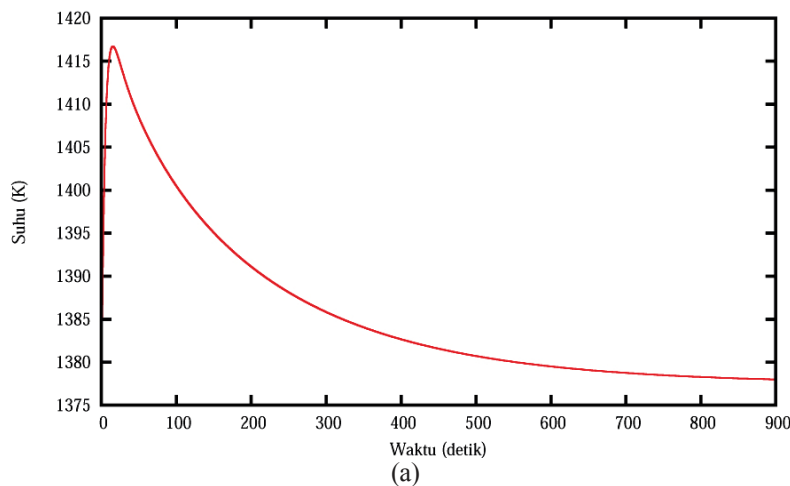
Pengaruh Kegagalan Sistem Pelepasan Panas (*loss of heat sink*) Terhadap Daya Reaktor

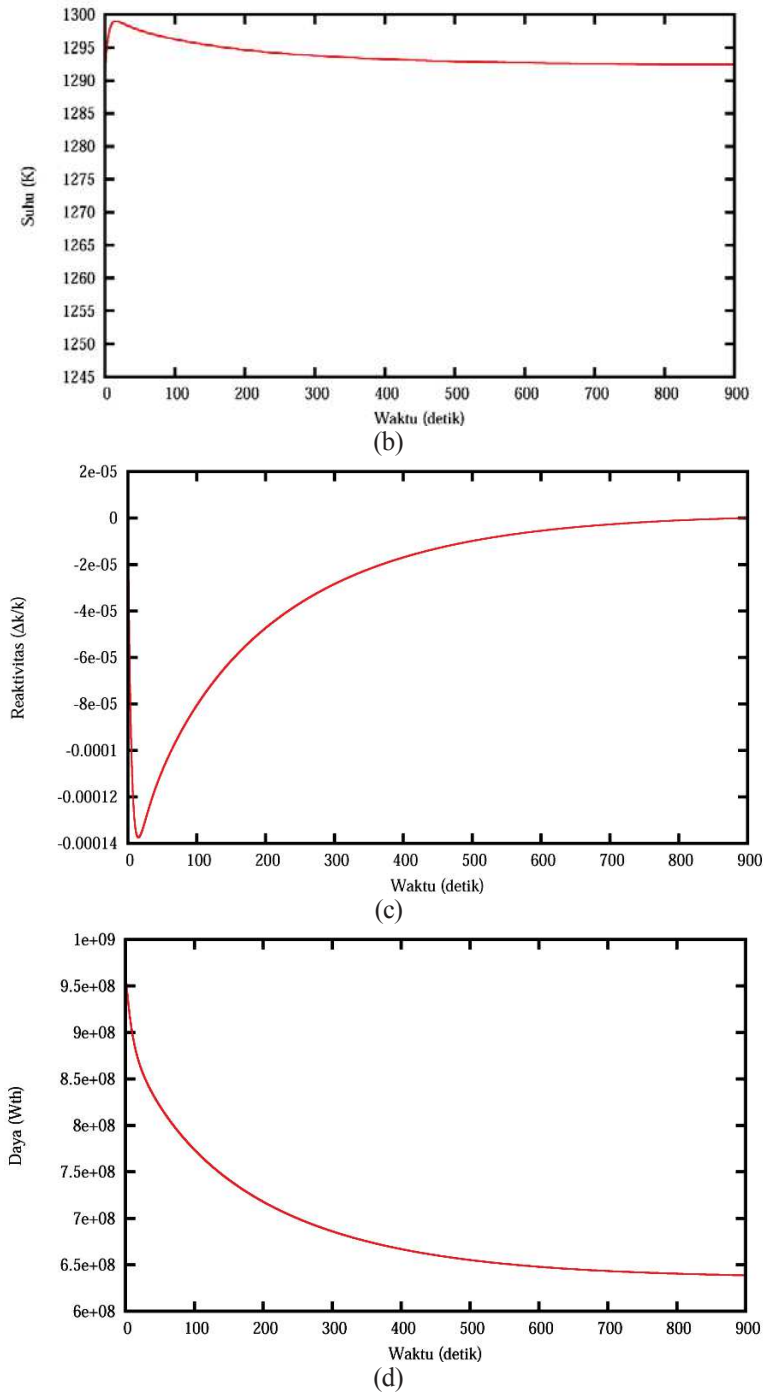
Kegagalan sistem pelepasan panas dapat terjadi ketika turbin tidak bekerja secara normal yang menyebabkan transfer kalor pada alat penukar kalor terganggu. Hal ini menyebabkan suhu masukan bahan bakar pada teras sama dengan suhu keluarannya. Pada penelitian akan disimulasikan reaktor diberikkan masukan undak berupa kenaikan suhu masukan bahan pada teras naik menjadi 1273 K atau sama dengan suhu keluaran bahan bakar dari teras. Gambar 5 menunjukkan suhu rata-rata bahan bakar, suhu rata-rata pendingin, reaktivitas dan daya PCMSR jika terjadi kegagalan sistem pelepasan panas.

Dari sisi keselamatan, diharapkan ketika terjadi kegagalan sistem pelepasan panas maka daya reaktor akan turun sehingga suhu bahan bakar dan pendingin tidak naik melebihi batas yang diizinkan.

Dari Gambar 5 dapat dilihat bahwa ketika suhu masukan bahan bakar naik menyebabkan suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin juga naik. Kenaikan suhu bahan bakar akan memberikan umpan balik reaktivitas negatif pada reaktor sehingga daya akan turun, penurunan daya akan mengakibatkan suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin juga akan turun.

Dari Gambar 5 juga dapat diketahui bahwa respon PCMSR terhadap kenaikan suhu masukan bahan bakar sangat cepat, dan mencapai puncaknya pada detik ke-20 dengan reaktivitas sebesar $-0.000128 \Delta k/k$ sebelum kembali normal pada detik ke-900. Hal ini menunjukkan bahwa PCMSR memiliki karakteristik yang baik ketika terjadi kegagalan sistem pelepasan panas.





Gambar 5. Perubahan parameter PCMSR ketika terjadi loss of heat sink. (a) Grafik suhu rata-rata bahan bakar terhadap waktu. (b) Grafik suhu rata-rata pendingin terhadap waktu. (c) Besarnya reaktivitas yang diberikan (d) Grafik daya reaktor terhadap waktu

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah :

1. Pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengendalikan laju aliran bahan bakar dan pendingin. Dengan demikian, batang kendali pada PCMSR hanya digunakan ketika reaktor akan di *shut down*.
2. Penurunan laju aliran bahan bakar sebesar 50 % dari laju aliran sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 78 % dari daya sebelumnya.
3. Sedangkan penurunan laju aliran pendingin sebesar 50 % dari laju aliran sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi 63 % dari daya sebelumnya. Hal ini menunjukkan pengendalian daya dalam rentang yang besar lebih efisien jika dilakukan dengan mengendalikan laju aliran pendingin.
4. Suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin ketika terjadi manuver daya tidak melebihi batas yang diizinkan, meskipun tidak memiliki margin yang terlalu besar. Namun demikian, PCMSR memiliki respon yang cukup cepat pada kondisi transien, sehingga kondisi dimana suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin pada nilai maksimum hanya berlangsung pada waktu yang singkat [12].
5. Pada kondisi kegagalan sistem pelepasan panas (*loss of heat sink*), PCMSR memiliki karakter keselamatan melekat yang baik. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan daya reaktor pada kondisi tersebut. Suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin ketika terjadi kondisi ini juga tidak melebihi batas yang diizinkan, selain itu PCMSR juga memberikan respon yang cepat ketika terjadi kegagalan sistem pelepasan panas.

DAFTAR PUSTAKA

1. Department of Energy (DOE) Amerika Serikat. A Tecnology Roadmap for Generation IV Nuclear energy System. U.S. DOE Nuclear Energy Advisory Committee dan the Generation IV International Forum. September 2002.
2. Andang Widi Harto. Desain reaktor maju bersuhu tinggi tipe PCMSR dengan sifat keselamatan melekat. Prosiding seminar PLTN. Jakarta; 6 Nopember 2007.
3. Charles W. Forsberg, Per F. Peterson dan HaiHua Zhao. An advanced Molten Salt Reactor using high-temperature reactor technology; 2004. International congress on advances in nuclear power plants. Pittsburgh; 13-17 Juni 2004.
4. Andang Widi Harto. Perhitungan PCMSR termal-nuklir. Jurusan Teknik Fisika Universitas Gadjah Mada; Yogyakarta ;2009.
5. Gert Jan Auwerda. Computational Modeling of a Molten Salt Reactor. Skripsi. TU Delft, Delft; 2007.
6. Dalin Zhang, Suizheng Qiu, Guanghui Su. Development of safety analysis code for Molten Salt Reactor. Nuclear engineering and design, 239:2778-2785; 2009.
7. D.L. Zhang, S.Z. Qiu, G.H. Su, C.L. Liu, dan L.B. Lian. Analysis on the neutron kinetics for a molten salt reactor. Progress in nuclear energy, 51:624-636; 2009.
8. Nobuhide Suzuki dan Yoichiro Shimazu. Preliminary safety analysis on depressurization accident without scram of a Molten Salt Reactor. Journal of Nuclear Science and Technology, 43:720-730; 2006.
9. Zuyyina Bimar'atash Sholikhah. Optimasi geometri teras reaktor nuklir modular tipe passive compact Molten Salt Reactor (PCMSR). Skripsi, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta; 2010.

10. Jaan Kiusalaas. Numerical methods in engineering with python. Cambridge University Press. New York; 2005.
11. Andang Widi Harto. Komunikasi Pribadi; 8 Juli 2010.
12. Andang Widi Harto. Komunikasi Pribadi; 1 Februari 2010.