

Studi Desain *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR) Berpendingin Gas Hidrogen Menggunakan Bahan Bakar Thorium

Dika Riyan Saputra⁽¹⁾, Yanti Yulianti^{(1)*}, dan Agus Riyanto⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung Bandar Lampung 35145

*E-mail: yanti.yulianti@fmipa.ac.id

Diterima (01 Desember 2018 Direvisi (17 Desember 2018)

Abstract. The Research of design reactor HTGR cell core with thorium fuel and hydrogen gas cooled using SRAC program has been done. The reactor was designed to generate maximum thermal power and critical conditions. The parameters on this study are fuel enrichment, atomic density, size and configuration of reactor core, criticality and the distribution of power density. Reactor core calculation was done in two dimensional core (x,y) at 1/6 part of the reactor core with a triangular mesh. The fuel was Th^{232} and U^{233} , and hydrogen as coolant. In this study, the ideal reactor core design was length (x) was 428 cm and width (y) was 214 cm, the first fuel enrichment was 6,037% and second fuel enrichment was 8%. Reactor core design in this study generated 60 MWth thermal power with maximum power density was 179,6747 Watt/cm³ which is located at $x=1, y=18$ point and effective multiplication (k_{eff}) is 1,000005.

Keywords: Core design reactor, hydrogen, HTGR, power density, thorium

Abstrak. Telah dilakukan penelitian mengenai desain teras reaktor suhu tinggi (HTGR) berpendingin gas hidrogen dengan bahan bakar thorium menggunakan program SRAC. Reaktor didesain untuk menghasilkan daya termal yang maksimal dan kondisi kritis. Parameter yang dianalisis pada penelitian ini adalah pengayaan bahan bakar, densitas atom, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor, kekritisitas, dan distribusi rapat daya. Perhitungan pada teras reaktor dilakukan secara dua dimensi (x,y) pada 1/6 bagian teras reaktor dengan *mesh* berbentuk triangular. Bahan bakar yang digunakan adalah Th^{232} dan U^{233} , serta gas hidrogen sebagai pendingin. Pada penelitian ini diperoleh desain teras reaktor yang ideal dengan ukuran panjang (x) = 428 cm dan lebar (y) = 214 cm, pengayaan pada bahan bakar bagian pertama 6,037% dan bahan bakar bagian kedua 8%. Desain Teras reaktor pada penelitian ini menghasilkan daya termal sebesar 60 MWth, dengan nilai rapat daya maksimal sebesar 179,6747 Watt/cm³ yang terletak pada titik $x=1, y=18$ dan nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) sebesar 1,000005.

Kata Kunci: Desain teras reaktor, hidrogen, HTGR, rapat daya, thorium

PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi di Indonesia terus terjadi, dengan kenaikan rata-rata hingga 7% per tahun. Indonesia saat ini, masih tergantung terhadap energi fosil dengan kebutuhan sekitar 50% untuk kebutuhan minyak bumi dan gas. Secara keseluruhan energi di Indonesia 95% dipenuhi oleh energi fosil yang merupakan sumber energi tidak terbarukan, sedangkan ketersediaan energi fosil di Indonesia terbatas [1]. Hal ini tentu dapat mengakibatkan kekurangan sumber energi di

Indonesia, sehingga diperlukan sumber energi alternatif pengganti energi fosil saat ini.

Energi nuklir merupakan salah satu energi alternatif atas masalah yang ditimbulkan oleh semakin berkurangnya sumber energi fosil serta dampak lingkungan yang ditimbulkannya. Energi nuklir termasuk salah satu energi bersih masa depan, karena tidak menghasilkan emisi [2].

Reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya fisi nuklir, yaitu sebuah proses dimana terjadi pembelahan inti atom berat akibat ditumbukkan oleh neutron, pembelahan ini menghasilkan energi, inti atom yang lebih

ringan, neutron tambahan dan photon dalam bentuk sinar gamma. Pada reaktor dibedakan dua jenis material yang dapat mengalami fisi atau pembelahan yang disebut dengan *fissionable material* yaitu material fisil dan material fertil [3].

Pada penelitian ini, desain reaktor yang digunakan adalah salah satu jenis reaktor generasi IV, yaitu reaktor suhu tinggi berpendingin gas atau *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR) yang menggunakan. Untuk bahan bakar yang digunakan adalah thorium-233 (Th^{233}) dengan pendingin gas hidrogen.

Thorium-232 (Th^{232}) bersifat fertil, karena itu penggunaannya dalam reaktor memerlukan bahan fisil berupa uranium-233 (U^{233}) sebagai komponen penggerak (*driver*) sehingga reaksi berantai dapat di pertahankan. Th^{232} akan menyerap neutron lambat untuk menghasilkan U^{233} yang bersifat fisil. Titik leleh thorium dioksida (3378°C) lebih tinggi sekitar 513°C dibanding uranium dioksida (2865°C). Perbedaan temperatur ini dapat digunakan untuk menyediakan margin keselamatan yang cukup apabila terjadi kenaikan temperature akibat kehilangan pendingin (*loss of coolant*) (Kamei dan Hakami, 2012). [4] melakukan penelitian tentang desain teras reaktor suhu tinggi berpendingin gas dengan bahan bakar thorium. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa penggunaan bahan bakar thorium mampu mengoperasikan reaktor selama 11 tahun dalam sekali pengisian bahan bakar

Proses perancangan desain reaktor memerlukan analisis yang komprehensif, salah satunya analisis neutronik yang meliputi penentuan pengayaan bahan bakar, ukuran teras reaktor, konfigurasi teras reaktor yang memenuhi standar kekritisan. Analisis neutronik diawali dengan penyelesaian persamaan difusi untuk memperoleh gambaran distribusi neutron, faktor multiplikasi (k_{eff}) dan distribusi daya di dalam reaktor.

Analisis neutronik dilakukan dengan menggunakan program *System Reactor Atomic Code* (SRAC). SRAC merupakan suatu sistem kode perhitungan neutron yang bersifat menyeluruh untuk beberapa jenis reaktor termal [5].

METODE PENELITIAN

Prosedur penelitian pada penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu menentukan pengayaan, menghitung densitas atom, menentukan ukuran dan konfigurasi teras reaktor, serta melakukan perhitungan dengan *CITATION* pada program SRAC. Selanjutnya, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah seperangkat computer dengan *Operating System* (OS) Linux Mint 18 dan program SRAC.

Perhitungan densitas atom dilakukan pada pengayaan bahan bakar U^{233} yang bervariasi pada setiap bagian bahan bakar, yaitu *fuel first region* (bahan bakar bagian pertama), dan *fuel second region* (bahan bakar bagian kedua) yang dilakukan dengan variasi hanya pada bahan bakar bagian pertama. Densitas atom dihitung menggunakan persamaan berikut [6].

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (1)$$

Dimana: N = densitas atom (atom/cm^3), ρ = densitas (gram/cm^3), N_A = bilangan avogadro ($0,602 \times 10^{24}$ atom/mol), M = nomor massa (gram/mol)

Ukuran teras reaktor dihitung secara dua dimensi, yaitu kolom (x) dan baris (y). Untuk mendapatkan ukuran teras reaktor yang ideal dilakukan dengan perubahan ukuran teras reaktor dan mengubah konfigurasi bahan bakar pada teras reaktor, sehingga didapatkan reaktor yang kritis.

Tabel 1. Densitas atom bahan bakar

Pengayaan n (%)	U^{233} (atom/cm^3)	Th^{232} (atom/cm^3)	O (atom/cm^3)
4,0	$9,5444 \times 10^{-4}$	$2,2787 \times 10^{-2}$	$4,7722 \times 10^{-2}$
4,5	$1,0737 \times 10^{-3}$	$2,2707 \times 10^{-2}$	$4,7722 \times 10^{-2}$
5,0	$1,1931 \times 10^{-3}$	$2,2668 \times 10^{-2}$	$4,7722 \times 10^{-2}$

	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
5,5	1,3124 x	2,2548 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
6,0	1,4317 x	2,2449 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
6,5	1,5509 x	2,2310 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
7,0	1,6703 x	2,2191 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
7,5	1,7912 x	2,2052 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}
8,0	1,9089 x	2,1923 x	4,7722 x
	10^{-3}	10^{-2}	10^{-2}

Sebelum melakukan perhitungan dengan *CITATION* pada program SRAC, terlebih dahulu dilakukan perhitungan densitas atom menggunakan Persamaan 1. Hasil perhitungan densitas atom bahan bakar dan juga pendingin selanjutnya digunakan sebagai *input CITATION* untuk memperoleh reaktor yang kritis atau nilai k_{eff} sama dengan satu. Nilai densitas atom hasil perhitungan untuk gas hidrogen sebesar $5,4126 \times 10^{-2}$ molekul/cm³. Untuk nilai densitas atom pengayaan bahan bakar ditampilkan pada **Tabel 1**. Hasil perhitungan densitas atom digunakan sebagai *input CITATION* pada program SRAC.

Selain k_{eff} , *output* yang akan dihasilkan adalah distribusi rapat daya di dalam teras reaktor. Besarnya rapat daya sebuah reaktor menunjukkan besarnya daya yang dihasilkan reaktor persatuan volume. Distribusi rapat daya merupakan salah satu analisis keselamatan reaktor. Distribusi rapat daya tersebut dapat digunakan untuk menentukan ada tidaknya reaktor daya puncak dan suhu bahan bakar minimum dari suatu teras reaktor yang melampaui batas yang diizinkan [7]

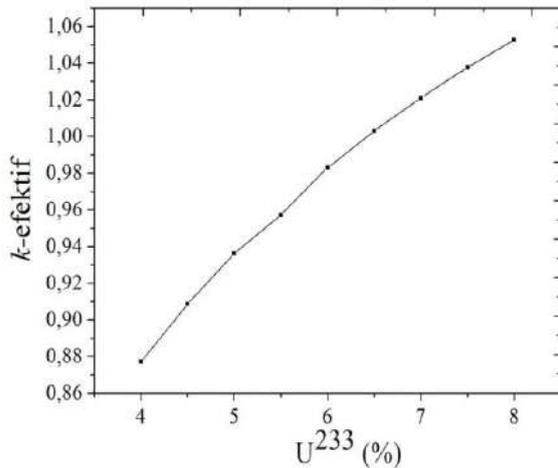
HASIL DAN PEMBAHASAN

[8] melakukan penelitian tentang desain reaktor suhu tinggi berpendingin gas helium. Penelitian ini menggunakan pengayaan U²³³ mulai dari 3,4% - 9,9%. Reaktor ini mengalami keadaan kritis pada saat pengisian bahan bakar kolom 30 atau pada sebaran pengayaan 4,5% - 6,6% . Selanjutnya, [9] juga melakukan penelitian tentang desain teras reaktor. Teras reaktor yang ideal memiliki perbandingan ukuran kolom teras reaktor lebih besar dari ukuran baris teras reaktor dengan nilai kolom (x) sebesar 340 cm dan baris (y) sebesar 170 cm.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, pengayaan bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi dua komponen, yaitu pengayaan bahan bakar bagian pertama 4% - 8% dan bahan bakar bagian kedua 8%. Selain densitas atom, karakteristik reaktor HTGR yang digunakan sebagai *input* pada *CITATION* juga berupa ukuran teras reaktor dan konfigurasi bahan bakar. Adapun karakteristik HTGR pada penelitian ini yang digunakan sebagai *input CITATION* ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Karakteristik awal teras reaktor HTGR pada penelitian

Parameter	Nilai
Bahan Bakar	Th ²³² dan U ²³³
Daya termal	60 M Wth
Kolom (x)	415 cm
Baris (y)	210 cm
Jumlah <i>mesh</i>	36 x 18
Pendingin	Gas Hidrogen

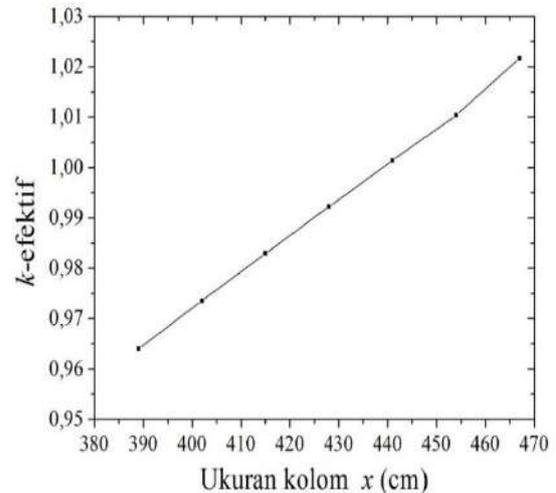


Gambar 1. Pengaruh pengayaan bahan bakar terhadap k_{eff} .

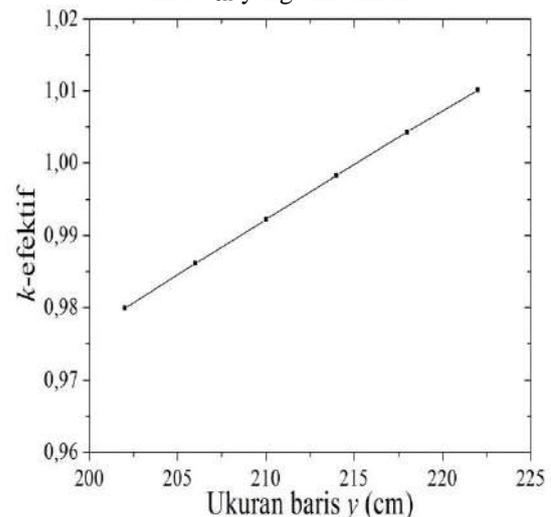
Setelah dilakukan perhitungan dengan *CITATION* pada program *SRAC*, *output CITATION* menunjukkan bahwa semakin besar persentase bahan bakar semakin besar pula nilai k_{eff} yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi fisi telah terjadi di dalam reaktor. **Gambar 1** menunjukkan grafik peningkatan persentase pengayaan bahan bakar terhadap k_{eff} yang diperoleh. Terlihat bahwa harga k_{eff} yang paling mendekati 1,000 adalah pada komposisi bahan bakar U^{233} dengan pengayaan bagian pertama sebesar 6% dan bagian kedua 8%. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi pengayaan bahan bakar maka semakin tinggi kemungkinan terjadinya reaksi nuklir sehingga jumlah neutron pada teras reaktor semakin meningkat.

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan pada $\frac{1}{6}$ bagian teras reaktor berbentuk heksagonal dengan jumlah *mesh* 36×18 . Setelah dilakukan pengayaan, selanjutnya merubah ukuran teras reaktor kolom (x) mulai dari 389 – 467 cm sedangkan ukuran baris (y) tidak berubah. Hal ini dilakukan untuk mengamati pengaruh perubahan ukuran teras reaktor pada kolom (x) terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan. Perubahan ukuran kolom (x) teras reaktor yang divariasikan ditampilkan pada **Gambar 2**. Berdasarkan hasil perhitungan pada *CITATION* nilai k_{eff} semakin bertambah ketika ukuran teras

reaktor kolom (x) semakin besar. Untuk nilai k_{eff} yang paling mendekati satu diperoleh pada saat ukuran kolom (x) teras reaktor sebesar 428 cm.



Gambar 2. Pengaruh ukuran kolom (x) terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan

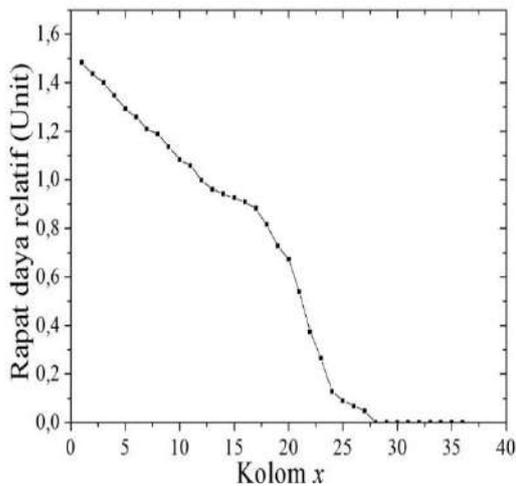


Gambar 3. Pengaruh ukuran baris (y) terhadap nilai k_{eff} yang dihasilkan

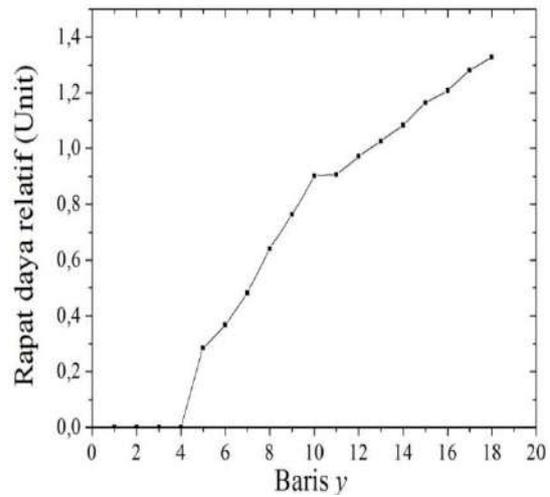
Selain kriteria kekritisan yang ditunjukkan dengan harga k_{eff} , hal lain yang juga harus diperhatikan yaitu rapat rapat daya relatif (faktor puncak daya). Faktor puncak daya digunakan untuk analisis tingkat keselamatan reaktor [10]. Reaktor yang aman digunakan adalah desain reaktor dengan faktor puncak daya kurang dari dua. Ketika nilai faktor puncak daya terlalu besar, maka kemungkinan reaktor

mengalami kebocoran yang dapat menyebabkan kerusakan semakin tinggi Berdasarkan penghitungan dengan *CITATION* diperoleh nilai rapat daya maksimum sebesar $179,4746 \text{ Watt/cm}^3$ yang terletak pada kolom (x) 1 dan baris (y) 16. Untuk nilai rapat daya relatif kolom (x) teras reaktor ditampilkan pada **Gambar 4**. Berdasarkan **Gambar 4** nilai rapat daya relatif semakin menurun pada titik (x) yang mengarah keluar bagian bahan bakar. Hal ini terjadi karena reaksi fisi hanya terjadi pada bagian bahan bakar, sedangkan pada bagian *blackness* tidak terjadi reaksi fisi.

Nilai rapat daya relatif pada baris (y) teras reaktor ditampilkan pada **Gambar 5**. Berdasarkan **Gambar 5** nilai rapat daya relatif semakin meningkat pada saat titik (x) yang mengarah kedalam bagian bahan bakar. Hal ini terjadi karena reaksi fisi hanya terjadi pada bagian bahan bakar, sedangkan pada bagian *blackness* tidak terjadi reaksi fisi.

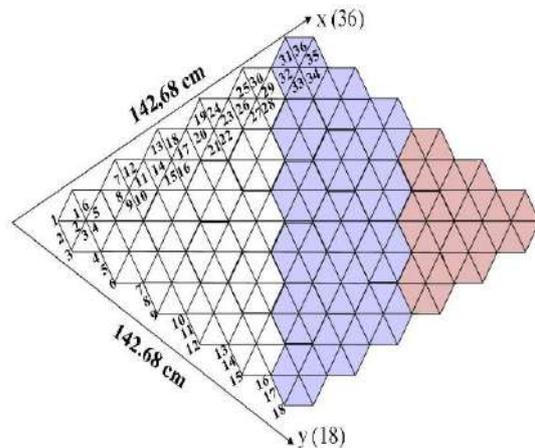


Gambar 4. Rapat daya relatif pada kolom (x)



Gambar 5. Rapat daya relatif pada baris (y)

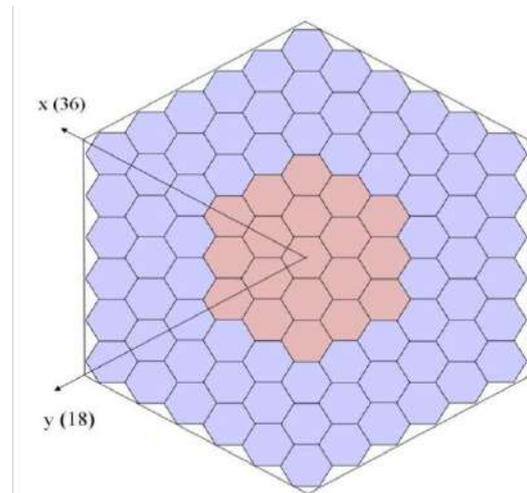
Berdasarkan hasil perhitungan dengan *CITATION* pada program SRAC, $1/6$ bagian teras reaktor model heksagonal dengan jumlah *mesh* 36×18 dan berbentuk triangular dengan ukuran setiap *mesh* sebesar 11,89 cm pada semua arah. Teras reaktor tersebut mengalami keadaan kritis pada saat pengayaan bahan bakar bagian pertama 6,037% dan bagian kedua 8%. Ukuran kolom (x) teras reaktor 428 cm dan ukuran baris (y) teras reaktor sebesar 214 cm. Desain geometri $1/6$ bagian teras reaktor berbentuk triangular ditampilkan pada **Gambar 6**. Teras reaktor ini terbagi menjadi tiga bagian, yaitu bahan bakar bagian pertama, bahan bakar bagian kedua dan *blacknes*



Gambar 6. Konfigurasi $1/6$ teras reaktor dengan jumlah *mesh* 36×18

Keterangan:

-  Bahan bakar bagian pertama
-  Bahan bakar bagian kedua
-  Blackness



Gambar 7. Desain teras reaktor model heksagonal

Gambar 7 menunjukkan desain teras reaktor ideal berbentuk heksagonal. Teras reaktor ini dapat menghasilkan daya termal sebesar 60 MW, dengan rapat daya maksimal sebesar 179,4767 Watt/cm³ yang terletak pada kolom (x) 1, dan baris (y) 18. Penghitungan rapat daya pada *CITATION* menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada kolom (x) 1 adalah 121,0179 Watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,483059. Sedangkan, rapat daya rata-rata pada baris (y) 18 adalah 135,1127 Watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,328348.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, diperoleh kesimpulan bahwa semakin besar persentase pengayaan bahan bakar, maka nilai k_{eff} yang dihasilkan semakin besar karena reaksi fisi yang terjadi pada teras reaktor lebih banyak. Teras reaktor HTGR model heksagonal mengalami keadaan kritis pada pengayaan bahan bakar bagian pertama 6,037% dan bagian kedua 8% dengan nilai k_{eff} sebesar 1,000005. Konfigurasi $1/6$ bagian teras

reaktor pada kondisi kritis mempunyai ukuran kolom (x) sebesar 428 cm dan baris (y) sebesar 214 cm yang mampu menghasilkan daya termal sebesar 60 MW dengan rapat daya maksimal sebesar 179,4767 Watt/cm³ yang terletak pada kolom (x) 1, dan baris (y) 18. Penghitungan rapat daya pada *CITATION* menunjukkan bahwa rapat daya rata-rata pada kolom (x) 1 adalah 121,0179 Watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,483059. Sedangkan, rapat daya rata-rata pada baris (y) 18 adalah 135,1127 Watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,328348.

DAFTAR PUTAKA

- [1] Zuhail, *Knowledge Platform Kekuatan Daya Saing dan Innovation*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2010.
- [2] J. Deuderstadt and L. Hamilton, *J. Deuderstadt and L. Hamilton*. New York: John Wiley and Sons, 1976.
- [3] L. Cao, O. Yoshiaki, I. Yuki, and Zhi, "Fuel, Core Design and Subchannel Analysis of a Superfast Reactor," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 138–148, 2008.
- [4] A. Pramutadi and Z. Su'ud, "Desain Reaktor Temperatur Tinggi Berumur Panjang Tanpa Pengisian Ulang Bahan Bakar Menggunakan Siklus Thorium," in *Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir XVII*, 2006, pp. 51–61.
- [5] K. Okumura, T. Kugo, K. Kaneko, and K. Thuchihash, "A Comprehensive Neutronics Calculation Code System," in *JAEA*, 2006, pp. 4–26.
- [6] E. Lewis, *Fundamental of Nuclear Reactor Physics*. USA: Academic Press, 2008.
- [7] Y. A. Windisari and W. Y. Widarto, "Penentuan Karakteristik Distribusi

- Rapat Daya Teras Reaktor Kartini," in *Jurnal Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*," in *Jurnal Prosiding Seminar Nasional ke-17 Teknologi Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir*, 2011.
- [8] M. R. Fenny, "Studi Desain Reaktor Temperatur Tinggi Berpendingin Gas Helium Berbahan Bakar Uranium Dioksida," *Sigma-Mu*, vol. 1, no. 1, pp. 22–45, 2007.
- [9] S. Bawani and Y. Yulianti, "Desain Reaktor Air Superkritis (Supercritical colled Water Reactor) dengan Menggunakan Bahan Bakar Uranium-Thorium Model Teras Silinder," *J. Teor. dan Apl. Fis.*, vol. 04, no. 01, 2016.
- [10] T. Alfa, "Pelatihan Penyelenggaraan Operator dan Supervisor Reaktor TRIGA 2000," in *Fisika Reaktor, Pusat Pendidikan dan Pelatihan BATAN*, 2005, pp. 156–158.

