

ANALISIS PENGENDALIAN DAYA REAKTOR PCMSR DENGAN PENGATURAN LAJU ALIR PENDINGIN

Iqbal Syafin Noha, Andang Widiharto, Sihana
Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Jl. Grafika no. 2, Yogyakarta
Email: andangftn@yahoo.com

Diterima editor 29 Februari 2012
Disetujui untuk publikasi 03 April 2012

ABSTRAK

ANALISIS PENGENDALIAN DAYA REAKTOR PCMSR DENGAN LAJU ALIR PENDINGIN. *Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR)* merupakan pengembangan dari *Molten Salt Reactor (MSR)* yang memiliki karakter berbeda dengan lima reaktor generasi IV lainnya, yaitu menggunakan bahan bakar leburan garam. Pada reaktor MSR, garam lebur tidak digunakan sebagai pendingin tetapi digunakan sebagai medium pembawa bahan bakar. Dengan fase bahan bakar yang berupa garam lebur $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$, maka dapat dilakukan pengendalian daya dengan mengatur laju aliran bahan bakar dan pendingin. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan laju alir pendingin terhadap daya reaktor PCMSR. Analisis dilakukan dengan empat jenis masukan untuk perubahan laju alir pendingin, yaitu masukan *step*, *ramp*, eksponensial, dan *sinusoidal*. Untuk masukan *step*, laju alir pendingin dibuat berubah secara mendadak. Selanjutnya untuk masukan *ramp* dan eksponensial, perubahan laju alir masing-masing dibuat perlahan secara linear dan mengikuti fungsi eksponensial. Kemudian untuk masukan sinusoidal, laju alir berubah naik turun secara periodik dengan memvariasikan frekuensi dari perubahan laju alir tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan laju alir pendingin sebesar 50% dari laju pendingin sebelumnya, menyebabkan daya pada reaktor PCMSR turun sebesar 63% dari daya sebelumnya. Jika terjadi fluktuasi laju aliran pendingin, maka semakin cepat perubahan tersebut, maka respon daya yang diberikan semakin kecil. Pada frekuensi yang sangat cepat, daya reaktor menjadi konstan dan cenderung tidak memiliki respon terhadap laju aliran. Hal ini merupakan salah satu aspek keselamatan reaktor, karena reaktor tidak merespon perubahan yang terlalu cepat. Kemampuan reaktor mengatur daya menyesuaikan laju aliran pendingin merupakan aspek keselamatan lainnya.

Kata kunci : PCMSR, pengendalian daya, laju alir pendingin, uji respon

ABSTRACT

ANALYSIS OF POWER CONTROL OF PCMSR USING COOLANT FLOW. *Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR)* is the development of *Molten Salt Reactor (MSR)* which has different character from other five generation IV reactors, it uses molten salt as fuel. In MSR, the molten salt is not used as coolant but it is used as fuel medium carrier. Due to fuel phase in the form of molten salt of $\text{LiF-BeF}_2\text{-ThF}_4\text{-UF}_4$, then the power control can be done by controlling fuel and coolant flow rate. The goal of this study is to know the effect coolant flow rate change toward PCMSR power. The analysis examined four kinds of coolant flow rate change input, those are *step*, *ramp*, *exponential*, and *sinusoidal* input. For the *step* input, the coolant flow rate was changed suddenly. For the *ramp* input, the flow rate was changed linearly. In the *exponential* input, the flow rate is increased and decayed following exponential function. In the *sinusoidal* input, the flow rate experienced fluctuate change periodically by frequency variation of the flow rate. The result of the study showed that 50% of coolant flow rate decreasing causes 63% of PCMSR power decreasing from the previous power. If a fluctuate change occur in the coolant flow rate, the higher fluctuate change (frequency) of the coolant flow rate, the less power response given. At a very fast frequency, the reactor power becomes constant and tends not to respond the flow rate. The the one of the reactor safety aspect due to the reactor will not response very fast changes. The ability of the reactor to ajust its power follow the coolant flow rate is the other safety aspect

Keywords : PCMSR, power control, coolant flow rate, test response

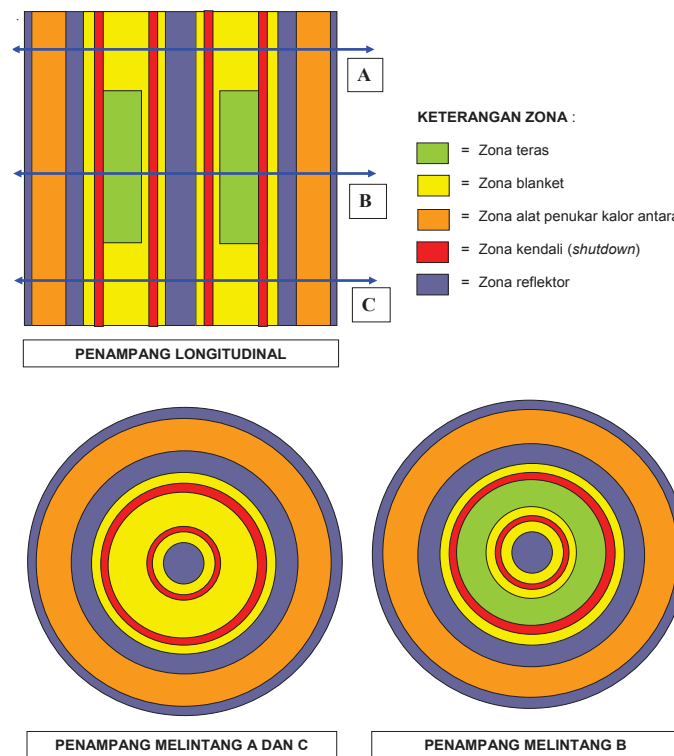
PENDAHULUAN

Pada tahun 2002, *Generation International Forum* (GIF) telah menetapkan enam reaktor nuklir generasi ke-4 yang diharapkan mampu menjawab permasalahan-permasalahan pada reaktor nuklir generasi sekarang [1]. Dari enam reaktor yang telah ditetapkan, *Molten Salt Reactor* (MSR) terlihat berbeda dengan 5 (lima) reaktor generasi ke-4 lainnya karena menggunakan bahan bakar berupa leburan garam yang mana tidak digunakan sebagai pendingin tetapi digunakan sebagai medium pembawa bahan bakar. Dengan fase bahan bakar yang berupa garam lebur, maka pada reaktor MSR dapat dilakukan pengendalian daya dengan mengatur laju alir bahan bakar dan pendingin. Untuk menaikkan daya, terlebih dahulu laju aliran pendingin ditingkatkan. Akibat pertama adalah temperatur reaktor akan turun. Karena reaktor MSR memiliki koefisien umpan balik temperatur yang negatif, maka penurunan temperatur akan memberikan efek reaktivitas positif yang akan meningkatkan daya reaktor. Peningkatan daya akan menaikkan temperatur dan mengurangi efek reaktivitas positif. Demikian seterusnya sehingga dicapai kesetimbangan baru pada tingkat daya yang lebih tinggi. Hal sebaliknya dilakukan untuk menurunkan daya reaktor. Selain itu, dimungkinkan juga dilakukan ekstraksi produk fisi untuk memperbaiki reaktivitas reaktor sekaligus penambahan material fisil secara *on line* jika dibutuhkan.

Pada penelitian ini dilakukan analisis transien reaktor PCMSR (*Passive Compact Molten Salt Reactor*) yang merupakan pengembangan dari reaktor MSR. Skenario kondisi transien yang dipilih dalam penelitian adalah pada kondisi perubahan daya akibat perubahan laju alir bahan bakar serta perubahan daya akibat laju alir pendingin. Pada penelitian ini dimodelkan hubungan perubahan laju alir pendingin terhadap daya berdasarkan 4 (empat) jenis masukan, yaitu *step*, *ramp*, eksponensial, dan *sinusoidal*. Untuk data-data awal, kondisi reaktor dimodelkan secara matematis dengan menggunakan tiga kelompok energi neutron yang dikopel dengan persamaan termohidrolik. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh perubahan laju alir pendingin terhadap daya reaktor PCMSR.

REAKTOR PCMSR

Passive Compact Molten Salt Reactor (PCMSR) merupakan pengembangan dari reaktor MSR. Salah satu pengembangan yang dilakukan pada reaktor PCMSR adalah penggunaan alat penukar kalor antara yang terintegrasi dengan teras (*compact heat exchanger*) yang terbuat dari bahan grafit. Tujuan penggunaan *compact heat exchanger* untuk mereduksi inventori bahan bakar sekaligus mengoptimalkan pembiakan [2].



Gambar 1. Diagram skematik zonasi pada desain reaktor PCMSR [2]

Desain reaktor PCMSR memiliki beberapa keunggulan sehingga sangat sesuai untuk dikembangkan menjadi reaktor nuklir komersial pada masa depan [2]. Keunggulan-keunggulan tersebut di antaranya:

- 1) Penggunaan garam lebur memungkinkan reaktor dioperasikan pada suhu tinggi dengan tekanan rendah.
- 2) Pengoperasian pada tekanan rendah mengeliminasi kemungkinan kecelakaan pelepasan material radioaktif dari teras.
- 3) Perubahan bahan bakar leburan garam menjadi padat pada suhu rendah dapat berfungsi sebagai pengungkung material radioaktif pada saat tidak digunakan di reaktor.
- 4) Penggunaan bahan bakar leburan garam memungkinkan dilakukan proses ulang (*reprocessing*) bahan bakar saat reaktor beroperasi (*online reprocessing*), sehingga mereduksi keperluan untuk memindahkan bahan bakar dari reaktor.
- 5) Penggunaan bahan bakar leburan garam memungkinkan pengaturan komposisi bahan bakar fisil dan fertil secara optimum untuk pembiakan.

Saluran yang terdapat di elemen bahan bakar teras dan *blanket* diisi oleh garam bahan bakar, sedangkan saluran di elemen kendali dibiarkan kosong untuk melewati batang kendali pada saat padam (*shutdown*). Bahan bakar leburan garam masuk melalui bagian bawah teras melewati zona *blanket* bawah, kemudian melewati zona teras aktif dan mengalami reaksi fisi sehingga bahan bakar menerima kalor. Selanjutnya bahan bakar melewati zona *blanket* atas kemudian keluar melalui pipa yang disalurkan ke alat penukar kalor. Dari arah yang berlawanan dengan bahan bakar, pendingin mengalir pada saluran pendingin dari arah bawah yang kemudian mengambil sebagian kalor dari bahan bakar sehingga suhu pendingin naik. Kemudian, pendingin menuju alat penukar kalor untuk melepaskan kalor pada gas helium[3].

MODEL PERHITUNGAN

Aanalisis kondisi transien reaktor MSR terhadap distribusi suhu, fluks dan prekursor neutron kasip telah dilakukan oleh Zhang dkk. [4]. Kondisi transien meliputi injeksi batang kendali, penurunan laju alir bahan bakar, dan penurunan suhu masuk bahan bakar. Beberapa kesimpulan yang diperoleh dari penelitian tersebut adalah:

1. Injeksi batang kendali menyebabkan penurunan yang cukup besar terhadap daya dan fluks neutron namun kecil terhadap konsentrasi prekursor neutron.
2. Sirkulasi bahan bakar menimbulkan pengaruh yang cukup besar terhadap distribusi prekursor neutron kasip, khususnya yang memiliki konstanta peluruhan kecil namun memiliki pengaruh terhadap distribusi fluks neutron.

Penurunan laju alir bahan bakar secara eksponensial menyebabkan penurunan daya yang eksponensial dan memberikan pengaruh besar terhadap konsentrasi dan distribusi prekursor

1. Neutron, khususnya yang memiliki konstanta peluruhan besar.
2. Penurunan suhu masuk bahan bakar memberikan reaktivitas umpan balik negatif kepada reaktor.

Secara umum penelitian tersebut menunjukkan bahwa reaktor MSR memiliki karakteristik yang cukup baik pada kondisi transien, seperti umpan balik suhu negatif yang bernilai besar dan memungkinkan daya dikendalikan dengan mengatur laju alir bahan bakar atau pendingin bukan dengan batang kendali [2]. Berdasarkan riset tersebut, investigasi transien untuk berbagai moda laju alir pendingin perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik transien reaktor PCMSR.

Model Neutronik pada Kondisi Transien

Teori difusi neutron mengasumsikan perilaku neutron seperti gas, yaitu berdifusi dari daerah yang memiliki densitas tinggi menuju ke daerah yang memiliki densitas rendah. Pemodelan kondisi transien reaktor PCMSR pada penelitian ini menggunakan pendekatan kinetika reaktor titik, dengan semua parameter seperti fluks neutron, densitas prekursor neutron kasip, dan parameter yang lain dianggap tidak gayut terhadap ruang. Sehingga persamaan difusi pada reaktor PCMSR dapat dituliskan pada persamaan (1) [4]. Dengan mengabaikan difusi pada prekursor neutron kasip, persamaan neutron kasip dapat dituliskan menjadi persamaan (2) [5].

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \left(\Sigma_{a,g} + \sum_{g'=g+1}^G \Sigma_{g \rightarrow g'} \right) \phi_g + \sum_{g'=1}^{g-1} \Sigma_{g' \rightarrow g} \phi_{g'} + (1 - \beta) \chi_{g,P} \sum_{g'=1}^G \sum_{j=1}^J v_{j,g'} N_j \sigma_{f,j,g'} \zeta_{F,g} \phi_{g'} + \chi_{g,D} \sum_{i=1}^I \lambda_{D,i} C_{D,i} \quad (1)$$

$$\frac{d\bar{C}_{D,i}}{dt} = -\lambda_{eff,D,i} \bar{C}_{D,i} + \sum_{g=1}^G \beta_{i,g} v_g \sum_{f,g} \zeta_{F,g} \Phi_g \quad (2)$$

$$\Phi_1 = \frac{(1 - \beta) \nu_3 \sum_{f,3} \zeta_{F,3} \Phi_3 + \sum_{i=1}^I \lambda_{D,i} \bar{C}_{D,i}}{\left(\Sigma_{a,1} (1 + B^2 L_1^2) + \Sigma_{1 \rightarrow 2} + \Sigma_{1 \rightarrow 3} - (1 - \beta) \left(\nu_1 \sum_{f,1} \zeta_{F,1} + \nu_2 \sum_{f,2} \zeta_{F,2} \left(\frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2}}{\Sigma_{a,2} (1 + B^2 L_2^2) + \Sigma_{2 \rightarrow 3}} \right) \right) \right)} \quad (3)$$

$$\Phi_2 = \left(\frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2}}{\Sigma_{a,2} (1 + B^2 L_2^2) + \Sigma_{2 \rightarrow 3}} \right) \Phi_1 \quad (4)$$

$$l_p \frac{d\Phi_3}{dt} = -\Phi_3 + \frac{1}{\Sigma_{a,3} (1 + B^2 L_3^2)} \left(\Sigma_{1 \rightarrow 3} + \frac{\Sigma_{1 \rightarrow 2} \Sigma_{2 \rightarrow 3}}{\Sigma_{a,2} (1 + B^2 L_2^2) + \Sigma_{2 \rightarrow 3}} \right) \Phi_1 \quad (5)$$

Reaktor PCMSR 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* [5], sehingga neutron pada kelompok 1 dan 2 tidak lagi gayut terhadap waktu. Sehingga besarnya fluks neutron untuk masing-masing kelompok ditunjukkan oleh persamaan (3), (4) dan (5).

Model Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor ke pendingin dapat melalui konduksi, konveksi dan radiasi. Namun pada penelitian ini, perpindahan kalor melalui konduksi dan radiasi diabaikan karena memiliki pengaruh sangat kecil. Reaksi pembelahan yang dialami nuklida bahan bakar akan menghasilkan energi berupa kalor yang selanjutnya dipindahkan ke pendingin pada *compact heat exchanger*. Pemodelan perpindahan kalor dilakukan pada dua daerah, yaitu daerah teras dan *blanket* serta daerah alat penukar kalor [6].

Persamaan energi di bahan bakar pada zona teras dan *blanket* dapat dituliskan seperti pada persamaan (6). Sedangkan persamaan energi di moderator pada zona teras dan *blanket* dapat diekspresikan dengan persamaan (7). Selanjutnya persamaan (6) dan (7) diintegrasikan ke arah aksial sepanjang saluran, L , kemudian dijumlahkan.

Karena reaksi pembelahan juga terjadi pada alat penukar kalor, maka selain terjadi perpindahan kalor dari bahan bakar ke pendingin, pada alat penukar kalor juga terjadi pembangkitan kalor. Pada alat penukar kalor, bahan bakar mengalir pada arah aksial dari atas ke bawah sedang pendingin mengalir pada arah aksial dari bawah ke atas. Persamaan energi di bahan bakar pada zona alat penukar kalor dapat dituliskan pada persamaan (8). Persamaan energi di pendingin pada zona alat penukar kalor dapat dituliskan pada persamaan (9).

$$\mathcal{G}_F \frac{\partial \rho_F c_{pF} T_{F,rav}(z)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k_F \frac{\partial}{\partial z} T_{F,rav}(z) - \frac{m_F}{N_F A_F} \frac{\partial}{\partial z} c_{pF} T_{F,rav}(z) - \frac{U_{F-M} S_F}{N_F A_F} (T_{F,rav}(z) - T_{M,rav}(z)) + q_{F,rav}'''(z) \quad (6)$$

$$(1 - \mathcal{G}_F) \frac{\partial \rho_M c_{pM} T_{M,rav}(z)}{\partial t} = \frac{U_{F-M} S_F}{N_F A_F} (T_{F,rav}(z) - T_{M,rav}(z)) + q_{M,rav}'''(z) \quad (7)$$

$$\mathcal{G}_H \frac{\partial \rho_H c_{pH} T_{H,rav}(z)}{\partial t} = \frac{m_F}{N_H A_H} \frac{\partial}{\partial z} c_{pH} T_{H,rav}(z) - \frac{U_{H-G} S_H}{N_H A_H} (T_{H,rav}(z) - T_{G,rav}(z)) + q_{H,rav}'''(z) \quad (8)$$

$$\mathcal{G}_C \frac{\partial \rho_C c_{pC} T_{C,rav}(z)}{\partial t} = - \frac{m_C}{N_C A_C} \frac{\partial}{\partial z} c_{pC} T_{C,rav}(z) + \frac{U_{G-C} S_H}{N_C A_C} (T_{G,rav}(z) - T_{C,rav}(z)) + q_{C,rav}'''(z) \quad (9)$$

Jika diasumsikan temperatur rerata bahan bakar pada teras dan blanket sama dengan temperatur rerata bahan bakar pada alat penukar kalor, maka diperoleh persamaan diferensial untuk menentukan suhu bahan bakar dan pendingin pada persamaan (10) dan (11).

$$\Omega L \frac{d}{dt} \overline{T_{F,rav}} = Q_{TOT-NC} + \frac{2m_F}{N_F A_F} \left(c_{pF,in} \overline{T_{F,rav,in}} - \overline{c_{pF} T_{F,rav}} \right) - \frac{N_H A_H}{N_C A_C} U_{G-C} S_C L \left(\overline{T_{F,rav}} - \overline{T_{C,rav}} \right) \quad (10)$$

$$\mathcal{G}_C N_C A_C L \left(\overline{\rho_C c_{pC}} + \overline{T_{C,rav}} \left(\overline{\rho_C} \frac{\partial c_{pC}}{\partial T_C} + \overline{c_{pC}} \frac{\partial \rho_C}{\partial T_C} \right) \right) \frac{d \overline{T_{C,rav}}}{dt} = 2 m_C \left(\overline{c_{pC,in} T_{C,rav,in}} - \overline{c_{pC} T_{C,rav}} \right) + \quad (11)$$

$$U_{G-C} S_H \left(\overline{T_{F,rav}} - \overline{T_{C,rav}} \right) + Q_{NC}$$

dengan:

$$\Omega = \left(\begin{array}{l} \left(N_F A_F \vartheta_F + N_H A_H \vartheta_H \right) \left(\overline{\rho_F c_{pF}} + T_{F, \text{rav}} \left(\overline{\rho_F} \frac{\partial \overline{c_{pF}}}{\partial T_F} + \overline{c_{pF}} \frac{\partial \overline{\rho_F}}{\partial T_F} \right) \right) + \\ \left(N_F A_F (1 - \vartheta_F) + N_H A_H (1 - \vartheta_H - \vartheta_C) \right) \left(\overline{\rho_M c_{pM}} + T_{F, \text{rav}} \left(\overline{\rho_M} \frac{\partial \overline{c_{pM}}}{\partial T_F} + \overline{c_{pM}} \frac{\partial \overline{\rho_M}}{\partial T_F} \right) \right) \end{array} \right) \quad (12)$$

$$Q_{\text{TOT-NC}} = \left(N_F A_F (\overline{q_{F, \text{rav}}} + \overline{q_{M, \text{rav}}}) + N_H A_H (\overline{q_{H, \text{rav}}} + \overline{q_{G, \text{rav}}}) \right) L \quad (13)$$

Pendekatan dapat dilakukan dengan menggunakan nilai konstan dari kedua parameter (Ω dan $Q_{\text{TOT-NC}}$) dalam persamaan (12) dan (13).

Koefisien Perpindahan Kalor

Perhitungan koefisien perpindahan kalor di reaktor PCMSR menggunakan korelasi khusus untuk leburan garam yang diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Racula Scarlatt dan Per F. Peterson yang didasarkan pada data eksperimen yang dihasilkan ORNL [7].

$$Nu = 0.015(Re^{0.85} + 138)Pr^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.11} \quad (14)$$

Nilai koefisien perpindahan kalor konveksi kemudian ditentukan dari bilangan Nusselt tersebut dan nilai konduktivitas termalnya.

Persamaan Reaktivitas

Selama kondisi transien, parameter pada reaktor akan banyak mengalami perubahan, salah satunya adalah perubahan temperatur material reaktor. Perubahan temperatur di reaktor PCMSR memberikan pengaruh yang besar terhadap perubahan tampang lintang makroskopis material sebagai akibat adanya efek Doppler. Perubahan tampang lintang makroskopis dapat memberikan efek reaktivitas positif atau negatif pada reaktor.

Persamaan dinamik dari perubahan reaktivitas dapat dijelaskan dengan persamaan (15). Karena bahan bakar pada zona teras dan bahan bakar pada zona alat penukar kalor diasumsikan pada nilai suhu merata yang sama, demikian juga moderator grafit pada zona teras dan *blanket* serta struktur grafit diasumsikan pada nilai suhu merata yang sama.

$$\frac{d\beta_T}{dt} = \frac{\left(\begin{array}{l} (N_F A_F \vartheta_F + N_H A_H \vartheta_H) \alpha_{TF} (\overline{T_F}) \frac{d\overline{T_{F, \text{rav}}}}{dt} + N_H A_H \xi \vartheta_C \alpha_{TC} (\overline{T_C}) \frac{d\overline{T_{C, \text{rav}}}}{dt} \\ + (N_F A_F (1 - \vartheta_F) + N_H A_H (1 - \vartheta_H - \vartheta_C)) \xi \alpha_{TM} (\overline{T_M}) \frac{d\overline{T_{M, \text{rav}}}}{dt} \end{array} \right)}{N_F A_F (\vartheta_F + (1 - \vartheta_F) \xi) + N_H A_H (\vartheta_H + \zeta_F (1 - \vartheta_H))} \quad (15)$$

METODOLOGI

Pengaruh perubahan laju alir masa pendingin terhadap temperatur dan daya reaktor dilakukan untuk empat jenis masukan (*input*) perubahan laju alir yaitu *step*, *ramp*, eksponensial, dan *sinusoidal*. Dari masukan tersebut akan didapat hubungan antara perubahan laju alir masa pendingin dan daya reaktor yang lebih akurat. Perhitungan dilakukan dengan :

1. Perhitungan fluks neutron. Perhitungan fluks neutron dibagi ke dalam tiga kelompok energi. Terdapat dua persamaan aljabar dan satu persamaan differensial. Persamaan aljabar (persamaan (5) dan (4)), digunakan untuk menghitung fluks neutron kelompok ke-1 dan kelompok ke-2

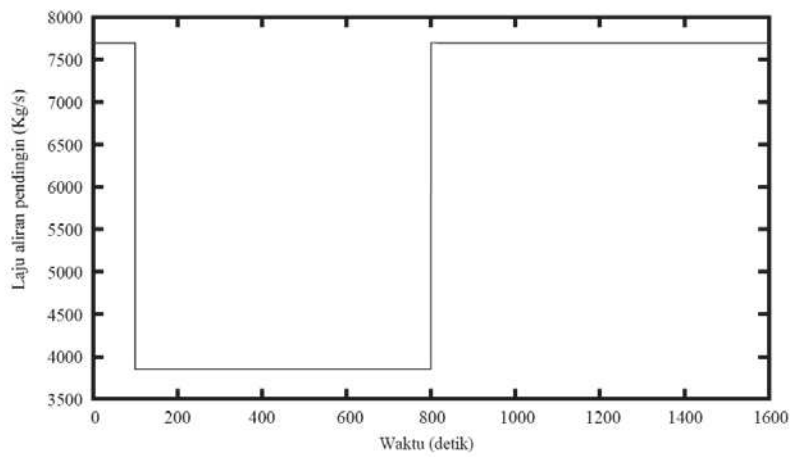
- sedangkan persamaan (3) yaitu persamaan differensial digunakan untuk menghitung fluks neutron kelompok ke-3.
2. Perhitungan prekursor neutron kasip. Persamaan netron kasip untuk enam kelompok netron kasip terdiri dari enam persamaan diferensial. Nilai awal $C_{D,i,0}$ dihitung dengan menghilangkan suku transien pada Persamaan (5). Selanjutnya penyelesaian dilakukan dengan menggunakan metode Adaptive Runge-Kutta [8].
 3. Perhitungan temperatur rerata bahan bakar dan pendingin. Suhu rata-rata bahan bakar dan pendingin dihitung menggunakan persamaan (12) dan (15) dengan syarat awal yaitu suhu pada masukan SRAC. Persamaan-persamaan differensial tersebut diselesaikan menggunakan metode *Adaptive Runge-Kutta*. Pada perhitungan suhu pendingin, suku Q_{NC} pada persamaan (15) diabaikan dengan asumsi fraksi energi termal yang dihasilkan pada pendingin sangat kecil.
 4. 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, tidak dengan menggunakan persamaan (14). Selanjutnya daya pada kondisi transien dihitung dengan mengalikan data tersebut dengan besarnya fluks pada kondisi transien. Hal ini dilakukan, karena dipandang lebih akurat untuk mendapatkan besarnya daya reaktor PCMSR.
 5. Perhitungan reaktivitas temperatur. Syarat awal untuk perhitungan reaktivitas adalah sama dengan nol, karena pada kondisi *steady*, hampir tidak ada reaktivitas yang diberikan pada reaktor. Pada perhitungan reaktivitas suhu digunakan persamaan (5).
 6. Pengujian dengan variasi laju alir pendingin. Masukan pada laju alir pendingin dibuat dalam tiga jenis masukan. Masukan yang diberikan berupa masukan *step*, *ramp*, eksponensial, dan *sinusoidal*. Pada masukan *step*, laju alir pendingin diturunkan secara mendadak sebesar 50% dari nilai semula, kemudian dibuat tetap pada rentang waktu tertentu, dan laju alir pendingin dikembalikan lagi pada laju awalnya. Hal yang sama juga dilakukan pada masukan *ramp* dan eksponensial. Pada masukan *sinusoidal*, laju alir pendingin dibuat naik turun secara periodik dengan memvariasikan frekuensi perubahan laju alir pada rentang waktu tertentu.

Dalam penelitian ini, karena masukan yang divariasikan adalah perubahan laju alir pendingin, maka laju alir bahan bakar dibuat tetap. Daya reaktor PCMSR ditetapkan 1000 MWth dengan laju alir bahan bakar 7000 kg/s dan laju alir pendingin sebesar 7700 kg/s.

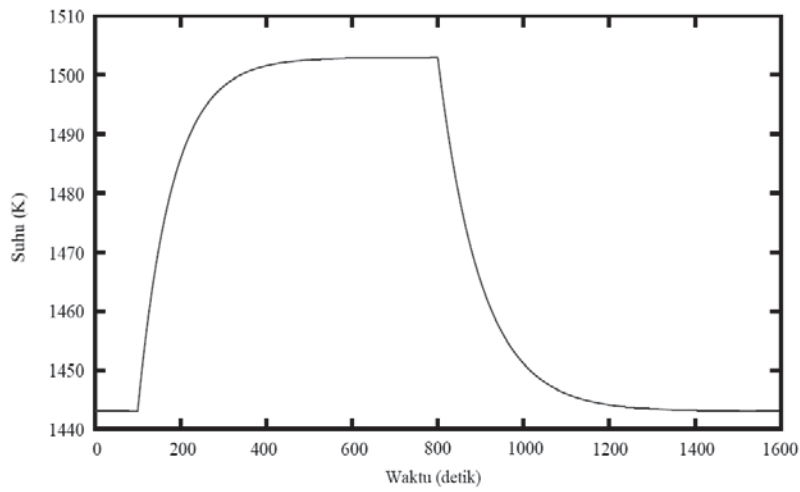
HASIL DAN PEMBAHASAN

Respon Uji Undak

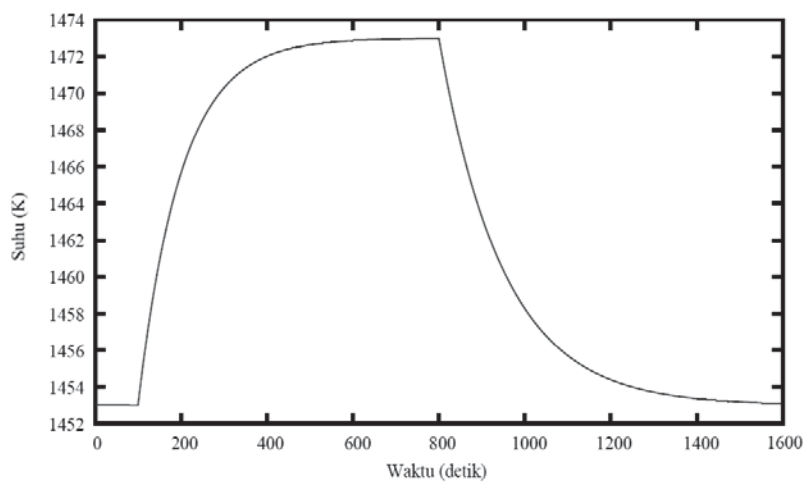
Pada masukan (*input*) undak (*step*), laju alir pendingin mula-mula dibuat tetap pada laju alir normal, kemudian pada detik ke-100 laju alir diturunkan sebesar 50% dari laju alir sebelumnya, yaitu 3850 kg/s. Nilai laju alir tersebut konstan sampai detik ke-800. Setelah detik ke-800, laju alir dikembalikan lagi pada laju alir normal. Gambar 2, menunjukkan hasil perhitungan temperatur rerata untuk bahan bakar, pendingin, dan daya reaktor PCMSR akibat pemberian masukan *step* berupa perubahan laju alir pendingin.



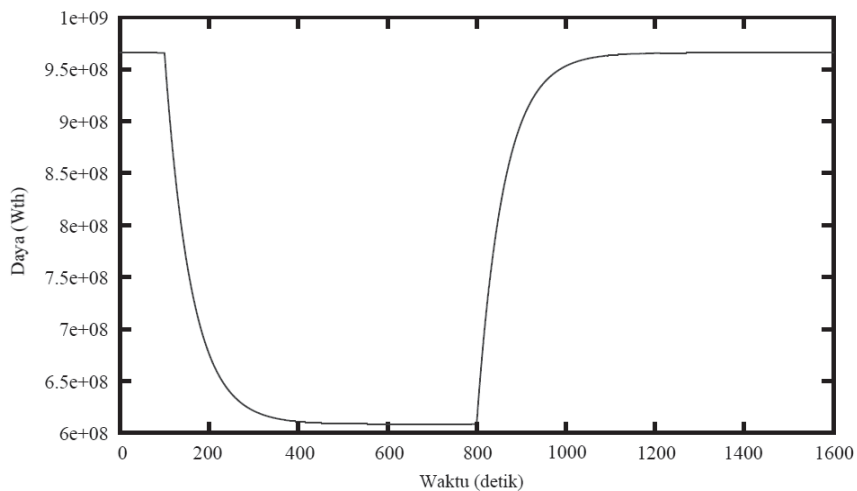
(2a) Masukan undak laju alir pendingin



(2b) Temperatur rerata bahan bakar



(2c) Temperatur rerata pendingin



(2d) Daya reaktor

Gambar 2. Pola respon undak laju alir pendingin terhadap suhu dan daya

Pemberian masukan *step* pada laju alir pendingin menyebabkan respon temperatur bahan bakar dan pendingin naik mengikuti respon paksaannya (*force response*). Dapat dilihat dengan adanya masukan berupa perubahan mendadak pada laju alir, respon alami (*natural response*) dari temperatur bahan bakar dan pendingin perlahan menuju suatu nilai konstan. Pada sekitar detik ke-580, temperatur bahan bakar mulai menunjukkan nilai yang konstan yang berada di sekitar 1503 K. Sementara temperatur pendingin menunjukkan nilai yang konstan yang berada sekitar 1473 K pada sekitar detik ke-620.

Ketika laju alir pendingin dikembalikan pada laju normal pada detik ke-800, terlihat bahan bakar dan pendingin mengalami penurunan temperatur secara perlahan akibat *force response* dari perubahan laju alir pendingin. Pada sekitar detik ke-1380, temperatur bahan bakar mulai menunjukkan nilai yang konstan yang berada di sekitar 1443 K. Sementara temperatur pendingin menunjukkan nilai yang konstan di sekitar 1453 K pada detik ke-1420.

Ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami kenaikan, daya reaktor memberikan respon penurunan nilai daya. Hal ini karena adanya umpan balik reaktivitas negatif yang mengakibatkan daya reaktor turun. Daya konstan mulai ditunjukkan saat sekitar detik ke-590 pada nilai sekitar 609 MWth. Kemudian ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami penurunan, daya reaktor memberikan respon kenaikan nilai daya. Nilai daya kembali pada nilai awalnya yaitu sekitar 966 MWth pada detik ke-1310.

Respon Uji Ramp

Pada masukan *ramp*, laju alir pendingin mula-mula dibuat tetap pada laju alir normal, kemudian pada detik ke-100 laju alir diturunkan secara linier mengikuti fungsi:

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_0 + (\dot{m}_t - \dot{m}_0) \left(\frac{t-t_0}{\tau} \right) \quad (16)$$

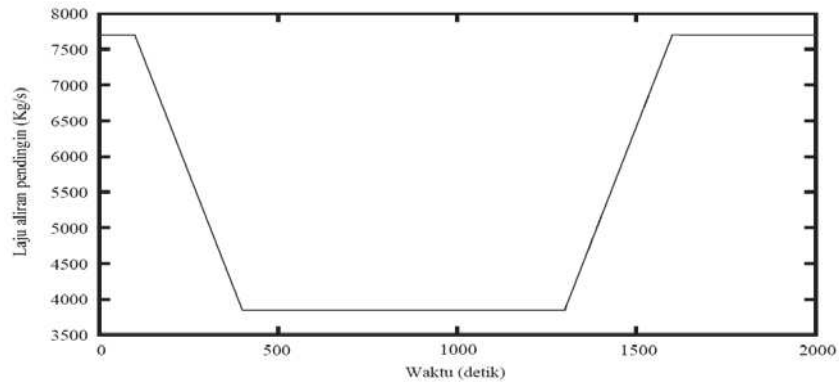
dengan:

- $\dot{m}(t)$ = perubahan laju alir masa fungsi waktu
- \dot{m}_0 = laju alir masa awal
- \dot{m}_t = laju alir masa akhir
- t = waktu alir
- t_0 = waktu awal (referensi)
- τ = rentang waktu perubahan (waktu akhir – waktu awal)

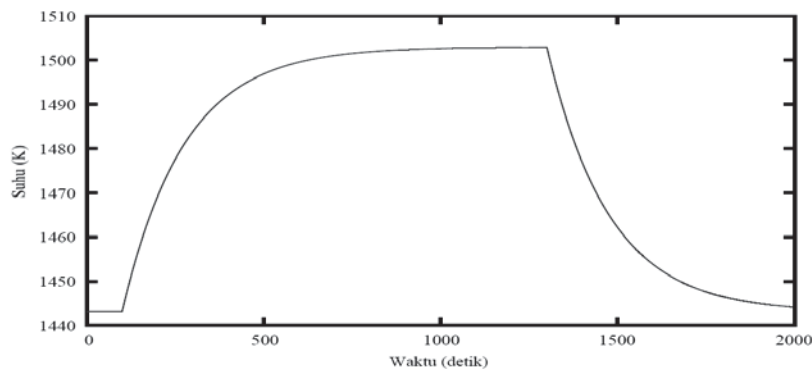
Laju alir tersebut terus diturunkan secara linier hingga detik ke-400. Pada saat tersebut laju alir dibuat menjadi 50% dari laju alir sebelumnya. Dengan demikian nilai t_0 adalah 100 dan τ ditetapkan sebesar 300. Kemudian laju alir dibuat konstan sampai detik ke-1300, lalu dinaikkan kembali mengikuti fungsi:

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_t + (\dot{m}_0 - \dot{m}_t) \left(\frac{t - t_1}{\tau} \right) \quad (17)$$

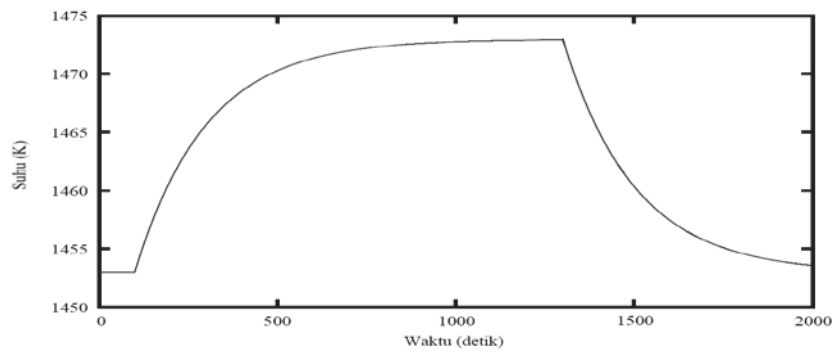
Kemudian pada saat detik ke-1600, laju kembali dibuat tetap pada laju normal 7700 kg/s. Gambar 3 menunjukkan temperatur rerata bahan bakar, pendingin dan daya pada reaktor PCMSR akibat pemberian masukan *ramp* berupa perubahan laju alir pendingin.



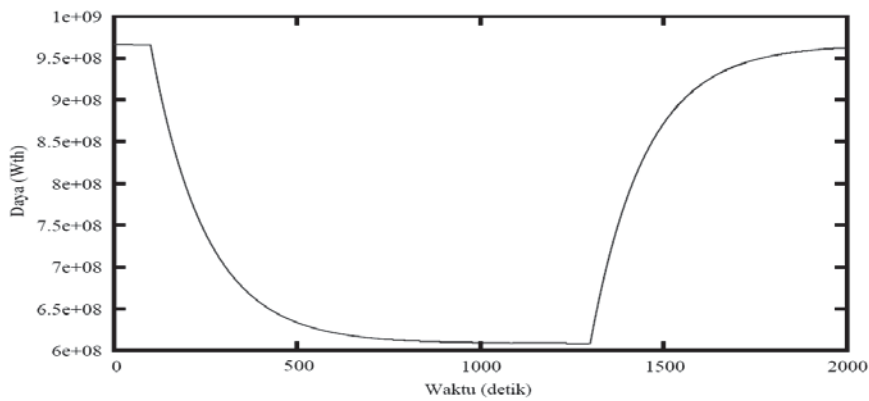
(3a) Masukan laju alir pendingin



(3b) Temperatur rerata bahan bakar



(3c) Temperatur rerata pendingin



(3d) Daya reaktor

Gambar 3. Pola respon *ramp* laju alir pendingin terhadap temperatur dan daya

Dapat dilihat dengan adanya masukan berupa perubahan pada laju alir secara linier, respon alami (*natural response*) dari temperatur bahan bakar dan pendingin perlahan menuju suatu nilai konstan, dengan waktu respon lebih lama dari masukan *step*. Pada sekitar detik ke-1040, temperatur bahan bakar mulai menunjukkan nilai yang konstan yang berada di sekitar nilai 1503 K. Sementara temperatur pendingin menunjukkan nilai yang konstan yang berada sekitar nilai 1473 K pada sekitar detik ke-1110.

Ketika laju alir pendingin dinaikkan kembali sampai detik ke-1600, terlihat temperatur bahan bakar dan pendingin mengalami penurunan. Pada detik ke-1600 sampai 2000, laju alir pendingin kembali dibuat konstan pada laju alir awal, dan sekitar detik ke-1980 dan 1990, temperatur rerata bahan bakar dan pendingin mulai kembali ke temperatur awal. Kenaikan temperatur bahan bakar dapat memberikan umpan balik reaktivitas negatif karena PCMSR memiliki koefisien reaktivitas temperatur bernilai negatif, sehingga mengakibatkan daya reaktor turun. Daya kembali konstan mulai terjadi pada detik ke-1020. Kemudian ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami penurunan, daya reaktor memberikan respon kenaikan nilai daya dan kembali lagi pada nilai awal.

Respon Uji Eksponensial

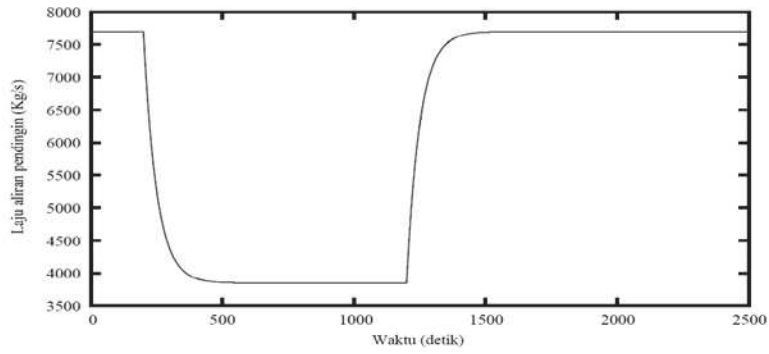
Pada masukan eksponensial, laju alir pendingin mula-mula dibuat tetap pada laju alir normal, kemudian pada detik ke-200 laju alir diturunkan secara eksponensial mengikuti fungsi:

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_t + (\dot{m}_0 - \dot{m}_t) \exp\left(\frac{t - t_0}{\tau}\right) \quad (18)$$

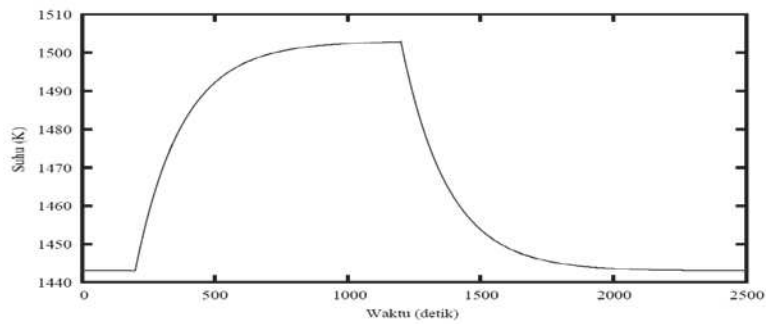
Laju alir tersebut terus diturunkan secara eksponensial hingga detik ke-1200. Pada saat tersebut laju alir sudah memiliki nilai konstan yaitu 50% dari laju alir sebelumnya. Dengan demikian nilai t_0 adalah 200. Nilai τ ditetapkan sebesar 50, karena jika nilai τ terlalu besar, maka kurva eksponensial akan semakin landai dan akan memberikan respon yang sangat lama terhadap perubahan temperatur dan daya, begitu pula jika τ terlalu kecil, maka kurva akan mendekati fungsi *step*. Kemudian pada detik ke-1200 sampai detik ke-2200, laju alir pendingin dinaikkan mengikuti fungsi:

$$\dot{m}(t) = \dot{m}_0 - (\dot{m}_0 - \dot{m}_t) \exp\left(\frac{t - t_1}{\tau}\right) \quad (19)$$

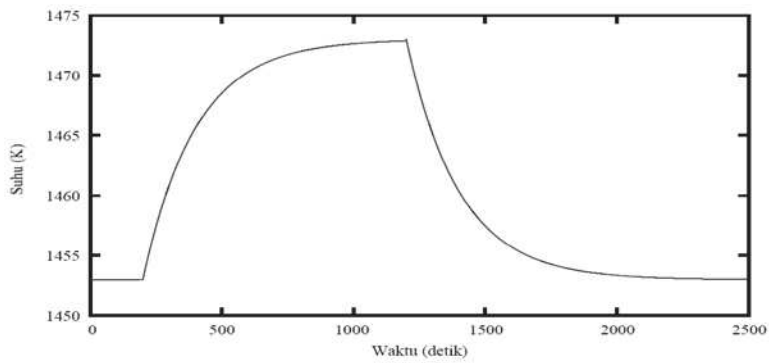
Kemudian pada saat detik ke-2200, laju kembali dibuat tetap pada laju normal 7700 kg/s. Gambar 4 menunjukkan temperatur rerata bahan bakar, pendingin dan daya pada PCMSR akibat pemberian masukan eksponensial berupa perubahan laju alir pendingin.



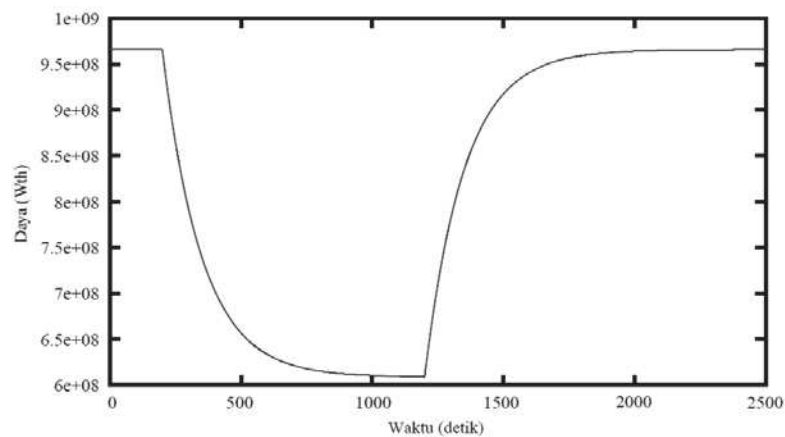
(4a) Masukan laju alir pendingin



(4b) Temperatur rerata bahan bakar



(4c) Temperatur rerata pendingin



(4d) Daya reaktor

Gambar 4. Pola respon eksponensial laju alir pendingin terhadap temperatur dan daya

Pemberian masukan eksponensial menyebabkan respon temperatur bahan bakar dan pendingin naik mengikuti respon paksaannya (*force response*). Pada sekitar detik ke-1120, temperatur bahan bakar mulai menunjukkan nilai yang konstan berada di sekitar nilai 1503 K. Sementara temperatur pendingin pada detik ke-1190 mulai menunjukkan nilai yang konstan pada temperatur 1473 K setelah detik ke-1190.

Ketika laju alir pendingin dinaikkan kembali sampai detik ke-2200, terlihat temperatur bahan bakar dan pendingin mengalami penurunan. Pada detik ke-2200 sampai 2500, laju alir pendingin kembali dibuat konstan pada laju alir awal yaitu 7700 kg/s. Pada detik ke-2270 dan 2310, temperatur rerata bahan bakar dan pendingin mulai kembali ke ke temperatur awal.

Ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami kenaikan, daya reaktor memberikan respon penurunan nilai daya. Hal ini karena adanya umpan balik reaktivitas negatif yang mengakibatkan daya reaktor turun. Daya konstan mulai ditunjukkan sekitar detik ke-1150 sekitar 609 MWth. Kemudian ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami penurunan, daya reaktor memberikan respon kenaikan nilai daya. Nilai daya kembali pada nilai awalnya yaitu sekitar 965.9 MWth pada sekitar detik ke-2500.

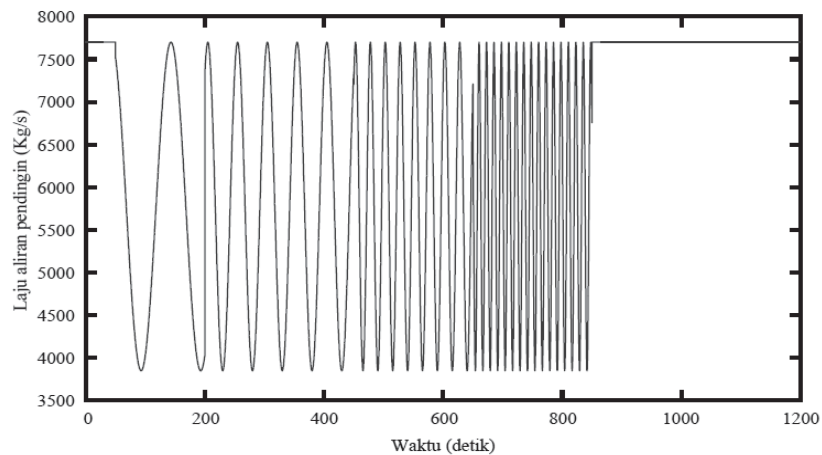
Respon Uji Sinusoidal

Pada masukan *sinusoidal*, laju alir pendingin mula-mula dibuat tetap pada laju alir normal, kemudian mulai detik ke-50 laju alir diturunkan secara periodik mengikuti fungsi:

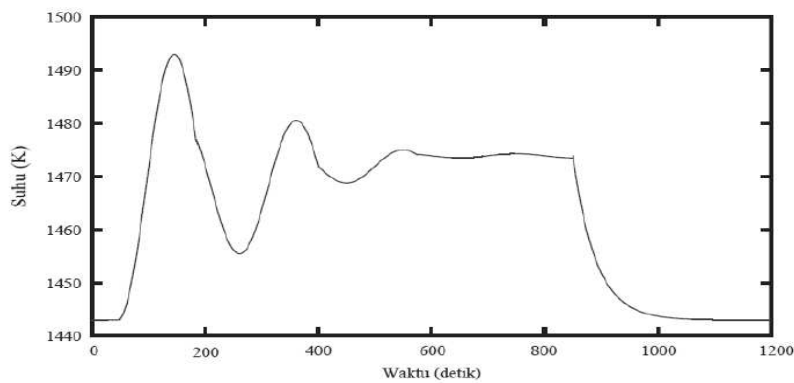
$$m(t) = 0.25m_0 \cos(n\pi t - t_0) + 0.75m_0 \tag{20}$$

di mana n adalah frekuensi dari perubahan laju alir pendingin, semakin besar nilai n , maka perubahan naik turun dari laju alir pendingin semakin cepat. Fungsi tersebut dibuat sedemikian sehingga penurunan laju alir pendingin sebesar 50% dari laju alir sebelumnya.

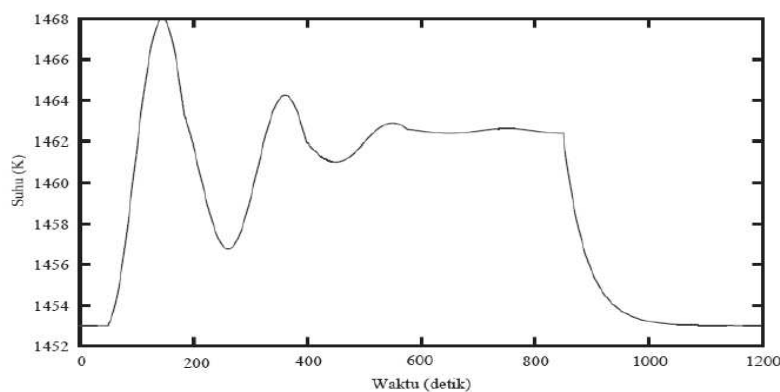
Gambar 5 menunjukkan temperatur rerata bahan bakar, temperatur rerata pendingin, dan daya pada PCMSR akibat pemberian masukan sinusoidal perubahan laju alir pendingin.



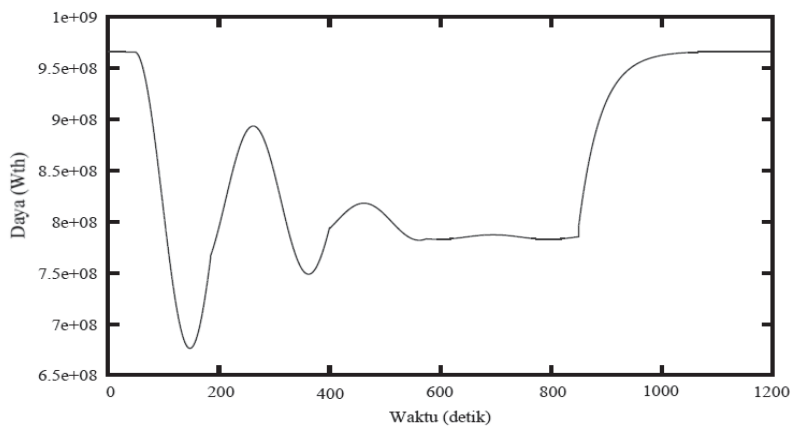
(5a) Masukan laju alir pendingin



(5b) Temperatur rerata bahan bakar



(5c) Temperatur rerata pendingin



(5d) Daya reaktor

Gambar 5. Pola respon sinusoidal dari laju alir pendingin terhadap temperatur dan daya

Semula reaktor dibuat pada laju alir normal sampai detik ke-50. Pada detik ke-50 sampai detik ke-250, laju alir dibuat berubah naik turun sesuai fungsi pada Persamaan (5) dengan mengambil nilai $n=2$, lalu pada detik ke-250 sampai detik ke-450 nilai $n=4$. Pada detik ke-450 sampai detik ke-650 nilai $n=8$, dan pada detik ke-650 sampai detik ke-850 nilai $n=16$. Kemudian dari detik ke-850 sampai 1200, laju alir dikembalikan ke laju normal, yaitu 7700 kg/s.

Pada Gambar 5 dapat dilihat ketika laju alir pendingin diturunkan terjadi kenaikan temperatur rerata bahan bakar dan pendingin. Namun temperatur bahan bakar dan pendingin tidak mencapai nilai

yang ditunjukkan seperti pada masukan *step*, *ramp*, dan eksponensial (1503 K dan 1473 K). Hal ini dikarenakan sebelum mencapai nilai temperatur tersebut, laju alir pendingin sudah dinaikkan kembali sehingga kenaikan temperatur melambat dan akhirnya turun. Begitu pula ketika frekuensi perubahan laju alir (nilai n) ditambah, nilai temperatur maksimum pada rentang waktu tersebut semakin menurun dan semakin besar nilai frekuensi perubahan laju alir atau makin cepat perubahan naik turun laju alir pendingin, maka temperatur maksimum semakin menurun dan semakin lama temperatur bahan bakar dan pendingin untuk kembali ke nilai konstan.

Respon nilai daya reaktor yang ditunjukkan memiliki fenomena yang hampir sama seperti yang ditunjukkan pada temperatur bahan bakar dan pendingin. Ketika temperatur rerata bahan bakar mengalami kenaikan, daya reaktor memberikan respon penurunan nilai daya. Hal ini karena adanya umpan balik reaktivitas negatif yang mengakibatkan daya reaktor turun. Semakin besar cepat perubahan naik turun laju alir pendingin, daya reaktor semakin memberikan respon yang mendekati nilai konstan.

Hal ini menunjukkan ketika terjadi perubahan naik turun yang sangat cepat dari laju alir, maka daya reaktor hampir tidak memberikan respon dan tetap pada nilai stabil tertentu. Hal ini merupakan salah satu karakteristik *inherent safety* yang dimiliki reaktor PCMSR.

Dari keempat respon yang diberikan, dapat dilihat bahwa penurunan laju alir pendingin sebesar 50% dari laju alir pendingin sebelumnya, menyebabkan daya pada PCMSR turun menjadi sekitar 63% dari daya sebelumnya. Selanjutnya ketika laju alir bahan bakar kembali normal, maka daya pada PCMSR juga kembali pada daya semula. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengendalian daya pada PCMSR dapat dilakukan dengan mengendalikan laju alir pendingin. Dapat dilihat juga pada grafik bahwa kenaikan temperatur bahan bakar dapat memberikan umpan balik reaktivitas negatif karena PCMSR memiliki koefisien reaktivitas temperatur yang bernilai negatif. Umpan balik reaktivitas negatif tersebut akan mengakibatkan daya reaktor turun. Prinsip inilah yang mendasari pengendalian daya reaktor PCMSR dan menunjukkan bahwa reaktor ini memiliki karakteristik sistem keselamatan melekat (*inherent safety*).

Pada masukan sinusoidal, perubahan naik turun yang sangat cepat dari laju alir pendingin hampir tidak memberikan respon pada perubahan daya reaktor, dan nilai daya reaktor berada pada nilai stabil tertentu.

KESIMPULAN

Reaktor PCMSR memiliki karakteristik sistem keselamatan melekat (*inherent safety*), karena pengendalian daya dapat dilakukan dengan mengendalikan laju alir bahan pendingin. Penurunan laju alir pendingin menyebabkan kenaikan temperatur rerata bahan bakar dan pendingin dan selanjutnya memberikan umpan balik reaktivitas negatif yang mengakibatkan daya reaktor turun. Temperatur bahan bakar lebih cepat mencapai nilai konstan karena pada bahan bakar terjadi proses pembangkitan kalor, sehingga ketika laju alir pendingin berkurang ataupun bertambah, akan terjadi akumulasi panas ataupun *heat removal* pada bahan bakar.

DAFTAR PUSTAKA

1. Department of Energy (DOE) United States of America, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System. U.S. DOE Nuclear Energy Advisory Committee; December 2002.

2. Widiharto A. Desain reaktor maju bersuhu tinggi tipe PCMSR dengan sifat keselamatan melekat (Inherent Safe). Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN dan Fasilitas Nuklir. Jakarta; 6 November 2007.
3. Widiharto A. The use of Plutonium from LWR spent fuel as initial fissile fuel for sustainable thorium fuel cycle of Passive Compact Molten Salt Reactor(PCMSR). International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering, Bandung 3-4 November 2009.
4. Zhang DL, Qiu SZ, Su GH, Liu CL, Lian LB. Analysis on the neutron kinetics for a molten salt reactor. Progress in Nuclear Energy. 2009; 51:624-636.
5. Duderstadt JJ, Hamilton LJ. Nuclear Reactor Analysis. John Wiley & Sons. United States of America. 1976.
6. Krepel J, Grundman U, Rohde U, Weiss FP. DYN1D-MSR dynamics code for molten salt reactors. Annals of Nuclear Energy. 2005; 32:1799-1824.
7. Scarlet R, Peterson PF. The pebble bed advanced high temperature reactor (PB-AHTR), a fluoride salt cooled high temperature reactor high temperature reactor (FHR). TEA Conference. Washington, DC. May 2011.
8. Kiusalaas J. Numerical method in engineering with Python. Cambridge University Press. NewYork; 2005.
9. Okumura K, Kugo T, Kaneko K, Tsuchihashi K. SRAC : (Ver.2006): The comprehensive neutronics calculation code system. Department of Nuclear Energy Systems. Japan Atomic Energy Research Institute. Japan; 2006.

NOMENCLATURE

Simbol	Nama besaran
a	= Indeks menyatakan interaksi serapan neutron
C_D	= Konsentrasi prekursor neutron tertunda pada bahan bakar (nuklida/cm ³)
D	= Koefisien difusi neutron (cm)
f	= Indeks menyatakan interaksi fissi
g, g'	= Indeks nomor group neutron berdasarkan energi
G	= Jumlah kelompok energi neutron
i	= Indeks menyatakan kelompok precursor neutron tunda
I	= Jumlah kelompok precursor neutron tertunda
j	= Indeks menyatakan nuklida aktinida dalam bahan bakar
J	= Jumlah nuklida aktinida dalam bahan bakar
N_j	= Densitas nuklida aktinida ke - j
v_g	= Kelajuan neutron pada group g (cm/s)
t	= Waktu (s)
β	= Fraksi neutron tertunda total
λ_D	= Tetapan peluruhan precursor neutron tertunda (1/s)
ϕ	= Fluks neutron (n/cm ² .s)
Σ	= Tampang lintang interaksi makroskopis (1/cm)
$\chi_{g,D}$	= Fraksi neutron fissi tertunda yang memiliki energi sesuai energi group g
$\chi_{g,P}$	= Fraksi neutron fissi serempak yang memiliki energi sesuai energi group g
ν_h	= Neutron yang dihasilkan tiap reaksi fissi
D_D	= Difusifitas prekursor neutron tertunda pada bahan bakar (cm ² /s)
Φ	= Fluks neutron rerata (n/cm ² .s)

B^2	=	Buckling geometri (1/cm)
$\zeta_{F,g}$	=	Perbandingan fluks neutron bahan bakar terhadap fluks neutron rerata
σ	=	Penampang lintang interaksi neutron mikroskopis (cm ²)
$\beta_{i,g}$	=	Fraksi neutron tertunda kelompok i akibat fisi oleh neutron group g
c_{pF}	=	Kalor jenis medium bahan bakar (J/(kg.K))
k_F	=	Konduktifitas termal bahan bakar (W/(m.K))
T_F	=	Suhu bahan bakar (K)
ρ_F	=	Densitas massa bahan bakar (kg/m ³)
E	=	Energi yang dihasilkan tiap satu reaksi fisi (MeV/fisi)
F_{EF}	=	Fraksi deposit energi fisi ke bahan bakar
K	=	Faktor konversi energi (1,6021x10 ⁻¹³ J/MeV)
\vec{v}_F	=	Vektor kecepatan aliran bahan bakar bahan bakar (m/s)
c_{pM}	=	Kalor jenis medium moderator (J/(kg.K))
k_M	=	Konduktivitas termal moderator (W/(m.K))
T_M	=	Suhu moderator (K)
ρ_M	=	Densitas massa moderator (kg/m ³)
F_{EM}	=	Fraksi deposit energi fisi ke moderator
\overline{T}_F	=	Suhu bahan bakar rerata (K)
\overline{T}_C	=	Suhu pendingin rerata (K)
$T_{F,in}$	=	Suhu bahan bakar masuk (K)
$T_{F,out}$	=	Suhu bahan bakar keluar (K)
$T_{C,in}$	=	Suhu pendingin masuk (K)
$T_{C,out}$	=	Suhu pendingin keluar (K)
\overline{A}_F	=	Penampang melintang aliran bahan bakar total (m ²)
\overline{A}_C	=	Penampang melintang aliran pendingin total (m ²)
\overline{S}_F	=	Perimeter aliran bahan bakar total (m)
\overline{S}_C	=	Perimeter aliran pendingin total (m)
