

Analisis Kecelakaan Reaktor *Transient Over Power* (TOP) Reaktor SCWR (*Supercritical Cooled Water Reactor*)

Abdullah Haris^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, Syafriadi⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung
Bandar Lampung 35145

*E-mail koresponden: aristdk123@gmail.com

Diterima (4 September 2017), Direvisi (22 September 2017)

Abstract. *Research about TOP reactor accident analysis for SCWR reactor used thorium fuel has been done. The objective of this research is to solve point reactor kinetic equation by Taylor method and to analyze TOP reactor accident. Point reactor kinetic equation has first order differential equation to calculate relative power behavior due to reactivity which can be solved with MATLAB program. Initial reactivity used three variation these are 0,0025; 0,00315; and 0,005. The analysis results showed exponential pattern for reactivity without feedback had obtained power density was 5314,72 Watt/cm³ and fuel temperature was 13717,5 K at t = 1 s. While on reactivity used feedback has given stable conditions had obtained power density was 204,765 Watt/cm³ and fuel temperature was 636,1 K at t = 1 s.*

Keywords : *Point reactor kinetics, nuclear accident, SCWR, and MATLAB.*

Abstrak. Penelitian mengenai analisis kecelakaan reaktor TOP untuk reaktor SCWR berbahan bakar thorium telah dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelesaikan persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Taylor dan menganalisis kecelakaan reaktor TOP. Persamaan kinetika reaktor titik adalah persamaan differensial tingkat satu untuk menghitung daya relatif dipengaruhi oleh reaktivitas yang dapat diselesaikan dengan program MATLAB. Reaktivitas awal menggunakan tiga variasi yaitu 0,0025; 0,00315; dan 0,005. Hasil analisis menunjukkan pola eksponensial untuk reaktivitas tanpa *feedback* dengan rapat daya sebesar 5314,72 Watt/cm³ dan temperatur *fuel* sebesar 13717,5 K pada t = 1 s. Sedangkan pada reaktivitas menggunakan *feedback* didapatkan kondisi stabil dengan rapat daya sebesar 204,765 Watt/cm³ dan temperatur *fuel* sebesar 636,1 K pada t = 1 s.

Kata kunci: Kinetika reaktor titik, kecelakaan nuklir, SCWR, dan MATLAB.

PENDAHULUAN

Energi nuklir adalah salah satu alternatif sumber energi yang dapat dijadikan solusi pada permasalahan energi saat ini. Selain untuk menghemat cadangan energi fosil di bumi, energi nuklir juga tidak menimbulkan efek gas rumah kaca. Energi nuklir merupakan satu alternatif diantara berbagai sumber energi lainnya [1].

Meskipun teknologi nuklir sudah semakin menunjukkan kehandalannya, namun masih banyak ditentang oleh tokoh masyarakat maupun aktivis lingkungan hidup. Permasalahan yang dikhawatirkan terjadi adalah resiko terjadinya kecelakaan nuklir. Sistem proteksi dan pengaman

diperlukan dalam melindungi dan menekan konsekuensi kecelakaan. Bekerjanya sistem proteksi dan pengaman harus tepat untuk menjaga keutuhan teras. Ketidaktepatan dalam perlindungan akan dapat memberikan pemanasan berlebih pada selongsong bahan bakar. Akibat dari pemanasan yang gagal dikendalikan, maka kondisi titik leleh selongsong bahan bakar akan tercapai [2].

Ada banyak jenis kecelakaan reaktor yang mungkin terjadi, misalnya kecelakaan reaktor karena gagalnya batang kendali yang berfungsi untuk mengendallikan populasi neutron dalam reaktor. Jika batang kendali ini gagal, maka populasi neutron akan naik dengan sangat cepat. Jumlah

neutron yang tidak terkendali dalam reaktor akan menyebabkan kenaikan daya, dan temperatur.

Kecelakaan tersebut disebut UTOP (*Unprotected Transient Over Power*). Akibat dari kecelakaan tersebut dapat membuat bahan bakar reaktor meleleh. Sehingga radiasi nuklir akan keluar dari reaktor yang membahayakan alam sekitar reaktor tersebut berdiri [3]. Satu aspek penting dari program simulator PLTN ini adalah aspek neutronik. Untuk menyederhanakan proses simulasi dinamika reaktor, sistem teras reaktor dimodelkan sebagai suatu titik. Pemodelan reaktor tersebut melahirkan persamaan kinetika reaktor yang dikenal sebagai persamaan kinetika reaktor titik. Sehingga diperoleh persamaan differensial simultan tingkat satu yang menghubungkan reaktivitas dengan populasi neutron [4]. Metode numerik untuk penyelesaian persamaan kinetika reaktor yang relatif lebih sederhana dan memberikan hasil yang memuaskan adalah metode Taylor. Metode Taylor ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan differensial tingkat pertama dari persamaan kinetika reaktor yang menghubungkan densitas neutron dan konsentrasi prekursor neutron kasip.

Keunggulan metode Taylor adalah bahwa metode ini lebih sederhana dan sangat akurat [4]. Pada penelitian ini akan menyajikan suatu pemograman persamaan kinetika reaktor titik yang diselesaikan dengan metode numerik deret Taylor. Perangkat lunak yang akan digunakan adalah MATLAB (*Matrix Laboratory*). MATLAB merupakan sistem interaktif dengan elemen basis data berupa *array* [5]. Kohler melakukan penelitian dengan menganalisis pengaruh pada reaktor dengan

model suatu titik. Model tersebut mempertimbangkan penambahan daya, temperatur, dan energi *prompt supercritical excursion* [6]. Pada penelitian lainnya, Chen melakukan analisis numerik untuk proses *prompt supercritical* pada reaktor nuklir dengan temperatur *feedback* dan daya awal [7]. Dam juga melakukan penelitian persamaan kinetika reaktor titik untuk mengetahui pengaruh reaktivitas temperatur *feedback* linear. Model tersebut mempertimbangkan panas inti setelah hilangnya pendingin yang batasannya adiabatik [8].

METODE PENELITIAN

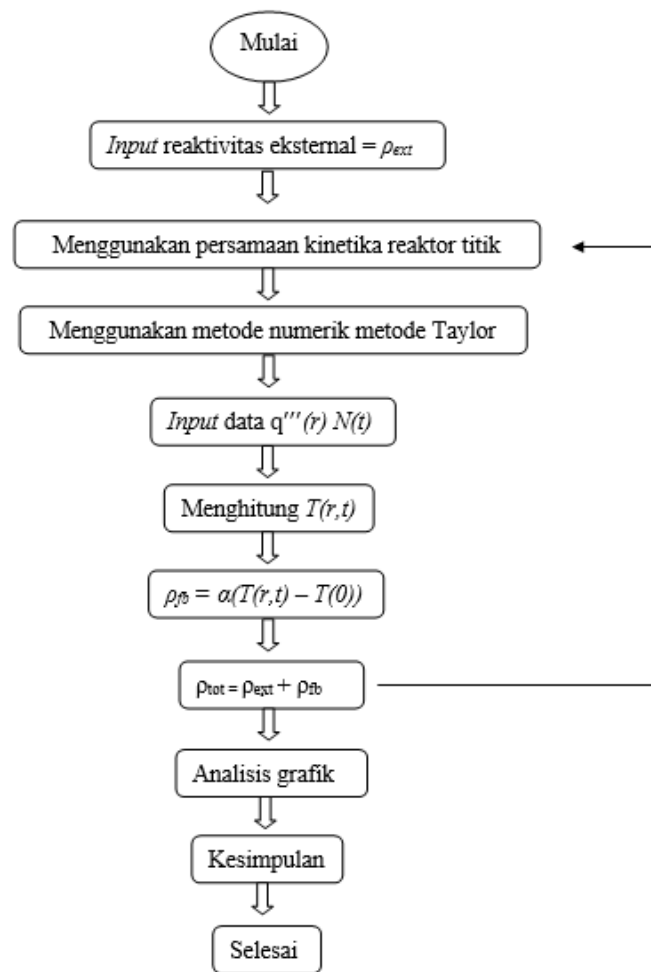
Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebuah laptop dengan OS (*Operating System*) Windows 10 dan program MATLAB (*Matrix Laboratory*). Penelitian ini menggunakan persamaan kinetika reaktor titik yang merupakan suatu sistem persamaan differensial daya relatif dan konsentrasi prekursor neutron tunda (**Persamaan 1 dan 2**).

$$\frac{dn}{dt} = \left[\frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} \right] n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

Adapun untuk menghitung C_i awal menggunakan **Persamaan 3**.

$$C_i(0) = \frac{\beta_i N(0)}{\lambda_i \Lambda} \quad i = 1, \dots, 6 \quad (3)$$



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Untuk mempermudah perhitungan persamaan kinetika reaktor titik dengan metode Taylor dilakukan dengan bahasa pemrograman yang dibuat dengan menggunakan *software* MATLAB dengan diagram seperti pada **Gambar 1**. Sebelum melakukan proses *run* diawali dengan memasukan nilai *input* data daya relatif awal (N_0), konsentrasi prekursor awal (C_0), fraksi neutron tunda (β), reaktivitas awal (ρ), konstanta peluruhan neutron tunda (λ), waktu generasi neutron (Λ), dan ukuran langkah (h). Apabila proses *run* telah

selesai maka akan didapat data dan grafik yang dapat dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Persamaan kinetika reaktor titik sangat sulit diselesaikan secara analitis. Oleh karena itu, untuk mempermudah perhitungan dilakukan penyelesaian dengan metode numerik. Adapun metode numerik yang digunakan adalah metode Taylor. Sehingga **Persamaan 1** dan **2** dapat ditulis menjadi:

$$N(t+h) = N(t) + h \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} N(t) + h \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \tag{4}$$

$$C_i(t+h) = C_i(t) + h \frac{\beta_i}{\Lambda} N(t) - h \lambda_i C_i(t) \quad i = 1, \dots, 6 \tag{5}$$

Nilai parameter masukan yang digunakan pada penelitian ini diawali dengan memasukkan nilai fraksi neutron tunda total $\beta = 0,0029$, nilai ukuran langkah $h = 0,001$ dan daya relatif awal $N_0 = 1$. Sedangkan untuk nilai reaktivitas awal dimasukkan beberapa variasi nilai yaitu $\rho = 0,0025$, $\rho = 0,00315$, dan $\rho = 0,005$. Variasi nilai reaktivitas awal bertujuan untuk menganalisis pengaruh reaktivitas terhadap nilai yang dihasilkan. Adapun nilai waktu generasi neutron sebesar $\Lambda = 0,00002$ s. Nilai peluruhan neutron tunda dan fraksi neutron tunda uranium-233 [9]:

$$\lambda_1 = 0,0126 \text{ s}^{-1}; \lambda_2 = 0,0334 \text{ s}^{-1}; \lambda_3 = 0,131 \text{ s}^{-1}; \lambda_4 = 0,302 \text{ s}^{-1}; \lambda_5 = 1,27 \text{ s}^{-1}; \lambda_6 = 3,13 \text{ s}^{-1}; \beta_1 = 0,0002494; \beta_2 = 0,0007946; \beta_3 = 0,0006583; \beta_4 = 0,0009193; \beta_5 = 0,0002117; \beta_6 = 0,0000667$$

Pada penelitian ini menggunakan reaktivitas tanpa menggunakan *feedback* dan reaktivitas menggunakan *feedback*. Hal tersebut bertujuan untuk menganalisis perbedaan antara keduanya. Adapun persamaan reaktivitas menggunakan *feedback* tertera pada **Persamaan 6**.

$$\rho_{fb} = \alpha(T(r,t) - T(0)) \quad (6)$$

$$\rho_{tot} = \rho_{ext} + \rho_{fb} \quad (7)$$

Pada penelitian ini menggunakan koefisien reaktivitas thorium untuk menghitung reaktivitas *feedback*. Adapun nilai koefisien reaktivitas yang digunakan adalah nilai koefisien reaktivitas thorium yang telah diteliti oleh Dobuchi yaitu $\alpha = -5,95 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ [10].

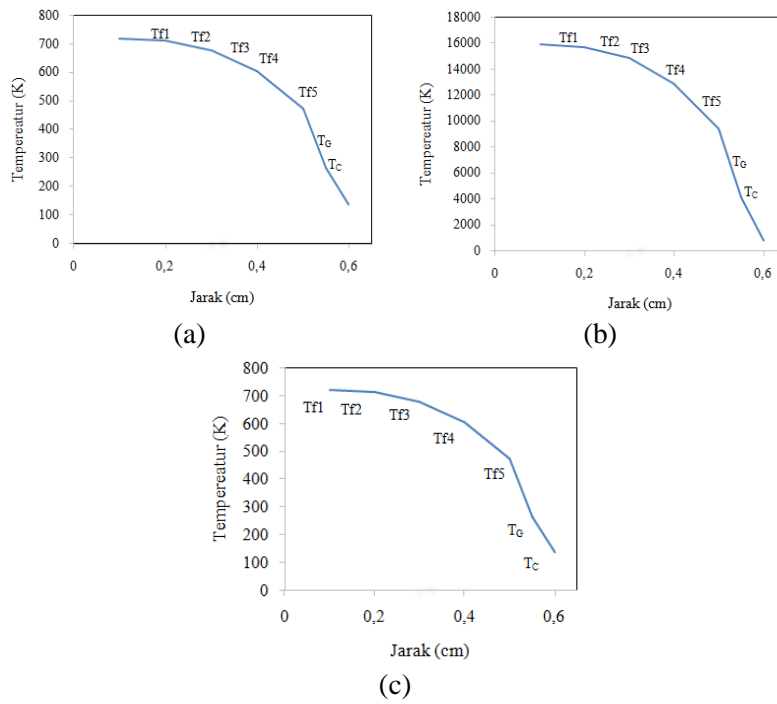
Pada penelitian ini dilakukan perhitungan untuk mengetahui temperatur elemen bahan bakar yang terdiri dari *fuel* adalah bahan bakar menggunakan thorium

dioksida (ThO_2), *gap* adalah celah antara *fuel* menggunakan helium (He), dan *clad* adalah selongsong menggunakan zirkonium (Zr). Adapun nilai $r_f = 0,5$ cm dan $k_f \text{ ThO}_2$ sebesar $0,0062 \text{ W/cmK}$ [11]. Dengan nilai $k_G = 0,002 \text{ W/cmK}$; $t_G = 0,005$ cm; $k_C = 0,11 \text{ W/cmK}$; dan $t_C = 0,053$ cm [12]. Perhitungan temperatur dilakukan pada titik *hotspot* (nilai daya yang tertinggi) dengan nilai daya sebesar $204,7664 \text{ Watt/cm}^3$ dan temperatur air sebesar $385 \text{ }^\circ\text{C}$ atau 112 K [13].

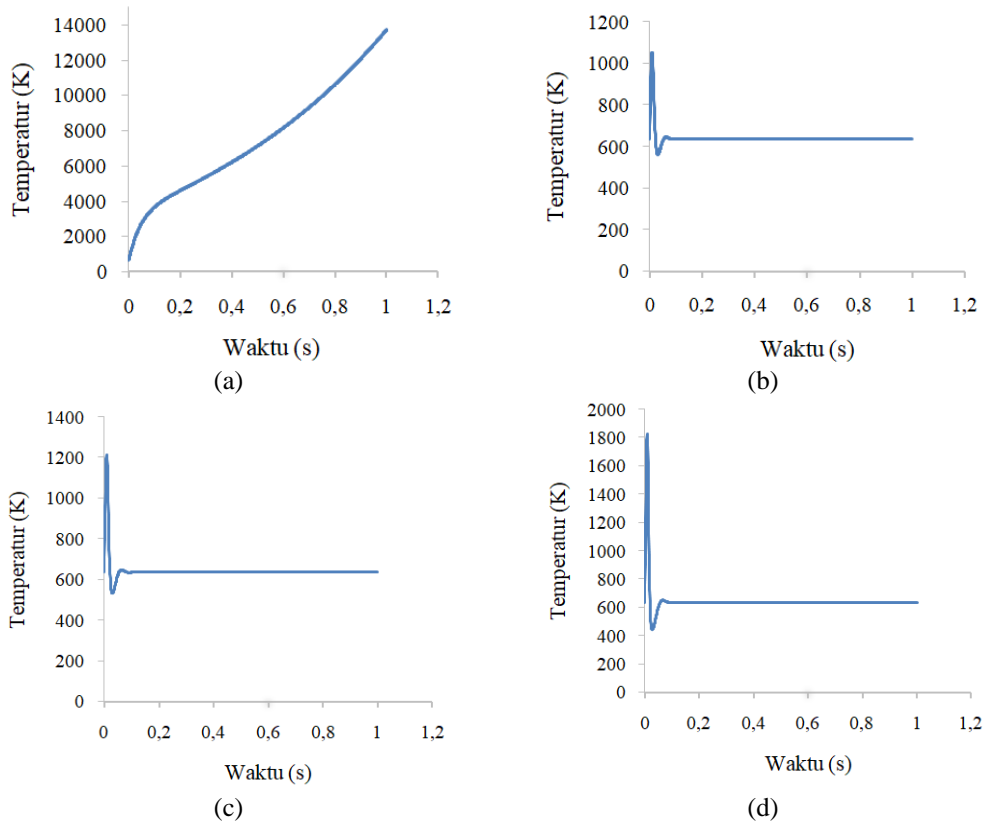
Dapat dilihat pada grafik, temperatur *fuel* jauh lebih besar dibanding temperatur *gap* dan *clad*. Karena pada *fuel* merupakan tempat terjadinya reaksi fisi, sedangkan temperatur pada *gap* dan *clad* hanya dikarenakan konveksi dari *fuel*. Dapat kita lihat dari **Gambar 2 (b)** temperatur yang tidak menggunakan *feedback* menghasilkan temperature *fuel* pertama yang sangat tinggi sebesar 15860 K pada $t = 1$ s. Sedangkan pada temperatur yang menggunakan *feedback* menghasilkan temperatur seperti temperatur awal sebesar $718,7 \text{ K}$ pada saat $t = 1$ s.

Pada penelitian ini juga dilakukan analisis temperatur *fuel* terhadap waktu. Analisis temperatur *fuel* yang dihitung terhadap waktu merupakan temperatur *fuel* rata-rata dari lima temperatur *fuel*. Dapat kita lihat dari **Gambar 3** temperatur *fuel* rata-rata tanpa *feedback* terus meningkat secara cepat dengan jumlah yang sangat besar pada $t = 1$ s didapatkan temperatur $13717,5 \text{ K}$. Kondisi ini yang dapat menyebabkan melelehnya teras reaktor.

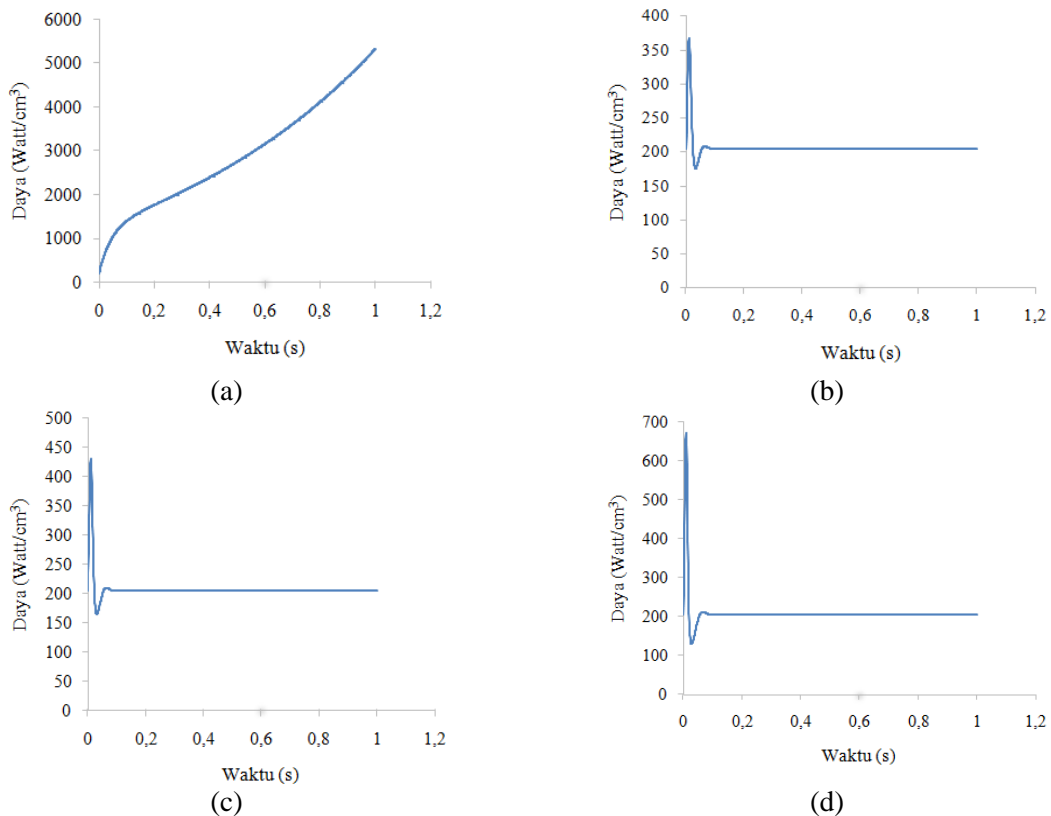
Sedangkan pada temperatur *fuel* rata-rata yang menggunakan *feedback* pada $t = 0,009$ s memang mengalami kenaikan temperatur sangat signifikan yang merupakan puncak dari temperatur. Namun setelah $t = 0,009$ s temperatur *fuel* rata-rata menurun secara signifikan pula yang kemudian temperatur menjadi stabil yang nilainya seperti temperatur awal yaitu sebesar $636,1 \text{ K}$.



Gambar 2. Analisis temperatur terhadap jarak (a) tanpa *feedback*, $t = 0$ s (b) tanpa *feedback*, $t = 1$ s (c) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,0025$; $\rho_0 = 0,00315$ dan $\rho_0 = 0,005$ pada $t = 1$ s.



Gambar 3. Temperatur *fuel* rata-rata terhadap waktu (a) tanpa *feedback*, $\rho_0 = 0,0025$ (b) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,0025$ (c) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,00315$ (d) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,005$



Gambar 4. Daya terhadap waktu (a) tanpa *feedback*, $\rho_0 = 0,0025$ (b) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,0025$ (c) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,00315$ (d) dengan *feedback*, $\rho_0 = 0,005$.

Dapat kita lihat pada **Gambar 4** daya yang tidak menggunakan *feedback* naik sangat tinggi dengan pola nilai eksponensial, pada $t = 1$ s didapat daya sebesar 5314,72 Watt/cm³. Kenaikan daya tersebut dikarenakan pada reaktivitas tanpa *feedback* didapati nilai reaktivitas sebesar 0,0025 yang merupakan kondisi superkritis. Jika nilai daya mengalami kenaikan maka nilai temperatur juga akan mengalami kenaikan. Sehingga dapat kita lihat pada grafik daya dan grafik temperatur memiliki pola grafik yang sama. Tingginya nilai temperatur dapat menyebabkan teras reaktor meleleh, sehingga reaktor nuklir dapat mengalami kecelakaan.

Sedangkan pada daya yang menggunakan *feedback*, daya mengalami lonjakan daya pada $t = 0,009$ s lalu menurun hingga menuju keadaan yang stabil. Pada $t = 1$ s nilai daya kembali seperti nilai daya awal yaitu 204,765

Watt/cm³. Diperoleh keadaan nilai daya yang stabil dikarenakan pada reaktivitas menggunakan *feedback* didapati nilai reaktivitas sekitar -0,000003 yang sangat mendekati nol yang merupakan kondisi superkritis. Dapat kita simpulkan, pada daya yang menggunakan *feedback* menghasilkan daya yang stabil sehingga kondisi ini cukup baik untuk reaktor nuklir.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa reaktivitas tanpa *feedback* menghasilkan nilai temperatur dan daya dengan pola eksponensial. Nilai temperatur dan daya terus mengalami kenaikan yang sangat besar dalam waktu yang sangat singkat. Pada waktu $t = 1$ s didapatkan temperatur *fuel* rata-rata sebesar 13717,5 K dan daya sebesar 5314,72 Watt/cm³. Tentu saja hal tersebut dapat

membuat teras reaktor meleleh yang mengakibatkan terjadinya kecelakaan reaktor nuklir. Sedangkan pada reaktivitas menggunakan *feedback* dihasilkan lonjakan nilai temperatur dan daya pada awal iterasi, namun setelah $t = 0,009$ s didapati penurunan nilai yang kemudian dalam waktu yang sangat singkat menuju keadaan stabil seperti nilai temperatur awal yaitu 636,1 K dan daya awal yaitu 204,765 Watt/cm³. Dapat disimpulkan reaktivitas menggunakan *feedback* akan menghasilkan kondisi yang aman bagi reaktor nuklir.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. & A. Y. S. Jatiman, *No Title*. Jakarta: Karunika, 1986.
- [2] Suharno, H. Tjahjono, and Sugiyanto, "Reaktor nuklir dan aspek radiologisnya," pp. 152–158, 1996.
- [3] Y. Yulianti and A. Waris, "Analisis Persamaan Difusi Ruang-Waktu Silinder 1-Dimensi Pada Kecelakaan Reaktor Utop (Unprotected Transient Over Power)," vol. 15, no. 2, pp. 100–110, 2009.
- [4] A. Cahyono, D. Handoyo, and K. Handono, "DENGAN LABVIEW," vol. 9, no. 17, pp. 42–49, 2012.
- [5] J. Hernadi, *Matematika Numerik dengan Implementasi Matlab*. Yogyakarta: Andi, 2012.
- [6] W. H. Kohler, "Reactivity Feedback With Short Delayed Times," *J. Nucl.*, vol. 23, pp. 569–574, 1969.
- [7] B. Z. W.Z. Chen, L. F. Gou, "Accuracy of Analytical Methods Obtaining Supercritical Transients with Temperature Feedback," *Prog. Nucl Energy*, vol. 49, no. 4, pp. 290–302, 2007.
- [8] V. H. Dam, "Dynamics of Passive Reactor Shutdown," *Nucl. Energy*, vol. 30, no. 3, pp. 255–264, 1996.
- [9] W. A. E and A. B. Reynold, *Fast Breeder Reactor*. New York: Pergamon Press, 1981.
- [10] N. Dobuchi, S. Takeda, and T. Kitada, "Study on the relation between Doppler reactivity coefficient and resonance integrals of Thorium and Uranium in PWR fuels," *Ann. Nucl. Energy*, 2016.
- [11] E. Dewita, "Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 14, no. 1, pp. 45–56, 2012.
- [12] J. J. Duderstadt and L. J. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley and Sons, Inc. pp 478-481., 1976.
- [13] W. K. Wati, "Desain Inti Teras Reaktor (Core) X-Y Dua Dimensi Model Reaktor PWR Untuk Reaktor SCWR Menggunakan Bahan Bakar Thorium.," 2017.

