

Desain Teras Reaktor *High Temperatur Gas-Cooled Reactor* (HTGR) Model *Mesh Triangular* Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium Berpendingin Gas CO₂

Nasta Meina Dilaga^{(1)*}, Yanti Yulianti⁽¹⁾, dan Agus Riyanto⁽¹⁾

⁽¹⁾Jurusan Fisika FMIPA Unila, Bandar Lampung 35145.

*E-mail: namedilaga@gmail.com

Diterima (03 Desember 2018) , direvisi (21 Desember 2018)

Abstract. The research of design reactor HTGR cell core with two dimensional triangular mesh model using thorium fueled and CO₂ coolant has been done. Objective of the research was design critical condition of HTGR cell core so as obtained critical condition and high thermal power. The neutronic analyzed by CITATION of SRAC on 1/6 of reactor cell core. The parameter which analyzed were core fuel enrichment, size and configuration reactor cell core, critically and power density. The result was obtained the ideal reactor design with size (x) 202 cm and (y) 101 cm. The enrichment of first region was 3% and second region was 2.731%. The total thermal power of reactor was 100 MWth, maximum power density of reactor was 107.5371 Watt/cc and k_{eff} of reactor was 1.000008.

Keywords: Core design , HTGR, thorium, power density.

Abstrak. Telah dilakukan penelitian tentang desain teras reaktor *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR) dengan model *mesh triangular* dua dimensi berbahan bakar thorium berpendingin gas CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain teras reaktor HTGR agar diperoleh kondisi kritis dan daya termal yang maksimal. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan kode CITATION program SRAC pada 1/6 bagian permukaan teras reaktor HTGR. Parameter yang dianalisis meliputi persentase pengayaan bahan bakar, ukuran dan konfigurasi teras reaktor, harga kekritisasi dan rapat daya. Hasil yang diperoleh menunjukkan desain teras reaktor HTGR yang ideal dengan ukuran kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm. Persentase pengayaan bahan bakar bagian pertama sebesar 3% dan bahan bakar bagian kedua 2,731%. Desain teras reaktor ini menghasilkan daya termal sebesar 100 MWth, rapat daya maksimal sebesar 107,5371 watt/cm³ dan nilai k_{eff} 1,000008.

Kata kunci: Desain reaktor, HTGR, thorium, rapat daya.

PENDAHULUAN

Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) adalah salah satu sumber energi alternatif yang memanfaatkan energi dari reaktor nuklir sebagai sumber energi listrik. Bahan bakar reaktor nuklir yang biasanya digunakan adalah Uranium. Uranium alami banyak terdapat pada kerak bumi yang susunnya terdiri atas campuran U²³⁸ dan U²³⁵ [1].

Selain Uranium, bahan lain yang sering digunakan sebagai bahan bakar adalah Thorium. Thorium merupakan logam bersifat radioaktif yang mempunyai titik

leleh sekitar 3.300 °C [2]. Thorium terkandung dalam mineral monasit yang dapat ditemukan dalam batuan granit dari hasil sisa erosi. Sedangkan di Indonesia banyak bukit-bukit yang tersusun atas batuan sisa erosi [3].

Pertimbangan penggunaan Thorium adalah karna sumber daya Thorium di alam sekitar 3 kali lebih besar dari Uranium dan dapat mengurangi jumlah limbah radioaktif [4]. Selain itu, penggunaan thorium sebagai bahan bakar reaktor nuklir ini lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan [5]. Thorium mempunyai titik leleh sekitar

3.300 °C. Selain itu thorium bersifat reaktif dan bereaksi dengan oksigen, hidrogen, halogen dan sulfur [6].

High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) merupakan reaktor bertemperatur tinggi yang menggunakan pendingin gas dan dirancang dengan *Low Enriched Uranium* (LEU) (Muldiani, 2007). Reaktor ini merupakan reaktor skala *Small Medium Reactor* (SMR) atau reaktor skala kecil menengah, yang mempunyai fitur keselamatan melekat dan sistem keselamatan teknis pasif, sehingga mempunyai tingkat keselamatan dan keandalan yang lebih baik [7].

HTGR menggunakan grafit sebagai moderator & reflektor yang mempunyai titik leleh 3697 °C. HTGR menggunakan pendingin berupa gas yang dikombinasikan dengan bahan teras yang tahan panas, gas yang sering digunakan adalah gas Helium (He). Penggunaan bahan teras yang bersifat tahan panas dikombinasikan dengan pendingin helium menyebabkan pendingin dapat mencapai suhu 900 °C [8].

Selain helium, karbon dioksida (CO₂) dapat juga digunakan sebagai pendingin pada reaktor cepat berpendingin gas. Keunggulan CO₂ adalah mampu bekerja pada tekanan yang rendah, dan CO₂ memiliki kapasitas panas, dapat menyerap gelombang infra merah dengan kuat dan memiliki koefisien panas yang tinggi dibandingkan dengan helium [9].

Dalam mendesain suatu reaktor, diperlukan analisis secara komprehensif, salah satunya analisis neutronik, yang meliputi perhitungan pengayaan bahan bakar, ukuran teras reaktor, dan konfigurasi teras yang memenuhi kriteria kekritisasi dan menghasilkan energi secara maksimal. Suatu reaktor dikatakan kritis jika nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) sama

dengan 1 [10]. Faktor multiplikasi diharapkan selalu bernilai kritis untuk menjamin keberlangsungan operasi reaktor dengan pembangkitan daya yang terkendali dan stabil selama reaktor beroperasi [11].

Berdasarkan pembahasan sebelumnya, maka dilakukan penelitian Desain Teras Reaktor HTGR Model *Mesh Triangular* Dua Dimensi Berbahan Bakar Thorium Berpendingin Gas CO₂. Penelitian ini bertujuan untuk mendesain suatu reaktor jenis HTGR berbahan bakar thorium dan berpendingin gas CO₂. Analisis dilakukan dengan menggunakan *CITATION* pada program *Standard thermal Reactor Analysis Code* (SRAC) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) di *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) Jepang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan membuat desain dan menentukan ukuran konfigurasi teras reaktor HTGR berbentuk silinder dengan model *mesh triangular* dua dimensi. Setelah diperoleh desain dan konfigurasi teras reaktor, selanjutnya menghitung nilai densitas atom dari bahan bakar dan bahan pendingin yang digunakan dan persentase pengayaan bahan bakar reaktor. Densitas atom dapat dihitung dengan persamaan 1 :

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

Dimana, N = densitas atom (atom/cm³), ρ = massa jenis (gr/cm³), N_A = bilangan Avogadro (6,02x10²³ atom/mol), M = massa molekul (gr/mol).

Selanjutnya dilakukan perhitungan dengan memasukkan nilai densitas atom

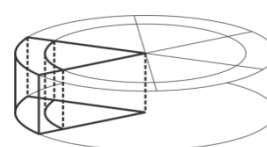
dan pengayaan bahan bakar pada kode *CITATION* pada program SRAC. Perhitungan dilakukan pada 1/6 bagian teras reaktor. Kemudian melakukan analisis keluaran *CITATION* yang meliputi nilai k_{eff} dan nilai densitas daya yang dihasilkan. Nilai k_{eff} yang diharapkan yaitu = 1,00 (keadaan kritis). Apabila nilai k_{eff} belum mendekati 1,00 maka dilakukan perhitungan ulang dengan mengubah nilai densitas atom bahan bakar dan mengubah ukuran dari teras reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

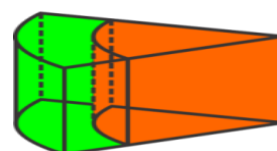
Desain Teras Reaktor HTGR

Desain teras reaktor HTGR ditunjukkan pada **Gambar 1**. **Gambar 1 (a)** merupakan desain teras reaktor berbentuk silinder dan (b) 1/6 bagian dari teras reaktor yang dipotong untuk memudahkan perhitungan. Pada **Gambar 1 (b)** bagian yang berwarna oranye merupakan *fuel first region* (bahan bakar

daerah pertama) dan bagian yang berwarna hijau merupakan *fuel second region* (bahan bakar daerah kedua). Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah Uranium-233 (U^{233}) dan Thorium-232 (Th^{232}). Persentase pengayaan pada kedua bagian bahan bakar divariasikan sebesar 1-5%. Bahan pendingin yang digunakan, yaitu Gas CO_2 . Karakteristik material yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 1**.



(a)



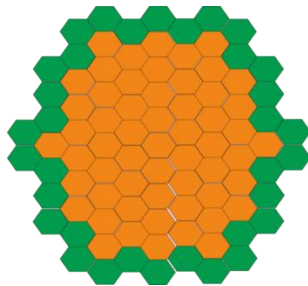
(b)

Gambar 1. (a) Teras reaktor berbentuk silinder (b) 1/6 bagian dari teras reaktor

Tabel 1. Karakteristik material

Bahan bakar		Pendingin	
Material	ThUO ₂	Material	CO ₂
Temperatur	300 °C	Temperatur	300 °C
Massa jenis	10,8 gr/cm ³	Massa jenis	1,98 gr/cm ³
Pengayaan		Pengayaan	-
- daerah pertama	1-5%		
- daerah kedua	1-5%		

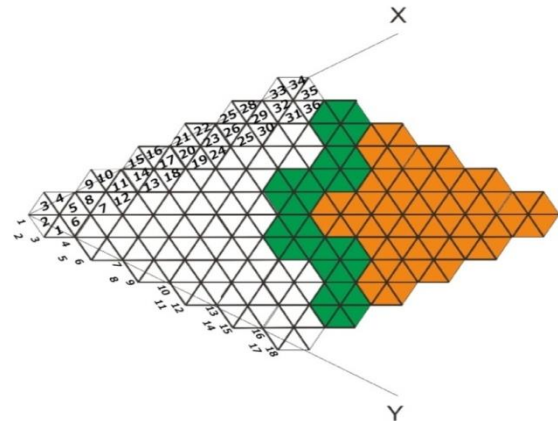
Konfigurasi Teras Reaktor HTGR



Gambar 2. Desain konfigurasi permukaan penuh teras reaktor HTGR

Desain konfigurasi teras reaktor HTGR pada penelitian ini diatur sedemikian rupa agar mencapai keadaan kritis ($k_{eff} = 1$). Bentuk permukaan penuh teras reaktor HTGR ditunjukkan pada **Gambar 2**. Warna hijau merupakan bahan bakar bagian kedua dan warna oranye merupakan bahan bakar bagian pertama.

Permukaan penuh teras reaktor HTGR kemudian dipotong menjadi 6 bagian sama besar dan dihitung hanya 1/6 bagian dari permukaan penuh teras reaktor HTGR. **Gambar 3** merupakan bentuk potongan 1/6 dari permukaan teras reaktor dengan model *mesh triangular* (segitiga) yang dihitung menggunakan *CITATION*. Warna hijau merupakan bahan bakar bagian kedua dan warna oranye merupakan bahan bakar bagian pertama. Sementara segitiga yang tidak berwarna merupakan bagian kosong. Jumlah mesh pada sumbu x yaitu 36 dan pada sumbu y, yaitu 18.



Gambar 3. Desain konfigurasi 1/6 bagian permukaan teras reaktor HTGR

Pada bahan bakar bagian pertama dilakukan perhitungan densitas atom disetiap nuklida, yaitu Th²³², U²³³ dan O dengan variasi pengayaan U²³³ dari 1 - 5%. Sementara, pada bahan bakar bagian kedua diberi persentase pengayaan U²³³ sebesar 2,5%. Kemudian, pada penelitian ini daya termal yang digunakan yaitu 100 MWth. Hal ini dikarenakan daya termal untuk reaktor jenis HTGR dan yang menggunakan CO₂ berkisar dari 10 MWth – 115 MWth [12].

Hasil perhitungan menunjukkan semakin meningkatnya persentase pengayaan bahan bakar maka semakin meningkat pula k_{eff} . Hasil perhitungan pada pengayaan U²³³ bagian pertama dengan kolom (x) 200 cm, baris (y) 100 cm dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Nilai k_{eff} pada pengayaan U²³³ bagian pertama

Pengayaan Bagian Pertama (%)	Pengayaan Bagian Kedua (%)	k_{eff}
1	2,5	0,9789643
1,5	2,5	0,9817627
2	2,5	0,9859249
2,5	2,5	0,9883477
3	2,5	0,9978934
3,5	2,5	1,001819
4	2,5	1,008187
4,5	2,5	1,014884

Terlihat bahwa nilai k_{eff} yang paling mendekati 1,00 adalah pada komposisi bahan bakar U^{233} dengan pengayaan bahan bakar bagian pertama sebesar 3%, dengan pengayaan bahan bakar kedua sebesar 2,5%, yaitu 0,9978934. Kemudian, ukuran baris (y) divariasikan sebesar 90 cm – 110 cm dengan kenaikan 2,5 cm agar diperoleh k_{eff} mendekati atau sama dengan 1,00. Hasil pemberian variasi ukuran baris (y) dengan ukuran kolom (x) 200 cm, pengayaan U^{233} bagian pertama 3%, pengayaan U^{233} bagian kedua 2,5% dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 3**. Pada **Tabel 3** terlihat bahwa semakin besar ukuran baris (y), maka semakin besar pula nilai k_{eff} . Hal ini dikarenakan reaksi fisi yang terjadi semakin banyak sehingga jumlah neutron yang lahir terus bertambah. Diperoleh nilai k_{eff} pada ukuran baris (y) 100 cm dengan ukuran kolom (x) 200 cm, yaitu 0,9978934. Setelah ukuran baris (y) divariasikan kemudian ukuran kolom (x) juga divariasikan dengan

Tabel 3. Besar ukuran baris (y) pada teras reaktor

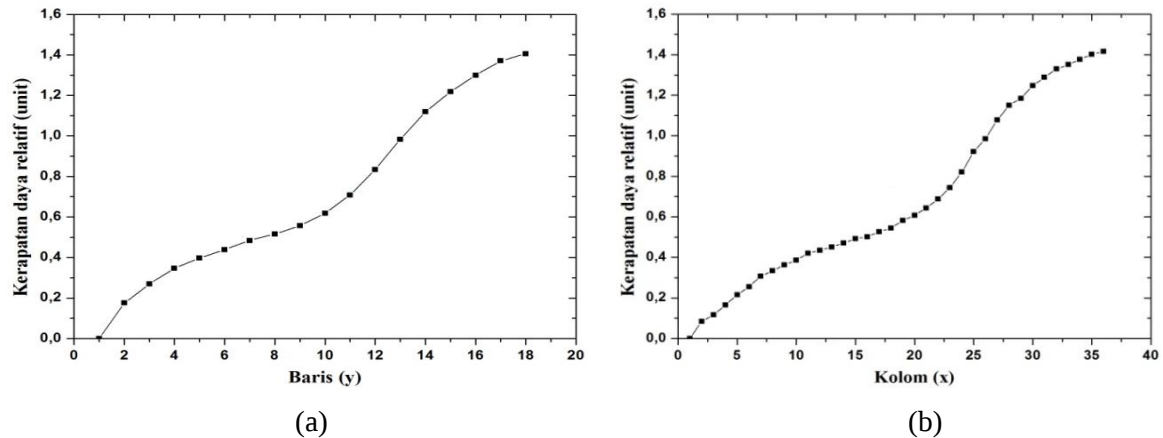
Baris y (cm)	Kolom x (cm)	k_{eff}
90	200	0,9743492
92,5	200	0,9796414
95	200	0,9846926
92,5	200	0,9895198
100	200	0,9978934
102,5	200	1,003857
105	200	1,009027

107,5	200	1,012685
110	200	1,017521

ukuran 180 cm – 220 cm dengan kenaikan 5 cm juga bertujuan untuk mendapatkan k_{eff} mendekati atau sama dengan 1,00. Hasil penambahan variasi ukuran kolom (x) dengan ukuran baris (y) 200 cm, pengayaan U^{233} bagian pertama 3%, pengayaan U^{233} bagian kedua 2,5% dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 4**. Pada kolom (x) diperoleh nilai k_{eff} pada ukuran kolom (x) 200 cm dengan ukuran baris (y) 100 cm, yaitu 0,9978934. Selain kriteria kekritisasi yang ditunjukkan nilai k_{eff} , terdapat hal lain yang harus diperhatikan, yaitu rapat daya (*power density*). Rapat daya reaktor adalah besarnya daya yang dihasilkan per satuan volume. Berdasarkan perhitungan dengan menggunakan *CITATION*, diperoleh besarnya rapat daya pada kolom (x) di tampilkan pada **Gambar 4**.

Tabel 4. Besar ukuran kolom (x) pada teras reaktor

Kolom x (cm)	Baris y (cm)	k_{eff}
180	100	0,9765692
185	100	0,9794635
190	100	0,9858944
195	100	0,9927492
200	100	0,9978934
205	100	1,006756
210	100	1,012411
215	100	1,015205
220	100	1,018743



Gambar 4. Rapat daya pada pengayaan bahan bakar pertama 3% dan pengayaan bahan bakar bagian kedua 2,5% (a) Pada kolom (x) dengan mesh 36 (b) Pada baris (y) dengan mesh 18.

Rapat daya rata – rata pada kolom (x) 36 adalah 60,189 watt/cm³ dengan faktor puncak (*peak factor*) daya 1,416422. Rapat daya rata – rata pada baris (y) 18 adalah 59,602 watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,418612. Nilai rapat daya maksimal dari pengayaan bahan bakar U²³³ bagian pertama adalah 108,686 watt/cm³.

Selanjutnya pada bahan bakar bagian kedua diberikan penambahan pengayaan U²³³ dari 1 - 5%. Sementara pada bahan bakar bagian pertama diberi persentase pengayaan U²³³ sebesar 3%. Nilai k_{eff} yang diperoleh setelah penambahan pengayaan pada bahan bakar bagian kedua dengan kolom (x) 200 cm, baris (y) 100 cm dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 5**. Berdasarkan data yang disajikan **Tabel 5** nilai k_{eff} yang mendekati 1,00, yaitu pada persentase pengayaan bahan bakar U²³³ bagian kedua 3% dan bagian pertama 3%. Nilai k_{eff} yang diperoleh, yaitu 1,0020281

Tabel 5. Nilai k_{eff} pada pengayaan U²³³ pada bahan bakar bagian kedua

Pengayaan Bagian Kedua (%)	Pengayaan Bagian Pertama (%)	k_{eff}
1	3	0,9785753
1,5	3	0,9839842
2	3	0,9857355

2,5	3	0,9978934
3	3	1,0020281
3,5	3	1,0061676
4	3	1,0124057
4,5	3	1,0163765
5	3	1,0201337

Setelah diperoleh nilai k_{eff} mendekati 1,00, selanjutnya ukuran baris (y) pada bahan bakar bagian kedua divariasikan sebesar 90 cm – 110 cm, dengan kenaikan 2,5 cm. Pengaruh besarnya ukuran baris (y) terhadap k_{eff} dengan ukuran kolom (x) 200 cm, pengayaan U²³³ bagian pertama 3%, pengayaan U²³³ bagian kedua 3% dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 6**. Pada ukuran baris (y) diperoleh nilai k_{eff} pada ukuran baris (y) 100 cm dengan ukuran kolom (x) 200 cm, yaitu 1,0020281.

Tabel 6. Besar ukuran baris (y) pada teras reaktor

Baris y (cm)	Kolom x (cm)	k_{eff}
90	200	0,9763474
92,5	200	0,9798638
95	200	0,9878946
97,5	200	0,9978863
100	200	1,0020281
102,5	200	1,0067352
105	200	1,0097513
107,5	200	1,0146845
110	200	1,0186349

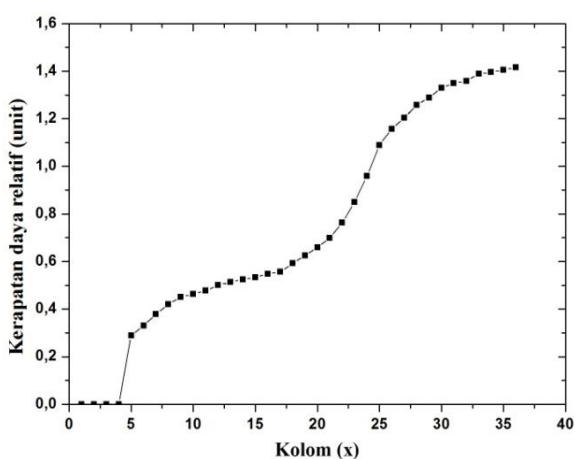
Kemudian pada kolom (x) divariasikan dengan ukuran sebesar 180 cm – 220 cm dengan kenaikan 5 cm dengan ukuran baris (y) sebesar 100 cm dan tidak ada perubahan. Hasil penambahan variasi ukuran kolom (x) dengan ukuran baris (y) 200 cm, pengayaan U^{233} bagian pertama 3%, pengayaan U^{233} bagian kedua 3% dan daya termal 100 MWth disajikan pada **Tabel 7**. Pada kolom (x) diperoleh nilai k_{eff}

pada ukuran kolom (x) 200 cm dengan ukuran baris (y) 100 cm, yaitu 1,0020287.

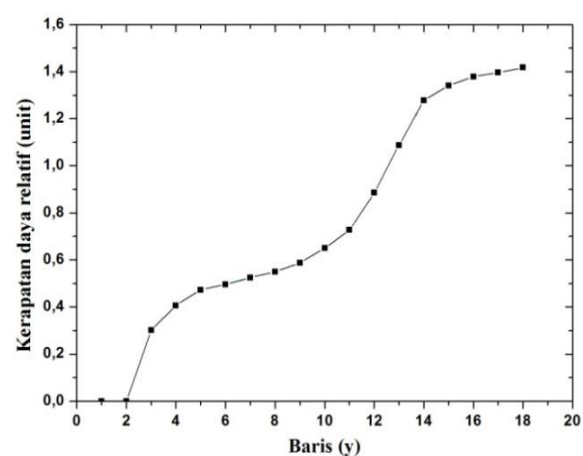
Pada **Gambar 5** ditampilkan grafik nilai rapat daya relatif pada kolom (x) dan baris (y). Nilai rata – rata rapat daya relatif pada kolom (x) 36, yaitu 58,946 watt/cm³, faktor puncak daya sebesar 1,4155227. Nilai rata – rata rapat daya pada baris (y) 18 sebesar 57,969 watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,413227. Rapat daya maksimal pada bahan bakar daerah kedua, yaitu 107,593 watt/cm³.

Tabel 7. Besar ukuran kolom (x) pada teras reaktor

Kolom x (cm)	Baris y (cm)	Daya Termal (MWth)	k_{eff}
180	100	100	0,9784671
185	100	100	0,9845632
190	100	100	0,9948754
195	100	100	0,9987351
200	100	100	1,0020287
205	100	100	1,0078554
210	100	100	1,0129733
215	100	100	1,0167354
220	100	100	1,0207641



(a)



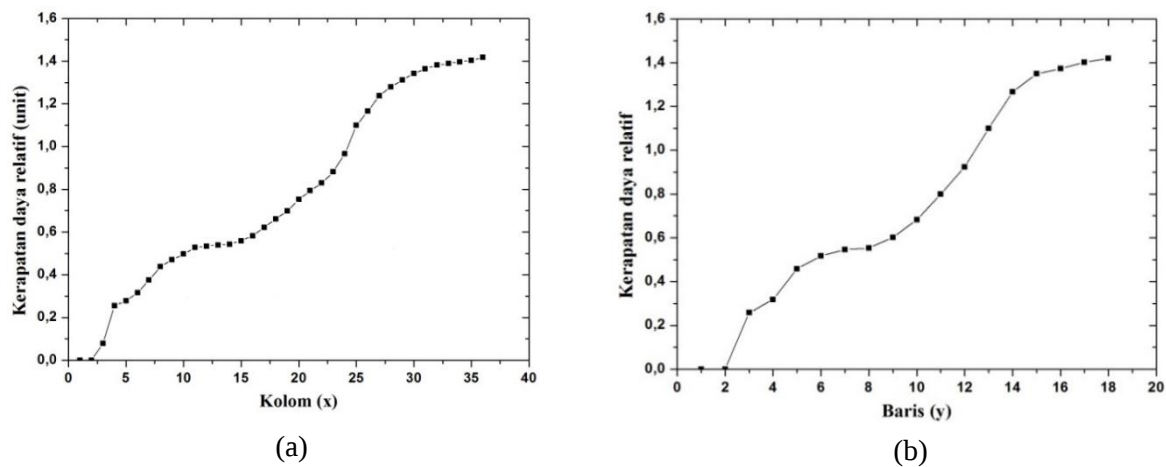
(b)

Gambar 5. Rapat daya pada pengayaan bahan bakar pertama 3% dan pengayaan bahan bakar bagian kedua 3% (a) Pada kolom (x) dengan mesh 36 (b) Pada baris (y) dengan mesh 18.

Desain Ideal Teras Reaktor HTGR

Setelah dilakukan penelitian dan analisis pada pengayaan U²³³ bagian kedua, diperoleh pengayaan paling ideal pada pengayaan U²³³ bagian pertama sebesar 3% dan pengayaan U²³³ bagian kedua sebesar 2,731%. Ukuran baris (y) sebesar 101 cm dan ukuran kolom (x) sebesar 202 cm, dengan daya termal sebesar 100 MWth.

Nilai k_{eff} sebesar 1,000008 dan diperoleh rapat daya kolom (x) titik 36 sebesar 59,465 watt/cm³, rapat daya baris (y) titik 18 sebesar 57,605 watt/cm³ dan rapat daya maksimal sebesar 107,5371 watt/cm³. Rapat daya relatif pada kolom x titik 36 dan baris y titik 18 ditampilkan pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Rapat daya pada pengayaan bahan bakar pertama 3% dan pengayaan bahan bakar bagian kedua 2,731% (a) Pada kolom (x) dengan mesh 36 (b) Pada baris (y) dengan mesh 18.

KESIMPULAN

Harga k_{eff} yang menunjukkan kondisi kritis diperoleh pada bahan bakar bagian pertama dengan pengayaan U²³³ 3% dan bahan bakar bagian kedua dengan pengayaan U²³³ 2,731% dengan ukuran kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm, yaitu 1,000008. Rapat daya maksimal yang diperoleh sebesar 107,5371 watt/cm³ pada ukuran teras reaktor kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm. Rapat daya rata-rata pada kolom (x) sebesar 59,465 watt/cm³ dengan faktor puncak daya sebesar 1,4093746. Rapat daya rata-rata pada baris (y) sebesar 57,605 watt/cm³ dengan faktor puncak daya 1,4137644.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kidd, *Nuclear Fuel Resources*. 2009.
- [2] Lusiana B. Turnip, S. Handani, and S. Mulyadi, "Pengaruh Penambahan Inhibitor Ekstrak Kulit Buah Manggis Terhadap Penurunan Laju Korosi Baja ST-37 Lusiana Br Turnip, Sri Handani, Sri Mulyadi," *J. Fis. Unand*, vol. 4, no. 2, pp. 144–149, 2015.
- [3] Ngadenin., H. Syaeful, K. S. Widana, I. G. Sukadana, and F. D. Indrastomo, "Studi Potensi Thorium pada Batuan Granit di Pulau Bangka," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 16, no. 2, pp. 143–155, 2014.
- [4] M. Ariani, Supardi., F. Monado,

- and Z. Su'ud, "Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN," in *Prosiding Semirata 2015 bidang MIPA BKS-PTN Barat*, 2015, pp. 39–45.
- [5] T. Kamei and S. Hakami, "Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR," in *Progress in Nuclear Energy*, 2011.
- [6] E. Dewita, "Analisis Potensi Thorium Sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, 2012.
- [7] S. Alimah, E. Dewita, and S. Ariyanto, "Analisis Komparasi HTGR Tipe Prismatic dan Pebble Bed," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 16, no. 1, pp. 11–12, 2014.
- [8] E. Dewita, D. Priyambodo, and S. Alimah, "Sistem Kopling PLTN Tipe HTGR dengan Instalasi Produksi Hidrogen," in *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir IV Jakarta*, 2011, pp. 184–194.
- [9] A. S. Fauzia, "Studi Perbandingan Penggunaan Gas Helium Dan Karbon Dioksida sebagai Pendingin pada High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) Berbahan Bakar Mixed Oxide dan Aktinida Minor," 2009.
- [10] P. . Zweifel, *Reactor Physics*. USA: McGraw-Hill, 1973.
- [11] D. F. Riska and H. . Feriska, "Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂)," *J. Fis. Unand*, vol. 5, no. 1, pp. 28–34, 2016.
- [12] B. McDowell, M. Mitchell, R. Pugh, J. Nickolaus, and G. Swearingen, "High Temperature Gas Reactors : Assessment of Applicable Codes and Standards," 2011.

