

Optimisasi Ukuran Teras *High Temperature Gass-cooled Reactor* (HTGR) dengan Daya 30 MWt Tipe *Pebble Bed* Berbasis Bahan Bakar Uranium

Desi Armanita¹, Dian Fitriyani¹, Topan Setiadipura²

¹Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163 Indonesia

²Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) BATAN Serpong, Tangerang Selatan

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 14 Oktober 2019
Direvisi: 20 Oktober 2019
Diterima: 23 Oktober 2019

Kata kunci:

HTGR
pass
pebble bed

Keywords:

HTGR
pass
pebble bed

Desi Armanita
Email: desiarmanita24@gmail.com

ABSTRAK

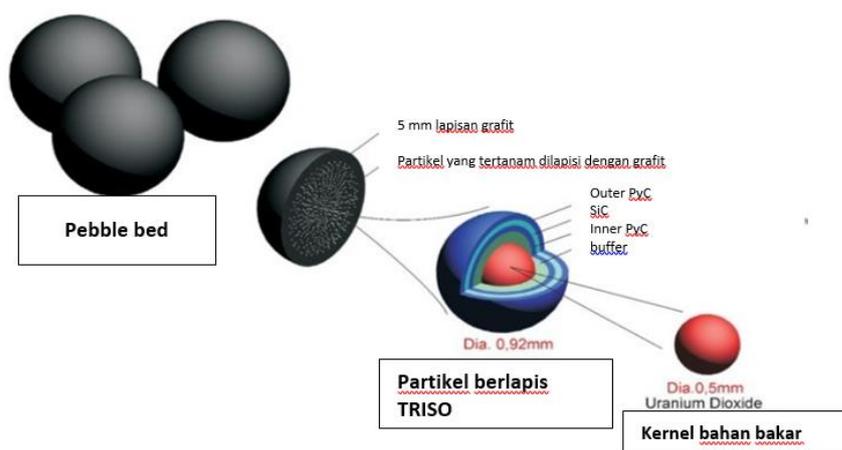
Telah dilakukan optimasi ukuran teras Reaktor daya Eksperimental (RDE). Optimasi ini bertujuan untuk memperoleh ukuran teras yang optimal untuk RDE 30 MWt berdasarkan aspek neutronik antara lain *discharge burn up*, *fuel residence time* dan distribusi daya dan aspek keselamatan. Pada tahap awal dilakukan optimasi *pass* bahan bakar. *Pass* bahan bakar menyatakan jumlah sirkulasi bahan bakar ke teras reaktor dan parameter optimasi *pass* adalah nilai *power peaking factor* mendekati 1, *discharge burn up* tinggi serta memiliki temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC rendah. Berdasarkan parameter tersebut didapatkan *pass* optimal adalah 5 *pass*. Variasi ukuran teras ditentukan dengan dua cara, yaitu variasi ukuran teras pada volume tetap dan variasi tinggi teras pada diameter tetap. Tahap selanjutnya, terhadap ukuran teras yang optimal, dilakukan optimasi fraksi *enrichment* dan heavy metal *loading* bahan bakar. Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa pada volume tetap (5 m³) parameter-parameter neutronik bernilai optimal jika ukuran diameter teras 1,5 m dan tinggi 2,83 m, sedangkan pada diameter teras tetap (1,8 m) parameter-parameter neutronik optimal pada ukuran tinggi teras 3,931 m. Pada kedua ukuran teras ini aspek keselamatan, *discharge burn up* dan *fuel residence time* optimal pada *enrichment* 17% dan heavy metal *loading* 6 grU/*pebble*.

Core size optimization of Experimental Power Reactor (EPR) has been done. This optimization aims to obtain the optimal core size for the RDE 30 MWt based on the neutronik aspect among other discharge burn ups, fuel residence time, power distribution and safety aspect. In the early stages the fuel pass optimization is done. The fuel pass is the amount of fuel circulation to the reactor core and the pass optimization parameter is the value of power peaking factor approaching 1, high discharge burnup as well as having a fuel peak temperature after DLOFC is low. According to the parameters, the optimal pass is 5 passes. The variation in the size of the core is determined in two ways, which is the core size variation on fixed volumes and a high variation of the core at fixed diameter. The next stage, against the optimal core size, carried out the optimization of the fraction of enrichment and heavy metal loading fuel. From the results of the calculations obtained that on a fixed volume (5 m³) neutronik parameters are optimal if the size of the core diameter is 1.5 m and height 2.83 m, while on the fixed diameter of the ratio (1.8 m) The optimal neutronik parameters of on the size Height of core 3.931 m. On both of these core sizes are safety aspects, discharge burn up and fuel residence time is optimal on the enrichment of 17% and heavy metal loading 6 grU/pebble.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Saat ini penelitian dan perkembangan teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) telah mencapai tahap generasi IV yang merupakan pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya. Dari satu generasi ke generasi berikutnya menunjukkan tingkat efisiensi, keselamatan, dan keamanan yang semakin baik (Mondjo, 2013). Salah satu jenis reaktor generasi IV adalah *High Temperature Reactor* (HTR). HTR merupakan salah satu tipe reaktor nuklir yang menggunakan grafit sebagai moderator dan gas helium sebagai pendingin (juga disebut *High Gas-cooled Temperature Reactor*, HTGR). Salah satu kelebihan HTR adalah selain dapat digunakan sebagai pembangkit listrik juga dapat dimanfaatkan untuk proses produksi lainnya, misalnya untuk produksi hidrogen dan desalinasi air laut, sehingga sering disebut dengan reaktor nuklir ko-generasi. Salah satu jenis HTR yang telah dioperasikan adalah HTR 10 dengan daya 10 MWt di *Institute of Nuclear Energy Technology* (INET), *Tsinghua University*, China. Suhu rerata helium *inlet* dan *outlet* pada HTR 10 adalah 250°C dan 700°C. HTR 10 mempunyai diameter teras 1,8 m dan ketinggian rata-rata teras adalah 1,97 m yang berisi sekitar 27.000 *pebble* (Nagaya dkk, 2004). Bahan bakar HTR-10 berbentuk *pebble* yang di dalamnya berisi lapisan TRISO. Partikel ini tertanam di dalam matriks grafit untuk membentuk elemen bahan bakar. Matriks grafit berfungsi sebagai moderator dan juga memiliki karakteristik memindahkan panas dari inti secara konveksi (Nursyahid dkk, 2016). Skema geometrik bahan bakar *pebble* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema geometrik *pebble bed*

(Sumber : warstek, 2019)

HTGR tipe *pebble bed* memiliki keunggulan dalam aspek strategi nasional dan tekno-ekonomi dibandingkan tipe prismatik (Alimah dkk, 2014). HTGR dengan bahan bakar jenis TRISO *pebble bed* memiliki bahan bakar bergerak, dimana dalam hal ini bahan bakar dimasukkan dari bagian atas teras reaktor dan secara acak akan turun ke bagian bawah teras hingga bahan bakar mencapai masa *burn up* akhir. Setelah itu, bahan bakar dikeluarkan dari bagian bawah teras reaktor. Jika bahan bakar belum mencapai masa akhir *burn up*, bahan bakar tersebut dapat disirkulasikan kembali ke bagian atas reaktor (Zuhair, 2012). Bahan bakar disirkulasikan satu kali yang disebut *Once Through Then Out* (OTTO) sedangkan bahan bakar yang disirkulasikan beberapa kali sesuai yang diinginkan disebut *multipass*.

Pada saat ini, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) Indonesia sedang merencanakan akan membangun fasilitas penelitian reaktor nuklir yang dapat menghasilkan listrik yang diberi nama Reaktor Daya Eksperimental (RDE). Disain RDE mengadopsi tipe teras HTR 10 dengan perkiraan daya nominal 10 MWt berbahan bakar tipe *pebble bed*. Untuk itu, serangkaian penelitian telah dan sedang dilakukan untuk mendukung rencana tersebut dalam berbagai aspek.

Dalam desain teras reaktor juga harus memperhatikan aspek keselamatan, dan RDE telah dilengkapi dengan fitur keselamatan pendingin pasif. Setiadipura dkk (2018) telah melakukan kajian terhadap fitur keselamatan pendingin pasif RDE dalam kecelakaan terparah yaitu kecelakaan akibat hilangnya tekanan pada pendingin (*depressurized loss of forced cooling*, DLOFC). Pada jenis kecelakaan ini, tekanan pendingin reaktor turun secara signifikan akibat patahan pada saluran pendingin. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa jika kecelakaan DLOFC terjadi, temperatur puncak bahan bakar (*peak fuel temperature*) setelah DLOFC tidak melewati batas aman (1620°C). Dengan demikian desain RDE 10 MWt memiliki fitur keselamatan yang baik.

Dalam upaya meningkatkan efisiensi dan lebih menguntungkan secara ekonomi, maka perlu dilakukan pengembangan terhadap RDE 10 MWt agar bisa menghasilkan daya yang lebih besar. Pada penelitian ini dirancang disain teras RDE dengan daya 30 MWt, Ukuran tinggi teras reaktor berpengaruh terhadap reaktivitas teras, semakin tinggi ukuran teras maka semakin besar reaktivitas terasnya. Ukuran teras yang semakin besar menyebabkan ruang gerak bagi inti untuk bereaksi fisi semakin luas sehingga reaksi fisi yang terjadi semakin meningkat dan menghasilkan neutron dengan jumlah yang lebih banyak (Utami dan Yulianti, 2013). Untuk itu, pada desain teras RDE daya 30 MWt perlu dilakukan optimasi ukuran teras terhadap aspek-aspek neutronik, antara lain nilai burn up, distribusi daya dan *fuel residence time* serta aspek keselamatan.

2. METODE

2.1 Spesifikasi Umum dan Desain HTGR

Spesifikasi teras dan bahan bakar reaktor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1, Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 1 Spesifikasi disain HTGR

Parameter	Spesifikasi
Daya Termal	30 MWt
Geometri Teras	Silinder (R-Z)
Bahan Bakar	<i>Pebble bed</i>
Pendingin	Helium
Reflektor	Grafit

(Sumber : Setiadipura dkk, 2018)

Tabel 2 Spesifikasi teras RDE 10 MWt

Parameter	Spesifikasi
Tinggi teras aktif	197 cm
Diameter teras aktif	180 cm
Ketebalan reflektor atas	130 cm
Ketebalan reflektor bawah	150 cm
Ketebalan reflektor samping	100 cm
Void	40 cm

(Sumber : Setiadipura dkk, 2018)

Tabel 3 Spesifikasi bahan bakar dan moderator

Bahan Bakar <i>Pebble</i>	Spesifikasi
Elemen Bakar	
Diameter bola	6,0 cm
Diameter zona bahan bakar (<i>Fueled Zone</i>)	5,0 cm
Tebal <i>shell</i> grafit	0,5 cm
Densitas <i>shell</i> grafit	1,75 g/cm ³
Densitas matriks grafit	1,75 g/cm ³
Partikel Berlapis TRISO	
<i>Fuel kernel</i>	
Diameter <i>Fuel Kernel</i>	0,5 cm
Densitas kernel	10,4 g/cm ³
Lapisan <i>coating</i> (empat lapis)	
Material lapisan (mulai dari <i>kernel</i>)	C ; IpyC ; SiC ; OpyC
Tebal lapisan	95 ; 40 ; 35 ; 40
Densitas lapisan (g/cm ³)	1,04 ; 1,88 ; 3,15 ; 1,88

(Sumber : Setiadipura dkk, 2018)

2.2 Tahapan Penelitian

Langkah awal penelitian adalah menentukan spesifikasi umum dan desain reaktor yang digunakan, kemudian melakukan variasi *pass*, variasi ukuran teras reaktor dan variasi tingkat *enrichment* dan *heavy metal loading* (HM loading) dalam bahan bakar. Perhitungan dilakukan menggunakan program pebbed6. Program pebbed6 melakukan perhitungan hanya pada kondisi setimbang ($k_{eff} = 1$). Sebelum kondisi setimbang tercapai, sirkulasi *pebble* per hari diiterasi sampai konvergen. Dengan demikian, hasil perhitungan pada program pebbed6 sudah menunjukkan teras reaktor berada dalam kondisi setimbang. Persamaan difusi untuk kelompok energi g dapat dilihat pada Persamaan 1.

$$-\vec{\nabla} \cdot D_g(\vec{r}) \cdot \vec{\nabla} \phi_g(\vec{r}) + \sum_{r, g} \vec{r} \phi_g = \sum_{g' = g} \sum_{s = g' \rightarrow g} \vec{r} \phi_g(\vec{r}) + \frac{1}{k} \chi_g \sum_{g'} \nu_{g'} \sum_{f, g'} \vec{r} \phi_g(\vec{r}) \quad (1)$$

Burn up yang terakumulasi oleh bahan bakar yang terkandung dalam sel adalah jumlah energi yang dilepaskan oleh atom dalam sel per unit heavy metal awal seperti yang tertera pada Persamaan 2.

$$B = \frac{1}{m_{ihm}} \sum_{i=1}^I K_i \sigma_{f, i} (N_{i, f}(t) - N_{i, o}) \phi \Delta V \quad (2)$$

Tingkat akumulasi *burn up* terkait dengan laju perubahan densitas pada isotop yang berfisi dapat dilihat pada Persamaan 3.

$$\frac{dB}{dT} = \frac{1}{m_{ihm}} \left[\sum_{i=1}^I K_i \sigma_{f, i} \left\{ \frac{\partial (N_{i, f}(t) - N_{i, o})}{\partial t} \right\} \right] \phi \Delta V \quad (3)$$

2.2.1 Variasi *Pass*

Pass adalah jumlah sirkulasi bahan bakar ke teras reaktor. Model *default* yang sudah ada adalah RDE 10 MWt dengan 5 *pass*. Pada penelitian ini dilakukan variasi *pass* kembali untuk mengetahui *pass* optimal jika daya reaktor dinaikkan menjadi 30 MWt dengan tetap menggunakan geometri teras *default* RDE yaitu diameter 1,8 m dan tinggi 1,97 m. Variasi *pass* dilakukan sebanyak 15 variasi yaitu 1 *pass* sampai 15 *pass*. Pengubahan variasi *pass* dilakukan pada *card* 0711 di *input* program.

2.2.2 Variasi Ukuran Teras Reaktor

- a. Variasi ukuran teras reaktor dengan volume teras tetap.
Volume teras yang digunakan adalah volume teras RDE 10 MWt yaitu 500 cm³, sehingga variasi tinggi dan geometri teras reaktor seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Variasi tinggi dan diameter teras reaktor dengan volume teras tetap

Volume teras (cm ³)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	H/D
500	150	283	1,8
500	160	249	1,5
500	165	234	1,4
500	180	197	1,09
500	190	176	0,9
500	210	144	0,6

H/D merupakan perbandingan tinggi dan diameter teras reaktor. Variasi ukuran teras reaktor pada volume teras tetap mengakibatkan H/D teras reaktor berbeda.

- b. Variasi ukuran teras reaktor dengan diameter teras tetap
Diameter teras yang digunakan adalah diameter teras RDE 10 MWt yaitu 1.8 m. Tinggi teras reaktor berubah mengikuti perubahan volume teras reaktor. Perhitungan volume teras tersebut berbasis densitas daya didasarkan pada Persamaan 4.

$$\rho = \frac{\rho_{tot}}{V_{tot}} \quad (4)$$

sehingga diperoleh variasi volume teras reaktor dengan diameter tetap seperti pada Tabel 5.

Tabel 5 Variasi tinggi teras dengan diameter tetap

Densitas daya (Wt/cc)	Volume (m ³)	Diameter (m)	Tinggi (m)
2	15	1,8	5,897
3	10	1,8	3,391
4	7,5	1,8	2,948
5	6	1,8	2,359
6	5	1,8	1,970
7	4,285	1,8	1,694
8	3,75	1,8	1,474

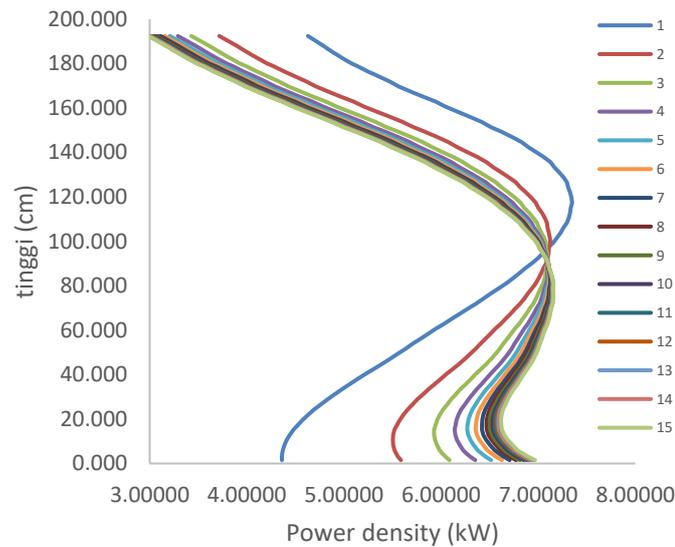
- c. Variasi *Enrichment* dan Heavy metal loading Bahan Bakar

Pada penelitian ini, variasi fraksi *enrichment* dilakukan dengan acuan model *default* HTR 10 sebesar 17% kemudian dipilihlah angka *enrichment* terdekat dan lebih rendah. Pada masing-masing variasi *enrichment* dilakukan variasi *heavy metal* yaitu 5 grU/*pebble*, 6 grU/*pebble* dan 7 grU/*pebble*.

3. HASIL DAN DISKUSI

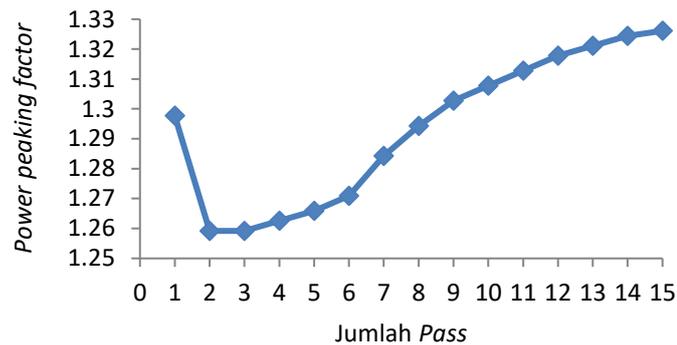
3.1 Optimasi *Pass*

Pada variasi *pass* yang telah dilakukan diperoleh distribusi daya seperti yang tertera pada Gambar 2. Pada bagian bawah teras reaktor, daya kembali meningkat. Hal ini terjadi ketika neutron dipantulkan oleh reflektor ke bagian tengah teras reaktor, namun sebelum neutron sampai ke bagian tengah teras reaktor, neutron sudah terlebih dulu melakukan reaksi fisi dengan bahan bakar yang dilaluinya.



Gambar 2 Distribusi daya aksial pada variasi *pass*

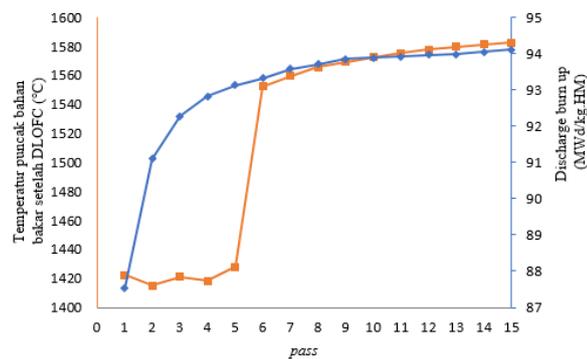
Semakin banyak jumlah *pass* yang dilakukan distribusi daya diteras reaktor semakin tidak merata pula, ini ditandai dengan nilai *power peaking factor* yang semakin tinggi.



Gambar 3 *Power peaking factor* pada variasi *pass*

Pada desain teras yang diamati, untuk *Pass 2, 3, 4* dan *5* memiliki nilai *power peaking factor* rendah. Selanjutnya *power peaking factor* akan semakin meningkat seiring bertambah banyaknya *pass*. Hasil ini berbeda jika dibandingkan dengan teras reaktor berukuran besar, yaitu hubungan variasi *multipass* dengan *power peaking factor* didapatkan hasil bahwa skema pembakaran *multipass* secara keseluruhan lebih baik dibandingkan dengan OTTO dan semakin banyak jumlah *pass* menyebabkan nilai *power peaking factor* semakin kecil.

Parameter lain yang harus dipertimbangkan adalah temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC pada masing-masing *pass*, semakin banyak *pass* maka temperatur bahan bakar setelah DLOFC semakin meningkat. Desain yang diinginkan yaitu temperatur bahan bakar setelah kecelakaan DLOFC masih dikategorikan aman bahkan yang terendah dan nilai *discharge burn up* semakin tinggi. Berdasarkan Gambar 4 dilihat bahwa ketika *pass 6* nilai temperatur bahan bakar setelah kejadian DLOFC meningkat dengan sangat signifikan, sehingga *pass 6* sampai *pass 15* tidak dapat dipilih.



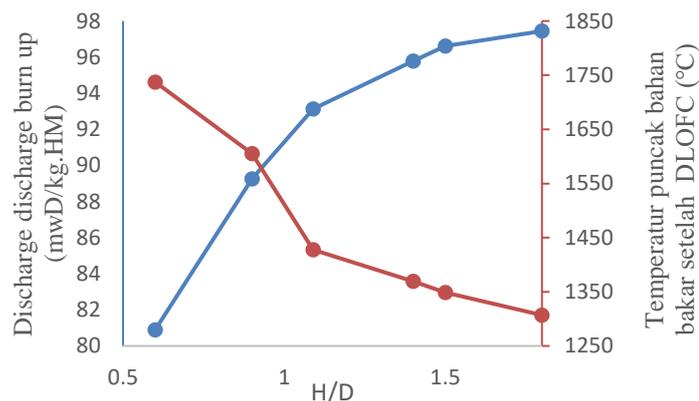
Gambar 4 Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC dan *discharge burn up* pada variasi *pass*

Pass yang dapat dipilih adalah 2, 3, 4 dan 5. *Pass* 5 memiliki nilai *discharge burn up* paling tinggi dibandingkan 3 *pass* lainnya yaitu 93,13 MWd/kg.HM. Atas dasar uraian-uraian inilah, *pass* 5 dipilih sebagai *pass* yang optimal untuk optimasi selanjutnya.

3.2 Optimasi ukuran geometri teras

3.2.1 Optimasi ukuran geometri teras pada volume tetap

Teras reaktor yang pipih dan tinggi menunjukkan adanya pengaruh terhadap nilai *discharge burn up* dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC di teras reaktor.



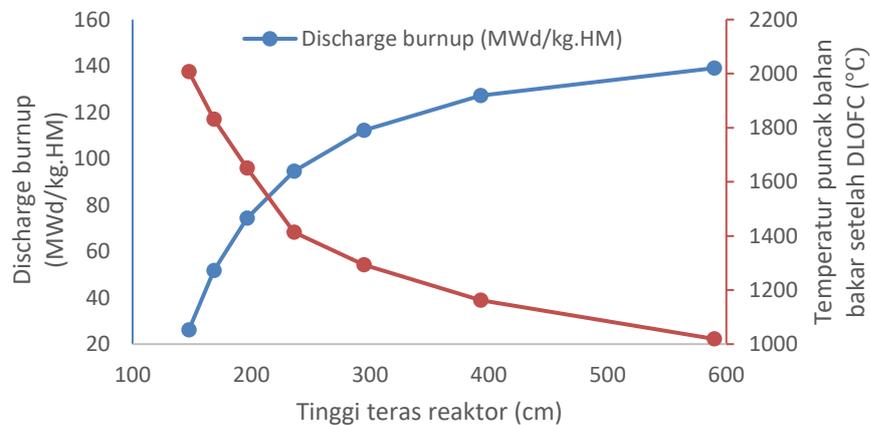
Gambar 5 *Discharge burn up* dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC

Gambar 5 memperlihatkan bahwa nilai *discharge burn up* H/D yang tidak memenuhi syarat parameter perhitungan adalah H/D 0,9 dan H/D 0,6 sehingga tidak dapat dipilih sebagai ukuran geometri yang optimal. Dengan demikian teras reaktor yang pipih tidak menguntungkan jika ditinjau dari nilai *discharge burn up*, karena pada teras reaktor yang pipih, pergerakan bahan bakar menjadi lebih lambat yang menyebabkan interaksi dengan neutron menjadi lama. Sedangkan pada teras reaktor yang tinggi, pergerakan bahan bakar lebih cepat sehingga reaksi fisi banyak terjadi dan menyebabkan nilai *discharge burn up* semakin tinggi pula.

Teras reaktor yang pipih juga menunjukkan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC tinggi, sehingga teras reaktor yang pipih memiliki aspek keselamatan yang kurang baik. Ukuran teras reaktor yang tinggi (H/D tinggi) memiliki nilai *discharge burn up* yang tinggi serta aspek keselamatan yang baik. H/D 1,8 memiliki nilai *discharge burn up* tertinggi dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC terendah. Berdasarkan alasan-alasan inilah, ukuran geometri teras H/D 1,8 dipilih sebagai ukuran geometri teras reaktor paling optimal.

3.2.2 Optimisasi ukuran geometri teras pada diameter tetap

Desain geometri teras yang relatif kecil akan membuat bangunan reaktor yang minimalis dan ekonomis. Hubungan tinggi teras reaktor terhadap temperatur puncak bahan bakar setelah *DLOFC* dan *discharge burn up* dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 *Discharge burn up* dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC

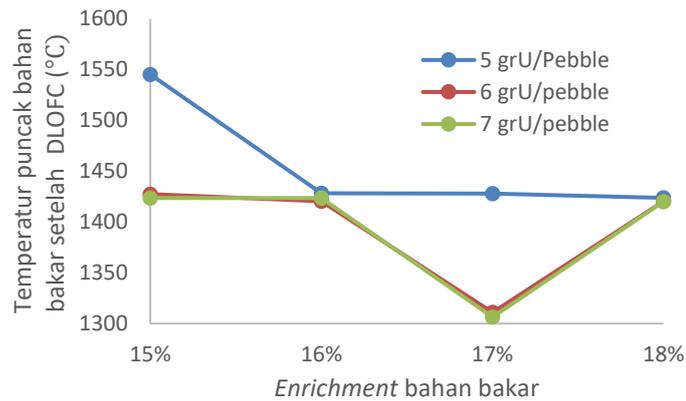
Teras reaktor yang semakin tinggi menyebabkan ruang untuk terjadinya reaksi fisi semakin banyak, sehingga nilai *discharge burn up* meningkat. Tinggi 235,9 cm ; 294,8 cm ; 393,1 cm dan 589,7 cm nilai *discharge burn up* nya memenuhi syarat parameter perhitungan yang ditetapkan, sedangkan yang lainnya tidak. Desain teras yang diharapkan adalah menguntungkan dari segi nilai *discharge burn up* tetapi temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC rendah.

Dalam mempertimbangkan keekonomisan dari sebuah bangunan, bangunan yang lebih minimalis akan menjadi sebuah pilihan. Dapat kita lihat pada Gambar 5, ketinggian teras 589,7 cm menunjukkan hasil terbaik, tetapi angka ketinggian ini tidak memungkinkan jika diameter teras hanya 180 cm. Dengan demikian tinggi teras 589,7 tidak dapat dipilih sebagai tinggi teras yang optimal. Dengan dasar-dasar inilah geometri teras yang optimal adalah 393,1 cm dan diameter 180 cm dengan *power density* rerata 3 W/cc.

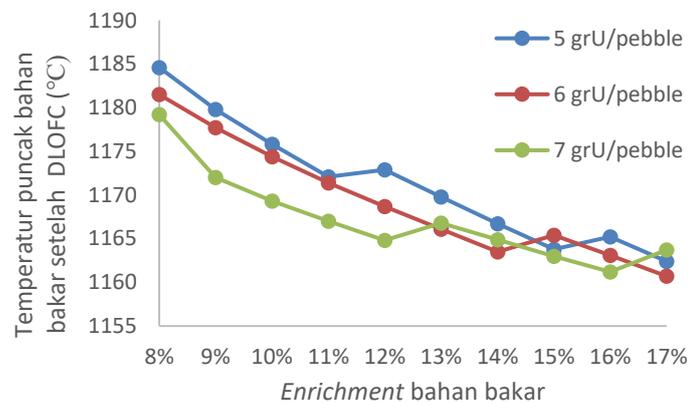
3.3 Optimisasi *enrichment* dan *heavy metal loading* bahan bakar pada H/D 1,8 dan tinggi teras 393,1 cm

Tingkat *enrichment* dan HM *loading* bahan bakar mempengaruhi nilai *discharge burn up*, temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC, jumlah *pebble* yang disirkulasi per hari dan *fuel residence time*. Semakin tinggi tingkat *enrichment* dan HM *loading* bahan bakar maka nilai *discharge burn up* dan *fuel residence time* akan semakin besar pula, karena jika tingkat pengayaan dan HM *loading* bahan bakar ditingkatkan, maka jumlah ^{235}U semakin banyak didalam *pebble* sehingga reaksi fisi semakin banyak terjadi. Jika reaksi fisi semakin banyak terjadi, maka *fuel residence time* akan semakin lama, dengan demikian waktu tinggal bahan bakar didalam teras reaktor semakin lama, ini merupakan salah satu parameter pada optimisasi desain reaktor.

Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC berbanding terbalik dengan tingkat *enrichment* dan HM *loading* bahan bakar, temperatur tersebut dapat dilihat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC terendah pada H/D 1,8 adalah 17% dengan HM *loading* 7 grU/*pebble*, sedangkan pada tinggi teras 3,931 m adalah 17% dengan HM *loading* 6 grU/*pebble*. Jika ditinjau dari aspek ekonomi, *enrichment* dan HM *loading* bahan bakar yang tinggi tidak menguntungkan dari aspek ekonomi.



Gambar 7 Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC pada H/D 1,8



Gambar 8 Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC pada tinggi 3,931 m

Desain yang diharapkan adalah yang menguntungkan dari aspek keselamatan dan ekonomi serta memperhatikan aspek neutronik (*discharge burn up* dan *fuel residence time*). Atas dasar inilah, *enrichment* 17% dengan *HM loading* 6 grU/pebble dipilih sebagai *enrichment* dan *HM loading* bahan bakar yang optimal untuk ukuran geometri teras tinggi 283 cm dengan diameter 150 cm (H/D 1,8) dan tinggi 393,1 cm dengan diameter 180 cm.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan pada RDE 30 MWt dapat disimpulkan bahwa dalam tinjauan parameter-parameter neutronik, desain teras optimal diperoleh pada volume tetap (5 m³) dengan diameter teras 1,5 meter, tinggi teras 2,83 meter dan pada diameter tetap (1,8 m) dengan tinggi teras 3,931 meter, volume 10 m³ dengan masing-masing *enrichment* bahan bakar 17% dan *HM loading* 6 grU/pebble dengan 5 *pass*.

DAFTAR PUSTAKA

- Mondjo., *Pengantar Teknologi Nuklir* (Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013).
 Nagaya, Y. Okumura, K. Mori, T dan Nakazato, W, *Analysis of the HTR-10 initial core with a Monte Carlo mode MVP, Japan Atomic Energy Research Institute, Okayama, 2004.*

- Nursyahid, F, F. Setiadipura, T dan Agung, A, Studi Awal Optimasi Burn-up HTR-PM 150 MWt dengan Menggunakan Bahan Bakar U-Th, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016* (PTKRN BATAN) 2016.
- Setiadipura, T. Bakhri, S. Sunaryo, G, R dan Wisnusubroto, D, S, Cooling *Passive Safety Features* Of Reaktor Daya Eksperimental, *International Conference on Thermal Science and Technology*, 2018.
- Zuhair, investigasi kritikalitas HTR pebble bed sebagai fungsi radius dan pengkayaan bahan bakar kernel, *Indonesian Journal of Applied Physical*, 2(2), hal 146-156.
- Warstek, 2019, <https://warstek.com/2018/04/21/rdebatan/>, diakses 25 september 2019.