

SIMULASI PERILAKU FLUKS NEUTRON DI REAKTOR RSG-GAS DENGAN METODE RUNGE KUTTA

Abdul Aziz Rohman Hakim¹, Nailul 'Atifah²

¹ Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN

Email: hakim@batan.go.id.

² Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

Email: dosen00410@unpam.ac.id

Diterima: 05 November 2021, diperbaiki : 12 Mei 2022, disetujui : 24 Mei 2022

ABSTRAK

SIMULASI PERILAKU FLUKS NEUTRON DI REAKTOR RSG-GAS DENGAN METODE RUNGE KUTTA. Pemodelan reaktor sebagai sebuah titik menghasilkan satu set pasangan persamaan diferensial biasa yang disebut sebagai persamaan kinetika reaktor titik (*reactor point kinetic*). Persamaan tersebut merupakan persamaan simultan orde satu yang menggambarkan perilaku reaktor gayut waktu. Persamaan kinetika reaktor titik dapat diselesaikan secara numerik, salah satunya dengan metode Runge Kutta Orde 4. Metode Runge Kutta Orde 4 dipilih karena memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat dibanding Metode Deret Taylor meskipun dengan pemrograman yang relatif lebih sulit. Pemrograman dilakukan dalam bahasa FORTRAN, sedangkan hasil perhitungan divisualisasikan dengan Matlab. Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan hubungan reaktivitas dengan fluks neutron dalam teras menggunakan Metode Runge Kutta Orde 4. Dalam penelitian ini tidak dibandingkan keakuratan metode-metode yang telah dibahas dalam penelitian-penelitian terdahulu. Metode perhitungan yang digunakan adalah Metode Runge Kutta Orde 4 yang memberikan hasil cukup akurat untuk perhitungan kinetika reaktor RSG-GAS. Langkah pertama, penentuan nilai densitas neutron awal (N_0), konsentrasi prekursor neutron awal (C_0), reaktivitas awal (ρ_0), fraksi neutron kasip (β_i), waktu generasi neutron kasip, dan konstanta peluruhan prekursor (λ_i). Langkah kedua, menyelesaikan persamaan diferensial densitas neutron dan konsentrasi prekursor dengan metode Runge Kutta Orde 4, Langkah ketiga, melakukan simulasi insersi reaktivitas step, sinusoidal dan reaktivitas fungsi densitas neutron. Langkah keempat, membuat visualisasi dengan Matlab. Data yang digunakan dalam perhitungan kinetika reaktor titik adalah data parameter kinetika teras TWC Silisida RSG-GAS pada Tabel V-17 LAK Rev. 11 tahun 2020. Hasil kajian menunjukkan bahwa penyelesaian persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Runge Kutta Orde 4 menunjukkan perilaku fluks neutron di dalam teras akibat insersi reaktivitas yang sesuai dengan teori kinetika reaktor. Hasil kajian juga dapat menggambarkan hubungan antara reaktivitas dengan fluks neutron dalam teras pada insersi reaktivitas undak (*step*), sinusoidal, dan reaktivitas fungsi densitas neutron.

Kata kunci : Kinetika, reaktor titik, fluks, reaktivitas, Runge Kutta.

ABSTRACT

SIMULATION OF NEUTRON FLUX BEHAVIOR IN RSG-GAS REACTOR USING RUNGE KUTTA METHOD. Modeling of the reactor as a point produces a set of pairs of ordinary differential equations known as point reactor kinetic equations. This equation is a first order simultaneous equation that describes the behavior of a time-dependent reactor. The point reactor kinetic equation can be solved numerically, one of which is the Runge Kutta Order 4 method. The Runge Kutta Order 4 method was chosen because it provides more accurate calculation results than the Taylor Series method, although the programming is relatively more difficult. Programming is done in FORTRAN language, while the calculation results are visualized with Matlab. This study

aims to describe the relationship between reactivity and neutron flux in the core using the Runge Kutta Order 4 Method. In this study, the accuracy of the methods discussed in previous studies was not compared. The calculation method used is the Runge Kutta Order 4 Method which gives quite accurate results for the calculation of RSG-GAS reactor kinetics. The first step is to determine the initial neutron density value (N_0), the initial neutron precursor concentration (C_0), the initial reactivity (ρ_0), the delayed neutron fraction (β_i), the delayed neutron generation time, and the precursor decay constant (λ_i). The second step is to solve the differential equations for neutron density and precursor concentration using the Runge Kutta Order 4 method. The third step is to simulate the insertion of step, sinusoidal reactivity and the reactivity of the neutron density function. The fourth step, create a visualization with Matlab. The data used in the calculation of point reactor kinetics is the kinetic parameter data of the RSG-GAS Silicide TWC core in Table V-17 LAK Rev. 11 of 2020. The results of the study show that the completion of the reactor point kinetic equation using the Runge Kutta Order 4 method shows the behavior of the neutron flux in the core due to the insertion of reactivity in accordance with the theory of reactor kinetics. The results of the study can also describe the relationship between reactivity and neutron flux in the core at the insertion of step, sinusoidal reactivity, and the reactivity of the neutron density function.

Keywords : Kinetic, point reactor, flux, reactivity, Runge Kutta.

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna GA. Siwabessy (RSG-GAS) merupakan salah satu reaktor riset di Indonesia. Reaktor RSG-GAS merupakan reaktor tipe kolam yang digunakan untuk penelitian, pelayanan iradiasi, serta kegiatan pendidikan dan pelatihan. Fasilitas Reaktor RSG-GAS dibangun berdasarkan konsep reaktor kolam terbuka dengan menggunakan air sebagai pendingin dan moderator serta menggunakan berilium sebagai reflektor. Reaktor RSG-GAS memiliki sistem kendali reaktivitas berupa penyerap jenis garpu yang memiliki keefektifan tinggi untuk kendali dan pemadaman reaktor. Batang kendali Reaktor RSG-GAS berjumlah 8 buah yang terbuat dari bahan AgInCd dengan konsentrasi masing-masing 80%, 15%, dan 5%. Sistem kendali reaktivitas berfungsi mengendalikan fluks neutron di teras dengan gerakan perangkat penyerap pada arah vertikal ke dalam dan ke luar bahan bakar kendali untuk mengatur reaktivitas teras reaktor[1].

Salah satu kriteria keselamatan dalam pengoperasian reaktor adalah bahwa operasi reaktor harus selalu dapat dipantau dan dikendalikan keadaannya dan dipadamkan pada setiap saat dan setiap kondisi[2]. Reaktivitas merupakan salah satu parameter penting dalam pengoperasian reaktor karena berkaitan langsung dengan pengendalian reaktor. Untuk analisis keselamatan dan perilaku transien reaktor, populasi neutron dan konsentrasi prekursor neutron kasip merupakan parameter yang penting untuk dikaji[3]. Daya reaktor berbanding lurus dengan fluks neutron[4]. Perubahan fluks neutron dalam teras Reaktor RSG-GAS dapat diketahui dari parameter reaktivitas teras. Sifat populasi neutron di teras reaktor sebagai fungsi gayut waktu akibat perubahan faktor perlipatan efektif merupakan kinetika reaktor. Sedangkan proses gayut waktu dalam penentuan faktor multiplikasi efektif sebagai fungsi tingkat daya reaktor merupakan dinamika reaktor. Kinetika dan dinamika reaktor sangat diperlukan dalam analisis keselamatan operasi reaktor[5].

Parameter kinetika reaktor memiliki peranan penting saat menyelesaikan permasalahan dinamika reaktor dengan pendekatan reaktor titik (*reactor point kinetic*). Pendekatan ini hanya berlaku pada kondisi bentuk fluks spasial yang tidak berubah terhadap waktu. Untuk penyederhanaan maka persamaan difusi neutron yang gayut ruang dan waktu disederhanakan menjadi persamaan diferensial simultan orde satu yang hanya gayut waktu. Penyelesaian persamaan kinetika reaktor titik dapat dilakukan secara numerik[6, 7]. Penelitian ini bertujuan untuk menggambarkan hubungan reaktivitas dengan fluks neutron dalam teras reaktor menggunakan metode Runge Kutta Orde 4.

TEORI

Persamaan Kinetika Reaktor Titik

Gambaran perilaku reaktor atau perilaku neutron di dalam reaktor yang gayut waktu (*kinetics*) akibat perubahan faktor perlipatan neutron di dalam reaktor dapat dinyatakan dalam persamaan kinetika reaktor[4]. Persamaan kinetika reaktor titik diturunkan dari persamaan difusi dengan asumsi pemisahan kegayutan hanya terhadap waktu[8, 9]. Persamaan kinetika reaktor titik merupakan sistem persamaan diferensial biasa berpasangan yang penyelesaiannya berupa kerapatan neutron dan konsentrasi prekursor neutron kasip sebagai fungsi waktu[10]. Persamaan kinetika reaktor merupakan persamaan simultan tingkat satu. Pemodelan reaktor sebagai sebuah titik mengabaikan distribusi spasial fluks neutron (*space independent point kinetic*) sehingga perilaku reaktor hanya gayut waktu. Penyelesaian persamaan kinetika reaktor menghasilkan perkiraan dinamika operasi reaktor dan fluktuasi daya yang dialami reaktor saat manuver daya *start*

up dan *shutdown*[11]. Persamaan kinetika reaktor ditunjukkan oleh persamaan (1) dan persamaan (2) berikut[12]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t)-\beta}{l} N(t) + \sum_{i=1}^I \lambda_i C_i(t) + Q \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} N(t) - \lambda_i C_i(t) \dots\dots\dots (2)$$

dengan:

- N(t) : fluks neutron pada waktu t
- $\rho(t)$: reaktivitas
- l : waktu generasi neutron
- Q : sumber neutron (neutron/s)
- $C_i(t)$: konsentrasi prekursor neutron kasip grup ke-i
- λ_i : konstanta peluruhan prekursor neutron kasip grup ke-i
- β_i : fraksi neutron kasip efektif grup ke-i
- i : total jumlah grup neutron kasip, i=1, ..., 6

Persamaan (1) dan (2) merupakan satu paket persamaan diferensial densitas neutron dan konsentrasi prekursor neutron kasip pada reaktor.

Metode Runge Kutta Orde 4 Penyelesaian Persamaan Kinetika Reaktor Titik

Persamaan kinetika reaktor titik diselesaikan dengan model reaktor dengan paling sedikit memiliki 6 grup prekursor neutron kasip sehingga menghasilkan tujuh pasang persamaan diferensial. Penyelesaian secara analitis tidak memungkinkan untuk dilakukan karena kompleksitas permasalahan sehingga digunakan penyelesaian secara numerik. Pada kajian ini digunakan metode Runge Kutta Orde 4.

Konsep-konsep penyelesaian numerik dari persamaan diferensial dengan metode Runge Kutta Orde 4 dapat dijabarkan dengan tahap-tahap sebagai berikut[13]:

Pada titik awal misalkan (x_n, y_n) , nilai gradien atau kemiringannya ditentukan sebagai berikut:

$$K_1 = f(x_n, y_n) \dots\dots\dots (3)$$

Nilai gradien pengontrol kedua adalah:

$$K_2 = f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}h.K_1) \dots\dots\dots (4)$$

Nilai gradien pengontrol ketiga adalah:

$$K_3 = f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}h.K_2) \dots\dots\dots (5)$$

Nilai gradien pengontrol keempat adalah:

$$K_4 = f(x_n + \frac{1}{2}h, y_n + \frac{1}{2}h.K_3) \dots\dots\dots (6)$$

Dengan demikian nilai gradien untuk menentukan titik selanjutnya di (x_{n+1}, y_{n+1}) , adalah merupakan kombinasi dari K_1, K_2, K_3 dan K_4 yang dirumuskan dengan:

$$K = \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \dots\dots\dots (7)$$

Dengan menggunakan rumus *Euler*, nilai dari $y_{n+1} = y_n + h.K$ dirumuskan sebagai berikut:

$$y_{n+1} = y_n + h \cdot \frac{1}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (8)$$

Persamaan (8) merupakan persamaan yang digunakan dalam penyelesaian numerik persamaan diferensial dengan metode Runge Kutta Orde 4.

METODOLOGI

Metode yang digunakan dalam kajian ini meliputi:

1. Studi pustaka tentang kinetika reaktor titik dan Metode Runge Kutta Orde 4.
2. Membuat algoritma penyelesaian persamaan dan kode program dengan FORTRAN untuk perhitungan dan menggunakan Matlab untuk visualisasi hasil perhitungan
3. Membuat simulasi-simulasi dengan inputan reaktivitas undak (*step*), sinusoidal, dan reaktivitas sebagai fungsi densitas neutron menggunakan data pada Tabel 1.
4. Analisis hasil simulasi.

Tabel 1. Data Fraksi Prekursor Reaktor RSG-GAS[1]

Grup	β_i	λ_i
1	$2,74409 \cdot 10^{-4}$	$1,27039 \cdot 10^{-2}$
2	$1,52818 \cdot 10^{-3}$	$3,16818 \cdot 10^{-2}$
3	$1,35854 \cdot 10^{-3}$	$1,15611 \cdot 10^{-1}$
4	$2,90688 \cdot 10^{-3}$	$3,11763 \cdot 10^{-1}$
5	$9,26148 \cdot 10^{-4}$	1,39968
6	$1,92124 \cdot 10^{-4}$	3,86538
Fraksi neutron kaspip total		$7,18629 \cdot 10^{-3}$
Konstanta peluruhan neutron kaspip total		$7,84341 \cdot 10^{-2}/s$
Umur neutron serentak		64,5126 μs

Langkah perhitungan dengan Metode Runge Kutta Orde 4 yang dilakukan adalah[14]:

1. Menentukan nilai densitas neutron awal (N_0), konsentrasi prekursor neutron awal (C_0), reaktivitas awal (ρ_0), fraksi neutron kasip (β_i), waktu generasi neutron kasip, konstanta peluruhan prekursor (λ_i). Konsentrasi prekursor neutron awal ditentukan dengan persamaan (9). Menentukan nilai perubahan waktu (h)

$$C_i(0) = \frac{\beta_i N_0}{\lambda_i} \dots \dots \dots (9)$$

2. Menghitung nilai perubahan densitas neutron gayut waktu sesuai persamaan (1) dengan menggunakan data awal
3. Menghitung nilai perubahan konsentrasi prekursor neutron kasip gayut waktu sesuai persamaan (2)
4. Menghitung nilai densitas neutron pada ($t+h$) dengan menerapkan persamaan (8)
5. Menghitung nilai konsentrasi prekursor neutron kasip pada ($t+h$) dengan menerapkan persamaan (8)
6. Mengulangi langkah 5 dan 6 sampai batas waktu iterasi tercapai.
7. Hasil perhitungan disimpan dalam sebuah file tipe text, misalnya 'PRSG_RK.txt'.

Langkah visualisasi hasil perhitungan dengan Matlab:

1. Membuka file tipe text, misalnya 'PRSG_RK.txt'
2. Membaca data dari file 'PRSG_RK.txt' yang terdiri dari dua kolom sebanyak $(t-h)/h$ baris
3. Menyimpan data kolom pertama dalam variabel t dan data kolom kedua dalam variabel y .
4. Membuat grafik berdasarkan data t dan y .

Algoritma yang telah dibuat kemudian diuji dengan tiga macam insersi reaktivitas:

1. Insersi reaktivitas undak (*step*)
2. Insersi reaktivitas sinusoidal dengan persamaan berikut:

$$\rho(t) = \beta \sin\left(\frac{\pi t}{5}\right) \dots \dots \dots (10)$$

3. Insersi reaktivitas fungsi densitas neutron dengan persamaan berikut:

$$\rho(t) = \frac{\beta}{10} N(t) \dots \dots \dots (11)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perhitungan, nilai densitas neutron awal (N_0) merupakan nilai awal yang ditentukan, sedangkan nilai konsentrasi prekursor neutron awal (C_0) ditentukan dengan persamaan (9). Nilai fraksi neutron kasip (β_i), waktu generasi neutron kasip (l), konstanta peluruhan prekursor (λ_i) merupakan data dari Tabel 1. Data Fraksi Prekursor Reaktor RSG-GAS. Nilai reaktivitas awal (ρ_0) merupakan masukan yang dipilih dan menggambarkan kondisi yang diujikan. Kondisi yang diujikan dalam makalah ini meliputi reaktivitas undak (*step reactivity*), *sinusoidal*, *zigzag* dan reaktivitas sebagai fungsi dari densitas neutron.

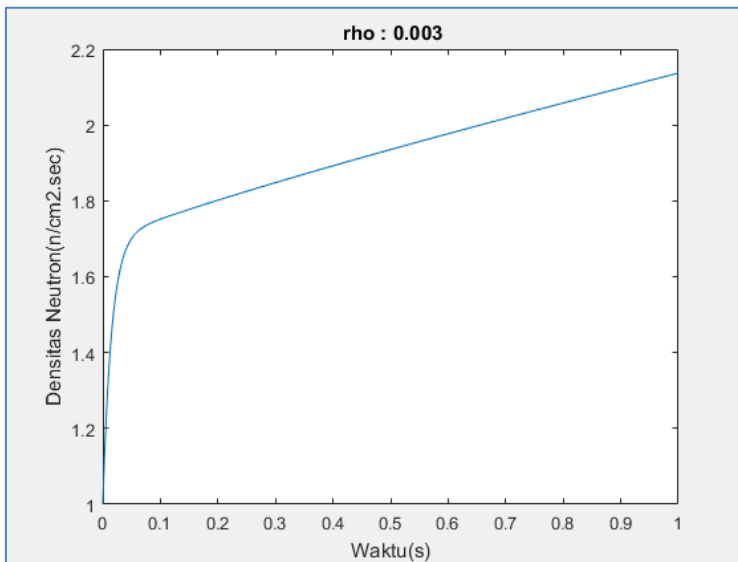
Hasil perhitungan pada insersi *prompt subcritical step reactivity* $\rho = 0,003\%$ ditunjukkan pada Tabel 2. Grafik perubahan densitas neutron akibat insersi reaktivitas untuk waktu selama 1 detik, 10 detik, dan 20 detik ditunjukkan pada Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3.

Tabel 2. Hasil perhitungan pada insersi *prompt subcritical step reactivity* $\rho = 0,003$ \$

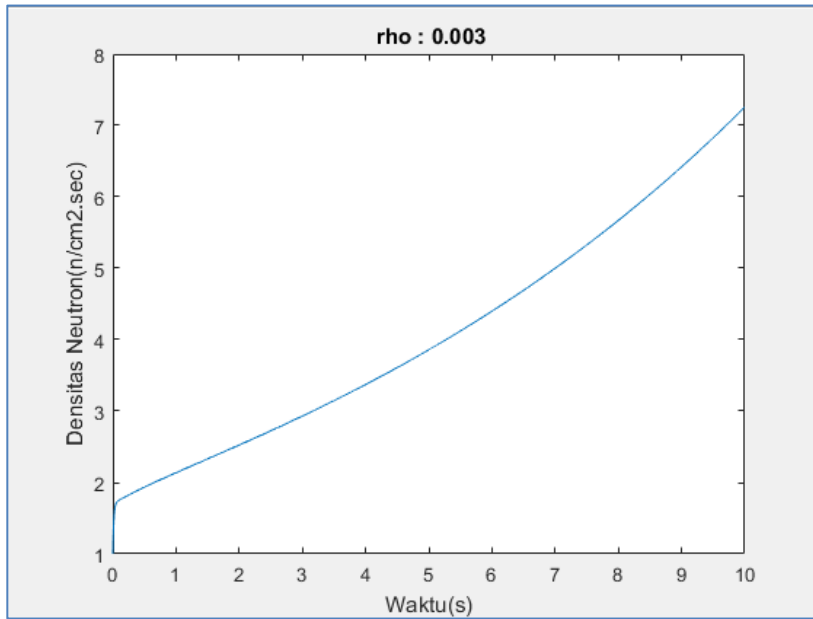
No.	Waktu (s)	Densitas Neutron (n/cm ² .s)
1.	1	2,1369
2.	10	7,2566
3.	20	23,7887

Pada awal grafik densitas neutron terjadi kenaikan yang tajam sampai sekitar waktu 0,05 detik, dan selanjutnya kenaikannya melandai. Kejadian seperti ini disebut dengan lompatan serentak

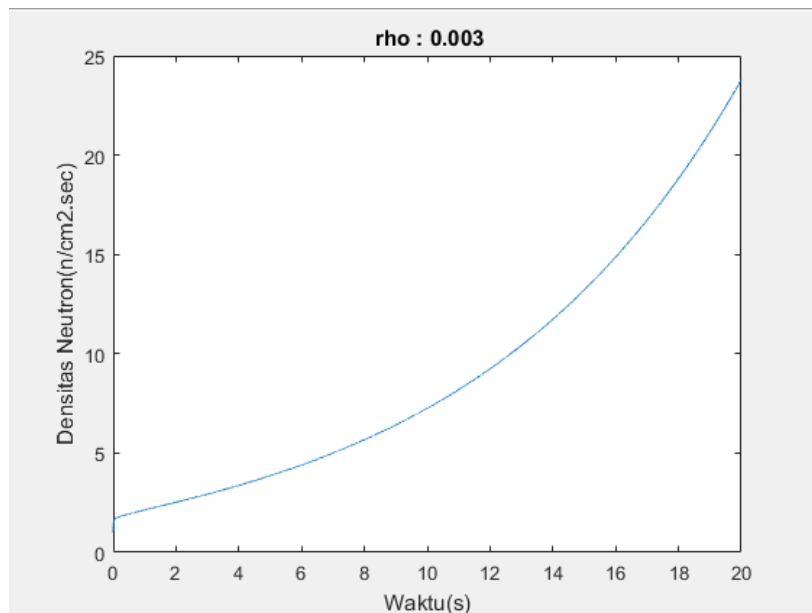
(*prompt jump*). Lompatan serentak disebabkan oleh neutron cepat. Selanjutnya kenaikan densitas neutron dipengaruhi oleh neutron kasip secara dominan.



Gambar 1. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,003$ \$ pada iterasi selama 1 detik



Gambar 2. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,003$ \$ pada iterasi selama 10 detik



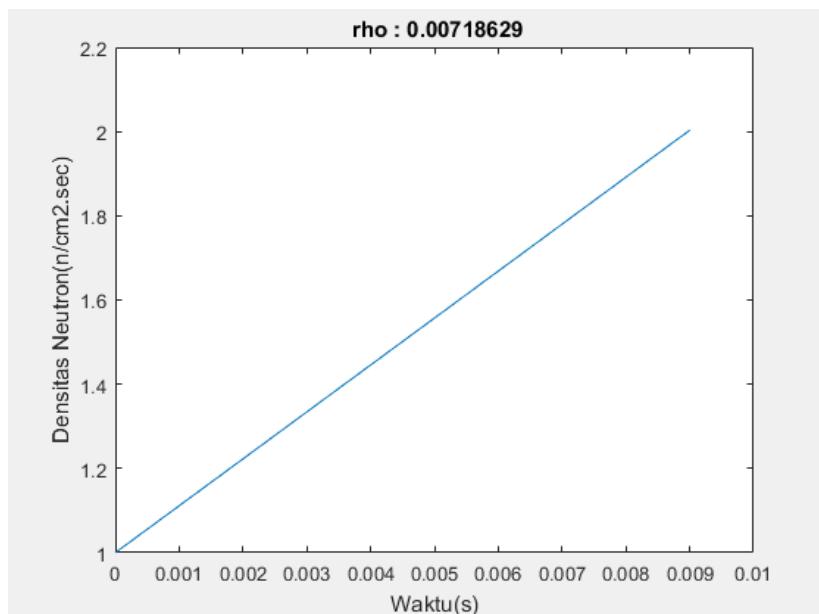
Gambar 3. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,003$ \$ pada iterasi selama 20 detik

Pada Gambar 1, Gambar 2, dan Gambar 3 ditunjukkan bahwa ketika $\rho < \beta$ maka yang terjadi adalah kondisi subkritis serempak. Jumlah neutron akan berkurang dengan sangat cepat karena tanpa adanya neutron kasip. Karena emisi neutron kasip berkurang maka jumlah neutron juga akan mengalami *delay*. Kondisi ini terjadi pada saat reaktor sudah

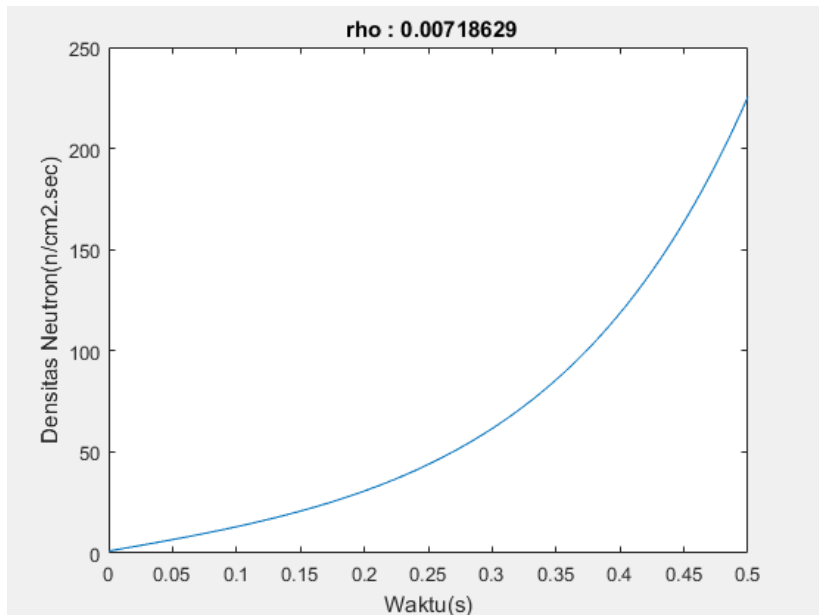
dipadamkan tetapi masih ada banyak neutron di teras. Saat reaktor dimatikan (*shutdown*), meskipun batang kendali sudah dimasukkan ke dalam teras (*fully down*) tetapi jumlah neutron tidak langsung bernilai nol, hal ini terjadi karena adanya prekursor inti dan peluruhan yang terjadi secara teratur dengan emisi peluruhan neutron.

Tabel 3. Hasil perhitungan pada insersi *prompt critical step reactivity* $\rho = 0,00718629$ \$

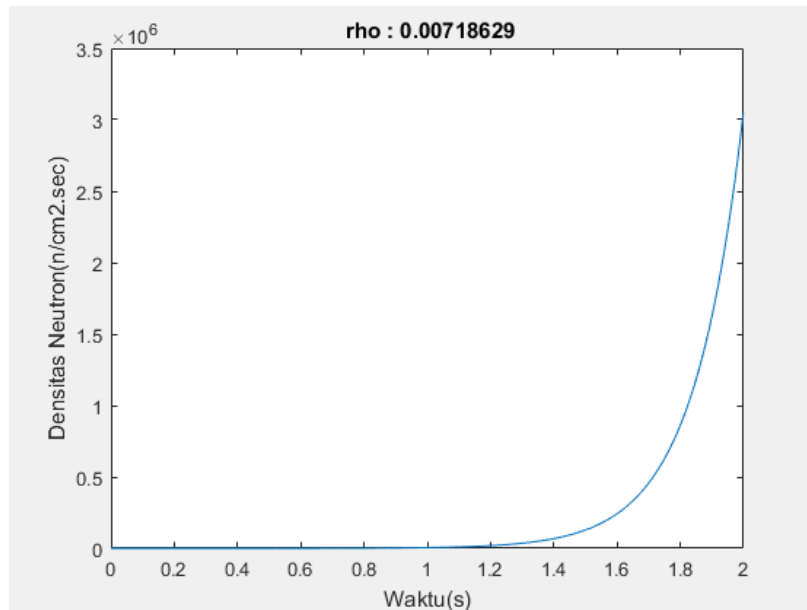
No.	Waktu (s)	Densitas Neutron (n/cm ² .s)
1.	0,01	2,0032
2.	0,02	3,1227
3.	0,05	6,6817
4.	0,1	12,8964
5.	0,5	225,5584
6.	2	3.044.274,0



Gambar 4. Densitas Neutron untuk $\rho = \beta$ pada iterasi selama 0,01 detik



Gambar 5. Densitas Neutron untuk $\rho = \beta$ pada iterasi selama 0,5 detik



Gambar 6. Densitas Neutron untuk $\rho = \beta$ pada iterasi selama 2 detik

Pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6 ditunjukkan bahwa ketika $\rho = \beta$ maka yang terjadi adalah kondisi kritis

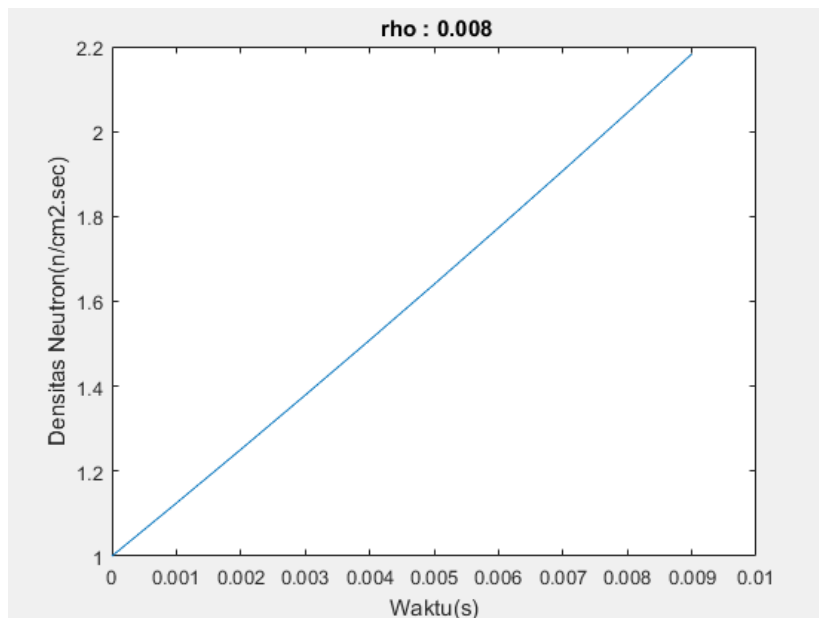
serempak. Perubahan jumlah neutron disebabkan oleh peluruhan prekursor inti yang cukup besar. Sebagaimana jumlah

peluruhan inti prekursor yang cukup besar maka neutron kasip yang dihasilkan juga cukup banyak. Dalam waktu 0,5 sekon, jumlah neutron bertambah menjadi 225 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3. Pengendalian reaktor dengan sisipan

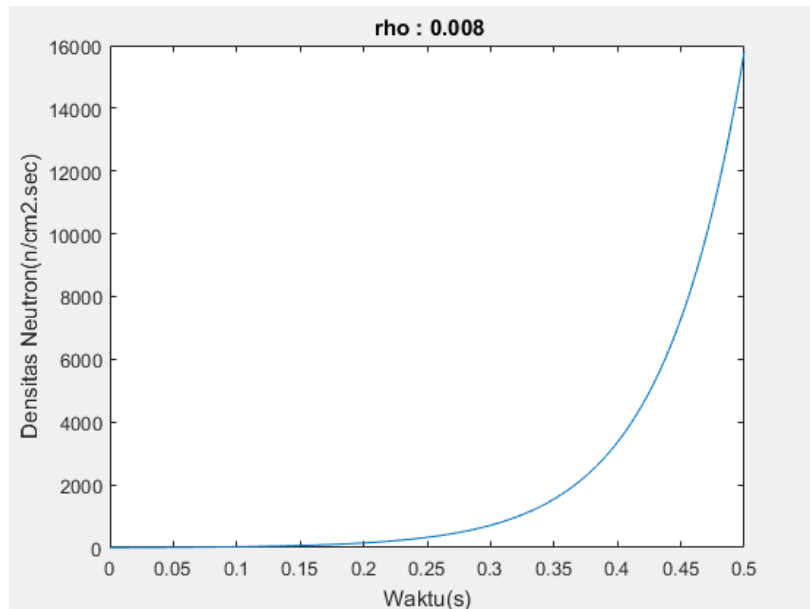
reaktivitas yang besarnya sama dengan fraksi neutron kasip harus dihindarkan karena dalam waktu satu detik, jumlah neutron meningkat dengan faktor ratusan kali.

Tabel 4. Hasil perhitungan pada insersi *prompt super critical step reactivity* $\rho = 0,008$ \$

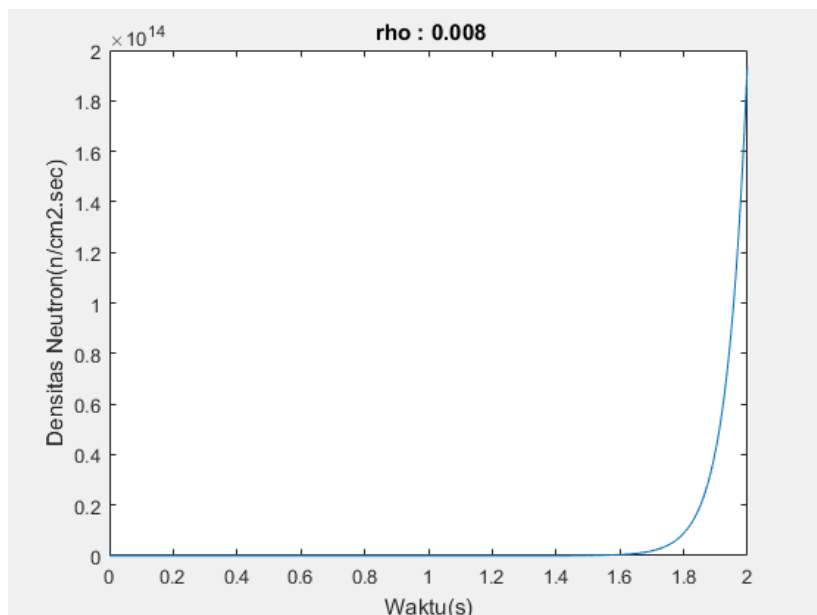
No.	Waktu (s)	Densitas Neutron (n/cm ² .cm)
1.	0,01	2,1827
2.	0,02	3,6702
3.	0,05	9,8132
4.	0,1	27,3140
5.	0,5	15822,0488
6.	2	1,9319e+14



Gambar 7. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,008$ \$ pada iterasi selama 0,01 detik



Gambar 8. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,008$ pada iterasi selama 0,5 detik



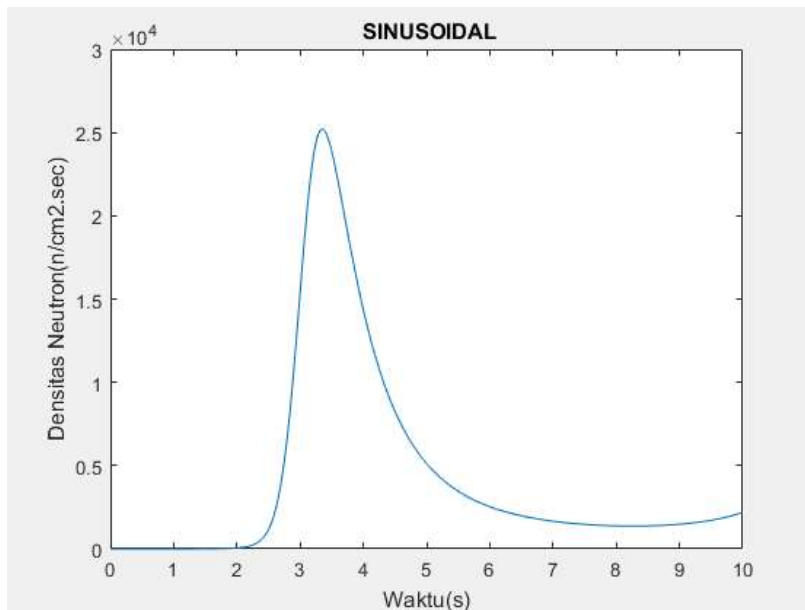
Gambar 9. Densitas Neutron untuk $\rho = 0,008$ pada iterasi selama 2 detik

Pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 ditunjukkan bahwa ketika $\rho > \beta$ maka yang terjadi adalah kondisi superkritis serempak. Pada kondisi super

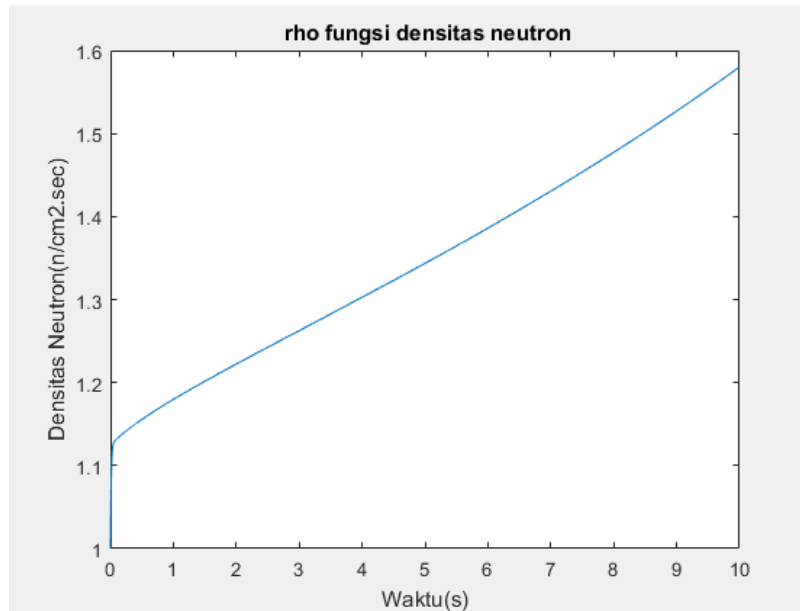
kritis serempak, jumlah neutron bertambah dengan sangat cepat, neutron kasip dihasilkan tetapi tidak dianggap penting untuk berlangsungnya reaksi berantai. Reaksi fisi berantai hanya berlangsung dan hanya disebabkan oleh neutron serempak, keberadaan neutron kasip terabaikan. Dalam waktu 0,5 sekon, jumlah neutron bertambah menjadi 15822 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Pengendalian reaktor dengan sisipan reaktivitas lebih besar dari fraksi neutron kasip harus dihindarkan karena dalam waktu satu detik, jumlah neutron meningkat dengan faktor 15000 kali.

Reaktivitas sinusoidal adalah reaktivitas gayut waktu yang dinyatakan dalam persamaan (10). Hasil simulasi dengan reaktivitas sinusoidal ditunjukkan pada Gambar 10.

Pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9 ditunjukkan bahwa ketika $\rho > \beta$ maka yang terjadi adalah kondisi superkritis serempak. Pada kondisi super kritis serempak, jumlah neutron bertambah dengan sangat cepat, neutron kasip dihasilkan tetapi tidak dianggap penting untuk berlangsungnya reaksi berantai. Reaksi fisi berantai hanya berlangsung dan hanya disebabkan oleh neutron serempak, keberadaan neutron kasip terabaikan. Dalam waktu 0,5 sekon, jumlah neutron bertambah menjadi 15822 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4. Pengendalian reaktor dengan sisipan reaktivitas lebih besar dari fraksi neutron kasip harus dihindarkan karena dalam waktu satu detik, jumlah neutron meningkat dengan faktor 15000 kali.



Gambar 10. Densitas Neutron untuk ρ sinusoidal pada iterasi selama 10 detik



Gambar 11. Densitas Neutron untuk ρ fungsi densitas neutron pada iterasi selama 10 detik.

Reaktivitas fungsi densitas neutron adalah reaktivitas gayut waktu yang dinyatakan dalam persamaan (11). Hasil simulasi dengan reaktivitas fungsi densitas neutron ditunjukkan pada Gambar 11.

Hasil simulasi insersi reaktivitas step, sinusoidal dan reaktivitas fungsi densitas neutron yang telah dilakukan

dengan menggunakan data teras Reaktor RSG-GAS dengan Metode Runge Kutta Orde 4 menunjukkan hasil yang bersesuaian dengan penelitian yang telah dilakukan oleh [10, 14, 15]. Simulasi yang dilakukan telah menggambarkan hubungan reaktivitas dengan fluks neutron dalam teras Reaktor RSG-GAS.

KESIMPULAN

Penyelesaian persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Runge Kutta Orde 4 dapat menunjukkan perilaku fluks neutron di dalam teras akibat insersi reaktivitas. Perubahan fluks neutron akibat insersi reaktivitas undak (*step*), sinusoidal dan reaktivitas fungsi densitas neutron sesuai dengan teori kinetika reaktor. Simulasi kinetika reaktor dengan program komputer dapat menggambarkan hubungan antara

reaktivitas dengan fluks neutron dalam teras pada insersi reaktivitas undak (*step*), sinusoidal, dan reaktivitas fungsi densitas neutron.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PRSG-BATAN, *Laporan Analisis Keselamatan Rev. 11*. Dokumen Keselamatan Operasi Reaktor, 2020. 1(2020): p. 1-1..
- [2] Kuntoro, I., *Keselamatan Nuklir*. 2019: Pusdiklat BATAN.
- [3] Yamoah, S., et al., *Analytical Solution of the Point Reactor Kinetics Equations for One-Group of Delayed Neutrons for a Discontinuous Linear Reactivity Insertion*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2012. 4(21): p. 4320-4324.
- [4] Syarip, *Kinetika dan Pengendalian Reaktor Nuklir*. Book, 2019.
- [5] Pusdiklat-BATAN, *Fisika Reaktor*. Modul Pelatihan Penyegaran Operator dan Supervisor. 2010.
- [6] Hopkins, L., A. Gerlach, and H.O. Wooten, *A Comparison of Numerical Solutions to the General Neutron Point Reactor Kinetics Equations New Mexico AiS Challenge Final Report April 7, 2004*. 2004.
- [7] Quabili, E.R. and M. Karasulu, *Methods for solving the stochastic point reactor kinetic equations*. Annals of Nuclear Energy, 1979. 6(3): p. 133-143.
- [8] Moniz, M., *Reactivity Meter Analysis of Rod Drop Experiment In ZED-2*. Thesis, 1975.
- [9] Agung, A., *Analisis Reaktor Nuklir*. Book, 2017.
- [10] McMahan, D. and A. Pierson, *A Taylor series solution of the reactor point kinetics equations*. arXiv preprint arXiv:1001.4100, 2010.
- [11] Upadhyay, R., et al., *A numerical solution of the point kinetics equations and its validation*. Mathematical Sciences International Research Journal, 2014. 3: p. 993-1005.
- [12] Duderstadt, J.J., *Nuclear Reactor Analysis*. Book, 1941.
- [13] Chapra, S.C. and R.P. Canale, *Numerical methods for engineers*. Vol. 1221. 2011: Mcgraw-hill New York.
- [14] Cahyono, A., D. Handoyo, and K. Handoko, *Pemrograman Persamaan Kinetika Reaktor Titik dengan LabView*. 2011.
- [15] Quintero-Leyva, B., *CORE: a numerical algorithm to solve the point kinetics equations*. Annals of Nuclear Energy, 2008. 35(11): p. 2136-2138. Standar Operasional Prosedur, "Pengelolaan Batu Topaz Pasca Iradiasi," nomor: SOP 008.003/RN.00.01/ RSG.2.1, 2016.