

## ANALISIS DINAMIKA TERAS SILISIDA KERAPATAN 4,8 gU/cc REAKTOR RSG-GAS

Surian Pinem, Tagor Malem Sembiring  
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

### ABSTRAK

**ANALISIS DINAMIKA TERAS SILISIDA KERAPATAN 4,8 gU/cc REAKTOR RSG-GAS.** Analisis dinamika teras sangat penting dalam keselamatan operasi reaktor. Proses dinamika reaktor dipengaruhi oleh keadaan neutronik dan termohidrolika teras. Dalam makalah ini, dilakukan analisis dinamika teras dengan elemen bakar silisida kerapatan 4,8 gU/cc dengan menggunakan program MTRDYN. Perhitungan neutronik dilakukan dengan menggunakan model adiabatik dan dikopel dengan perhitungan termohidraulik. Inseri reaktivitas sebesar 28,8 pcm/s dilakukan pada transien *start-up* pada daya 1 W dan transien daya 1 MW dengan asumsi batang kendali ditarik dengan cepat. Untuk inseri pada daya *start-up* 1 W daya maksimum adalah 15,905 MW temperatur maksimum elemen bakar 68,57 °C sementara pada daya tansien 1 MW daya maksimum 38,6 MW temperatur elemen bakar 116,6 °C. Harga yang diperoleh masih jauh dari batas maksimum yang diijinkan. Hal ini menunjukkan bahwa reaktor masih aman dengan inseri reaktivitas pada daerah transien *start-up* dan daya.

### ABSTRACT

**DYNAMIC ANALYSIS OF THE RSG-GAS REACTOR USING 4.8 gU/cc DENSITY SILICIDE CORE.** Analysis of the core dynamic is necessary for the reactor operation safety. The dynamic process of reactor is affected by the neutronic and thermo hydraulic core conditions. In this paper, performed core dynamic analysis with silicide fuel element 4,8 gU/cc density using MTRDYN code. The neutronic calculations are carried out using adiabatic method and it is coupled with thermo hydraulic calculations. The reactivity insertions of 28.8 pcm/s at the start-up transient at the power of 1 W and transient on the power of 1 MW with assumption of all control rod are rapidly withdrawn. For the start-up transient of 1 W, the maximum power is 15.905 MW with fuel temperature of 68.57 °C while for the power transient of 1 MW, the maximum power is 37.58 MW with fuel temperature of 140,04 °C. The calculated results were far from the maximum limit value. It showed that the reactor is safe with the selected reactivity insertion in the start-up and power transients.

### PENDAHULUAN

Saat ini reaktor RSG-GAS menggunakan elemen bakar silisida kerapatan 2,96 g U/cc, untuk meningkatkan efesiensi dan lama operasi reaktor maka perlu dilakukan peningkatan kerapatan elemen bakar. Untuk masa yang akan datang ada rencana untuk meningkatkan kerapatan elemen bakar silisida ke kerapatan tinggi. Perhitungan parameter neutronik dan kinetik menunjukkan bahwa elemen bakar dengan kerapatn 4,8 gU/cc memungkinkan untuk meningkatkan lama operasi reaktor. Untuk itu perlu dilakukan analisis dinamika teras dengan kerapatan 4,8 gU/cc.

Perhitungan neutronik dan kinetika reaktor menunjukkan bahwa teras 4,8 gU/cc dapat digunakan di reaktor RSG-GAS[1,2]. Untuk itu perlu dilakukan analisis dinamika reaktor untuk keselamatan operasi reactor. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan program MTR-DYN dengan menggunakan model neutronik adiabatic yang dikopel dengan

termohidraulik. Program ini menggunakan teras riil 4,8 g U/cc sebagai masukan sehingga memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan dengan insersi reaktivitas. Dalam hal ini faktor perubahan fluks neutron dan parameter kinetik akibat perubahan kondisi teras yang disebabkan perubahan posisi batang kendali akan diperhitungkan.

Perhitungan dengan menggunakan model adiabatik, persoalan difusi neutron banyak kelompok gayut waktu diselesaikan dengan faktorisasi fluks neutron. Dalam analisis ini juga akan dilakukan perhitungan thermal-hydraulik. Penambahan reaktivitas untuk memicu kritikalitas transien disimulasi dengan perturbasi tampang lintang neutron yang sangat akurat untuk penambahan reaktivitas dengan menarik batang kendali. Untuk itu perlu dilakukan preparasi tampang lintang neutron untuk kondisis awal dan kondisi perturbasi.

**TEORI**

**Model Neutronik**

Persamaan difusi neutron gayut waktu untuk beberapa kelompok energi umumnya ditulis sebagai berikut[3]:

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g(r,t)}{\partial t} = \nabla D_g(r,t) \cdot \nabla \phi_g(r,t) - \Sigma_{rg}(r,t) \phi_g(r,t) + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{r g' \rightarrow g}(r,t) \phi_{g'}(r,t) + \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_{pg'} \Sigma_{fg' \rightarrow g}(r,t) \phi_{g'}(r,t) + \sum_{k=1}^K \chi_{dkg} \lambda_k C_k(r,t), \quad g=1, \dots, G \quad \dots \dots \dots (1)$$

Persamaan yang berhubungan dengan kerapatan prekursor neutron kasip adalah,

$$\frac{\partial C_k(r,t)}{\partial t} = \sum_{dg} v_{dkg} \Sigma_{fg}(r,t) \phi_g(r,t) - \lambda_k C_k(r,t), \quad k=1, \dots, K. \quad \dots \dots \dots (2)$$

Bentuk pertama dan kedua sebelah kanan persamaan (1) masing-masing kehilangan neutron dalam bentuk kebocoran dan perpindahan dari kelompok energi g. Sementara bentuk ke tiga, ke empat dan ke lima masing-masing produksi neutron dari kelompok hamburan, fisi serempak dan neutron kasip. Bentuk pertama dan kedua sebelah kanan persamaan (2) masing-masing produksi prekursor dari reaksi fisi dan perpindahan melalui proses peluruhan. Dalam persamaan diatas digunakan parameter nuklir dasar masing-masing  $v_d$  dan  $\chi_d$  untuk neutron kasip dan  $v_p$  dan  $\chi_p$  untuk neutron serempak.

Fluks faktorisasi dibuat kedalam bentuk fluks neutron gayut waktu dalam:

$$\phi_g(r) = p(t) \Psi_g(r,t), \quad p(0) = 1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

dengan p(t) adalah amplitudo gayut waktu dan  $\Psi_g$  fungsi bentuk. Agar lebih baik fungsi

bentuk dibuat dengan batasan,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \sum_{g=1}^G \frac{\phi_g^+(r,0) \Psi_g(r,t)}{v_g} dV = 0 \quad \dots\dots\dots(4)$$

dengan  $\phi_g^+(r,0)$  adalah fluks *adjoint* awal. Dengan menggunakan persamaan (3) dan (4) dengan hasil teori perturbasi, persamaan (1) dan (2) dapat dibagi kedalam dua persamaan yang ekivalen, satu untuk fungsi amplitudo,

$$\frac{dp(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta(t)}{\Lambda(t)} p(t) + \sum_{k=1}^K \lambda_k C_k \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{dC_k(t)}{dt} = \frac{\beta_k(t)}{\Lambda(t)} p(t) - \lambda_k C_k(t) \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$k = 1, \dots\dots\dots, K$$

Persamaan kedua adalah perhitungan fungsi bentuk[2,3],

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g} \left( \frac{\partial \phi_g(r,t)}{\partial t} + \frac{1}{p(t)} \frac{dp(t)}{dt} \Psi_g(r,t) \right) &= \nabla D_g(r,t) \cdot \nabla \Psi_g(r,t) - \Sigma_{rg}(r,t) \Psi_g(r,t) \\ &+ \sum_{g'=1}^G \Sigma_{r'g \rightarrow g}(r,t) \Psi_{g'}(r,t) \\ &+ \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_{pg'} \Sigma_{fg' \rightarrow g}(r,t) \Psi_{g'}(r,t) \\ &+ \sum_{k=1}^K \chi_{dkg} \lambda_k C_k(r,t), \quad g = 1, \dots\dots, G. \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

Integral parameter kinetik persamaan (5) dan (6) didefinisikan sebagai,

$$\beta_k(t) \equiv \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \phi_g^+(r,0) \chi_{dkg} \sum_{g'=1}^G v_{dkg'} \Sigma_{fg' \rightarrow g}(r,t) \Psi_{g'}(r,t) dV \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\beta(t) \equiv \sum_{k=1}^K \beta_k(t) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\Lambda(t) \equiv \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \phi_g^+(r,0) \left[ \frac{1}{v_g} \right] \Psi_g(r,t) dV \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\begin{aligned} \rho(t) &\equiv \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \phi_g^+(r,0) \Sigma_{rg}(r,t) \Psi_g(r,t) dV + \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \phi_g^+(r,0) \Delta \\ &\left[ \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(r,t) + \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_{pg'} \Sigma_{fg' \rightarrow g}(r,t) \right] \Psi_g(r,t) dV \quad \dots\dots\dots(11) \end{aligned}$$

$$F(t) \equiv \int \sum_{g=1}^G \phi_g^+(r,0) \chi_g \sum_{g=1}^G \nu_g \cdot \Sigma_{fg} \cdot \Psi_g(r,t) dV \dots\dots\dots(12)$$

**Model Adiabatik**

Dalam model adiabatik, pertama, perbedaan antara spektrum neutron kasip dan neutron serempak diabaikan. Dengan kata lain, neutron serempak dari prekursor dianggap lahir pada waktu yang sama dengan neutron serempak. Kedua, semua turunan waktu dari amplitudo dan fungsi bentuk diabaikan. Untuk itu, persamaan (7) dapat disederhanakan sebagai berikut[4,5]:

$$\begin{aligned} &\nabla D_g(r,t) \cdot \nabla \Psi_g(r,t) - \Sigma_{rg}(r,t) \Psi_g(r,t) + \sum_{g=1}^G \Sigma_{sg \rightarrow g}(r,t) \Psi_g(r,t) \\ &+ \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g=1}^G \nu_g \cdot \Sigma_{fg \rightarrow g}(r,t) \Psi_g(r,t) = 0 \dots\dots\dots(13) \end{aligned}$$

dengan  $k_{eff}$  pada persamaan (13) adalah faktor perkalian efektif setelah perturbasi terjadi.

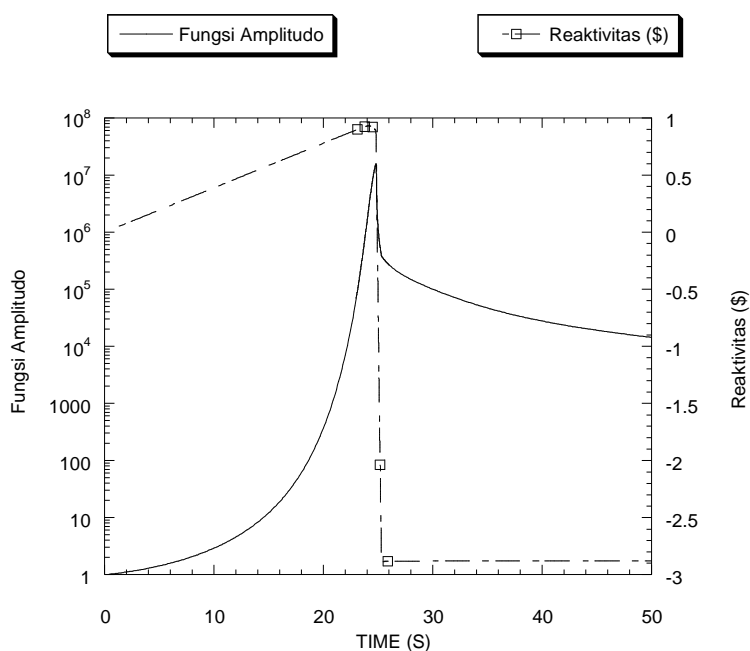
**Model Dasar Termohidraulik**

Persamaan konduksi kalor dalam batang elemen bakar dipertimbangkan dalam waktu dan ruang dengan menggunakan metode *finite-difference*. Konduksi kalor dipertimbangkan hanya dalam arah radial. Dinamika fluida dimodelkan di bawah kondisi aliran *single-phase*. Laju aliran masa dalam masing-masing kanal pendingin diasumsikan diketahui dan penyelesaian yang diperlukan hanya kontinuitas masa dan kekekalan energi. Keduanya mempertimbangkan ruang dengan menggunakan metode *finite-difference* dan waktu dengan skema implisit.

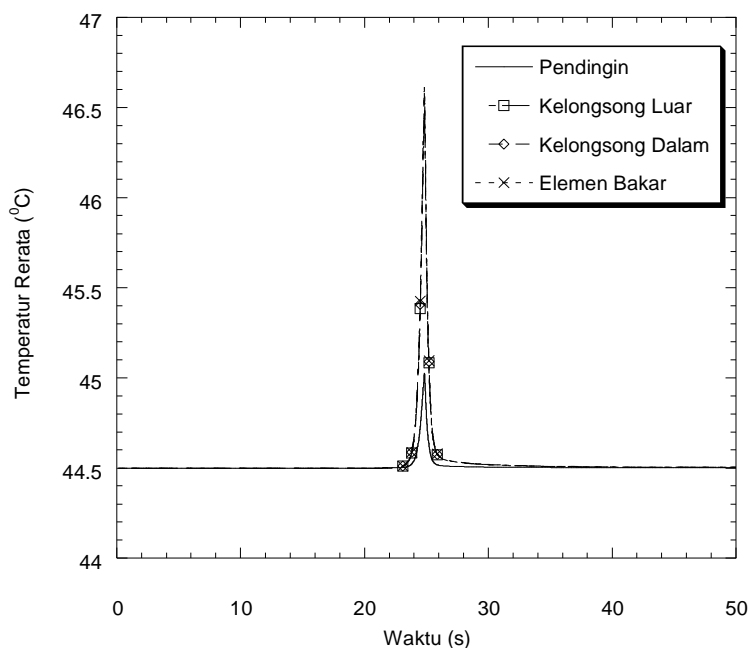
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Model dinamika yang digunakan untuk analisis insersi reaktivitas teras RSG-GAS adalah model adiabatik. Analisis insersi reaktivitas dilakukan pada daya awal 1 W dan 1 MW dengan insersi 28,2 pcm/s. Untuk insersi reaktivitas pada 1 W disimulasi dengan menarik semua batang kendali pada posisi 30 cm dari atas teras, daya *trip* 4,5 MW. Fungsi amplitudo dan insersi reaktivitas yang diperoleh selama transien untuk daya awal 1 W ditunjukkan Gambar 1. Dari hasil ini terlihat bahwa bentuk fungsi amplitudo sangat tajam karena sebagian besar reaktivitas *feedback* datang dari elemen bakar. Daya maksimum yang dicapai sebelum reaktor *scram* adalah 15.905 MW dalam waktu 24,813 sekon. Temperatur rerata dan temperatur maksimum dalam teras masing-masing ditunjukkan

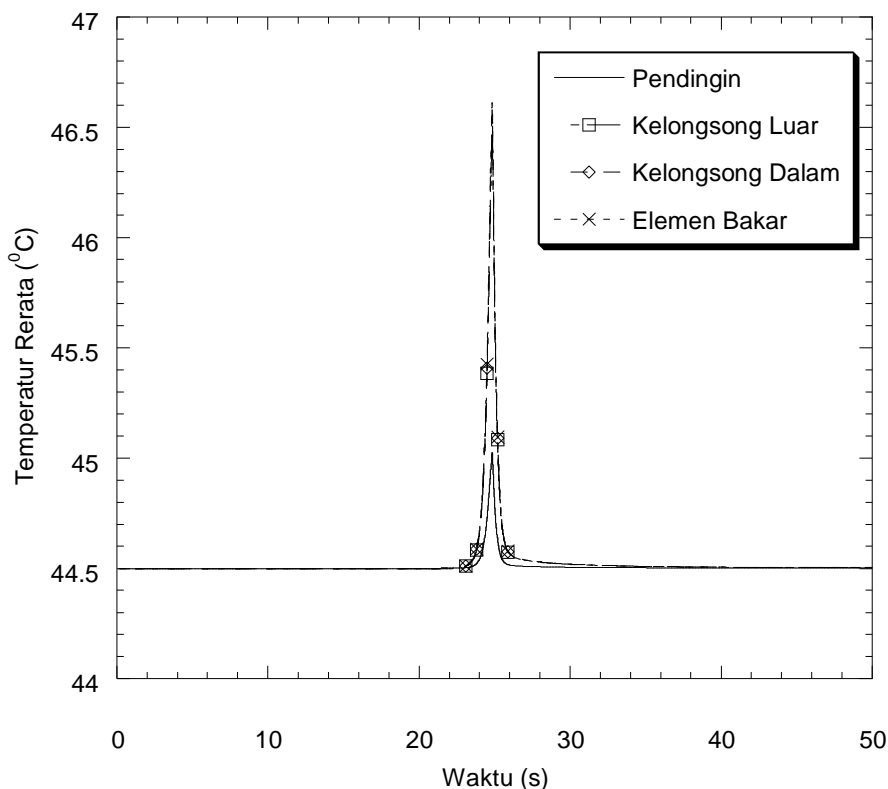
dalam Gambar 2 dan 3 serta Tabel 1. Temperatur rerata pendingin, kelongsong bagian luar, kelongsong bagian dalam, dan elemen bakar masing-masing naik sekitar  $0,52^{\circ}\text{C}$ ,  $12,03^{\circ}\text{C}$ ,  $2,08^{\circ}\text{C}$  dan  $2,11^{\circ}\text{C}$ . Temperatur maksimum pendingin, kelongsong bagian luar, kelongsong bagian dalam dan elemen bakar masing-masing sekitar  $50,64^{\circ}\text{C}$ ,  $67,66^{\circ}\text{C}$ ,  $68,21^{\circ}\text{C}$  dan  $68,57^{\circ}\text{C}$ . Hasil ini menunjukkan bahwa dengan insersi reaktivitas pada kondisi *start-up* reaktor RSG-GAS masih dalam kondisi aman.



Gambar 1. Fungsi amplitudo selama transien dengan daya awal 1



Gambar 2. Temperatur rerata selama transien



Gambar 3. Temperatur maksimum selama transien dengan daya awal 1 W

Tabel. 1 Hasil temperatur pada saat transien daya 1 W

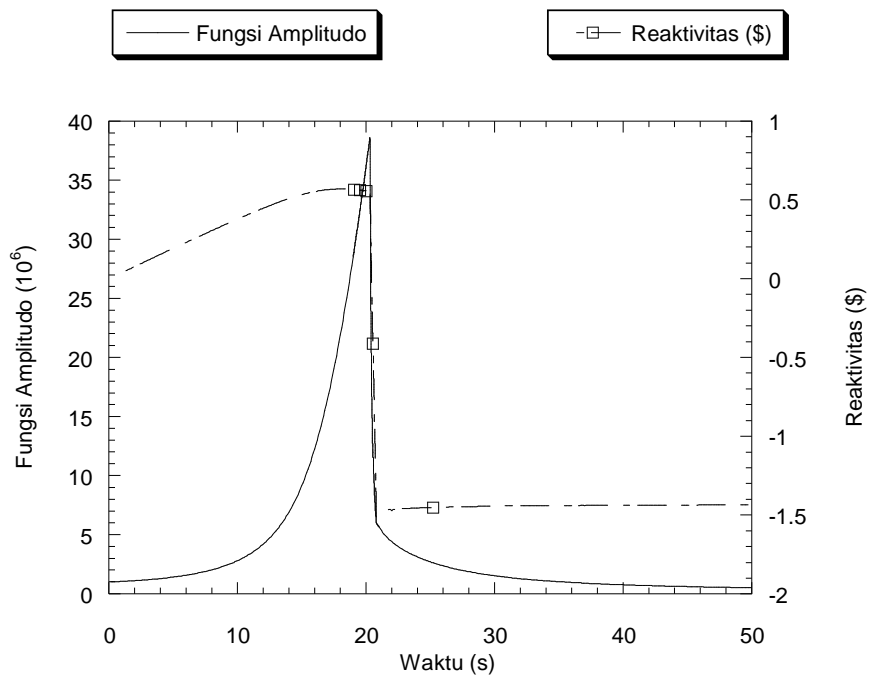
	Pendingin	Kelongsong sebelah luar	Kelongsong sebelah dalam	Elemen bakar
Temperatur rerata (°C)	44,5	44,5	44,5	44,5
	45,02	46,53	46,58	46,61
Temperatur maksimum (°C)	44,5	44,5	44,5	44,5
	50,64	67,66	68,21	68,57

Catatan. Angka atas hasil sebelum insersi dan bawah setelah insersi

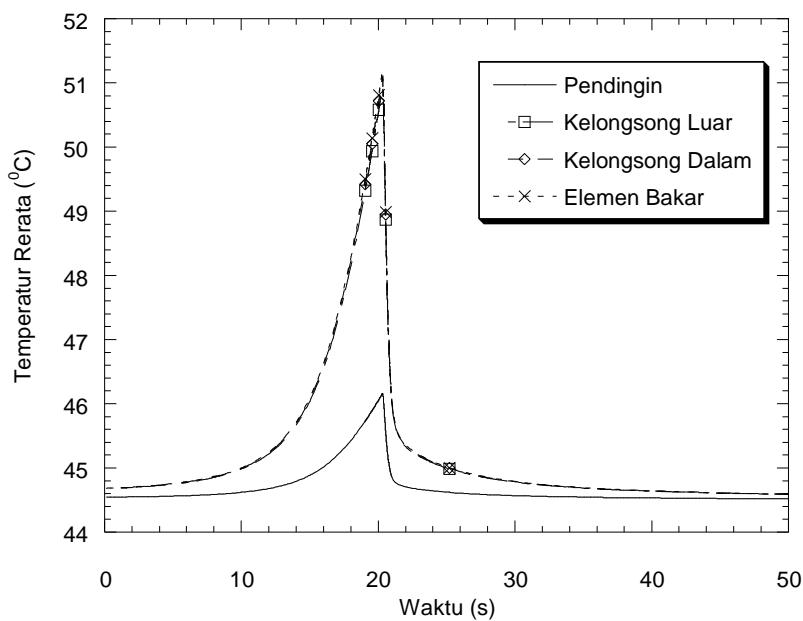
Untuk insersi reaktivitas pada 1 MW disimulasi dengan menarik semua batang kendali pada posisi 15 cm dari atas teras dengan daya *trip* 34,2 MW, laju alir pendingin dalam teras 522,3 kg/s dan tekanan pendingin  $2.10^5$  Pa. Hasil fungsi amplitudo dengan insersi reaktivitas 28,2 pcm/s dengan daya awal 1 MW ditunjukkan dalam Gambar 4. Hasil ini menunjukkan bahwa bentuk fungsi amplitudo untuk tansien *start-up* pada 1 W lebih tajam dibandingkan dengan transien daya 1 MW. Hal ini disebabkan karena pada transien daya ada kontribusi reaktivitas *feedback* dari kenaikan temperatur pendingin. Daya maksimum yang dicapai sebelum reaktor *scram* adalah 38,6 MW dalam waktu 20,31 sekon.

Temperatur rerata dan temperatur maksimum dalam teras masing-masing ditunjukkan

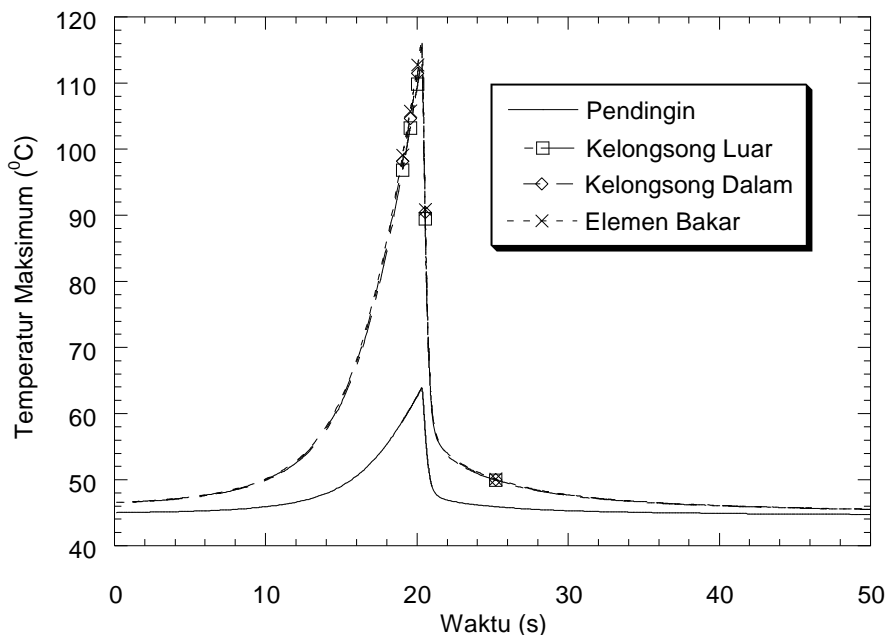
dalam Gambar 5 dan 6 serta Tabel 2. Temperatur rerata pendingin, kelongsong bagian luar, kelongsong bagian dalam dan elemen bakar masing-masing naik sekitar  $1,76^{\circ}\text{C}$ ,  $6,27^{\circ}\text{C}$ ,  $6,41^{\circ}\text{C}$  dan  $6,50^{\circ}\text{C}$ . Temperatur maksimum pendingin, *cladding* dan elemen bakar masing-masing sekitar  $63,88^{\circ}\text{C}$ ,  $113,60^{\circ}\text{C}$ ,  $115,30^{\circ}\text{C}$  dan  $116,60^{\circ}\text{C}$ . Temperatur sebesar ini menunjukkan bahwa kondisi teras reaktor masih dalam batas yang aman.



Gambar 5. Fungsi amplitudo selama transien dengan daya awal 1 MW



Gambar 7. Temperatur rerata selama transien dengan daya awal 1 MW



Gambar 8. Temperatur maksimum selama transien dengan daya awal 1 MW

Tabel. 2 Hasil Temperatur saat transien daya 1 MW

	Pendingin	Kelongsong bagian luar	Kelongsong bagian dalam	Elemen bakar
Temperatur rerata (°C)	44,54	44,68	44,68	44,69
	46,16	50,95	51,09	51,19
Temperatur maksimum (°C)	45,02	46,51	47,41	47,44
	63,88	113,60	115,50	116,60

Catatan. Angka atas hasil sebelum insersi dan bawah setelah insersi

## KESIMPULAN

Analisis dinamika pada reaktor RSG-GAS menggunakan metode kopel neutronik-termohidraulik telah dilakukan. Hasil perhitungan dengan insersi reaktivitas 28,2 pcm/s menunjukkan bahwa temperatur elemen bakar, kolongsong dan pendingin masih jauh dari titik lelehnya. Dengan demikian kecelakan reaktivitas akibat insersi reaktivitas dengan penerikan batang kendali pada daerah *star-up* dan daya masih aman.

## DAFTAR PUATAKA

1. LILY SUPARLINA, "Penentuan Konfigurasi Teras RSG-GAS Dengan Jumlah Elemen Bakar Silisida 4,8 gU/cc Optimum", Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, TRI DASA MEGA, Vol. 7, No.2, Juni 2005
2. TAGOR MS, SURIAN PINEM, "Efek Kinetika Reaktor Akibat Penggunaan Elemen



Bakar Silisida Kerapatan 4,8 gU/cc RSG-GAS, Akan dipublikasikan di Jurnal HFI, 2007.

3. OTT, K.O. and NEUHOLD, R.J., "Nuclear Reaktor Dynamics", ANS, 1985
4. BELL, G. I. and GLASSTONE, S., "Nuclear Reaktor Theory", Van Nostrand Reinhold Company, 1970
5. HENRY, A. F., "Nucl. Sci. Engng. 3, 1958
6. HENRY, A. F. and CURLEE, N. J., "Nucl. Sci. Engng. 4, 1958