

## Analisis Neutronik dan Temperatur Bahan Bakar Setelah *Depressurized Loss of Forced Cooled (DLOFC)* pada *Pebble Bed Reactor (PBR)* dengan *Upgrade Daya*

Amalia Rosyidah<sup>1\*</sup>, Dian Fitriyani<sup>1</sup>, Topan Setiadipura<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163 Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN) BATAN Serpong, Tangerang Selatan

### Info Artikel

#### Histori Artikel:

Diajukan: 6 Januari 2020  
Direvisi: 12 Januari 2020  
Diterima: 16 Januari 2020

#### Kata kunci:

DLOFC  
HM loading  
HTR-PM  
pebble bed

#### Keywords:

DLOFC  
HM loading  
HTR-PM  
pebble bed

#### Penulis Korespondensi:

Amalia Rosyidah  
Email: [amaliarosyidah@gmail.com](mailto:amaliarosyidah@gmail.com)

### ABSTRAK

Pada penelitian ini dilakukan analisis neutronik dan temperatur bahan bakar setelah DLOFC pada *Pebble Bed Reactor (PBR)* dengan *upgrade daya*. Reaktor acuan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu HTR-PM. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh desain reaktor dengan daya 300 MWt. Perhitungan dalam penelitian ini menggunakan *software* PEBBED6 *code*. Pada tahap awal dilakukan *upgrade daya* pada desain *default* HTR-PM. Parameter neutronik yang diperhatikan dalam penelitian ini yaitu nilai *burnup* yang tinggi dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC tidak melebihi 1620 °C. Berdasarkan capaian kedua parameter tersebut, daya pada desain *default* HTR-PM hanya dapat ditingkatkan hingga 260 MWt. Selanjutnya perhitungan pada daya yang di-*upgrade* disertai dengan pengaturan pada *enrichment* dan HM *loading*. Dari hasil pengamatan disimpulkan bahwa dengan *enrichment* dan HM *loading* yang tinggi maka semakin tinggi densitas bahan fisil sehingga dapat memperbesar nilai *burnup* dan juga temperatur puncak setelah DLOFC. Selanjutnya dilakukan optimasi ketinggian dan diameter teras reaktor dengan volume teras *default* (77,44 m<sup>3</sup>). Diameter teras yang diperkecil dapat menghantarkan panas hasil reaksi fisi keluar teras lebih maksimal. Kemudian dilakukan pengaturan *enrichment* dan HM *loading* bahan bakar kembali untuk mendapatkan daya maksimal. Desain optimal pada penelitian ini diperoleh untuk daya 300 MWt dengan HM *loading* 6 gU/*pebble*, *enrichment* 8,5% dan tinggi teras 14,64 m yang dapat menghasilkan nilai *burnup* 77,11 MWd/Kg.HM.

*In this research neutron and fuel temperature analysis is done after DLOFC on the Pebble Bed Reactor (PBR) with a power upgrade. The reference reactor used in this study is HTR-PM. This study aims to obtain a reactor design with 300 MWt of power. The calculation in this study use the PEBBED6 code software. In the initial stage, a power upgrade is performed on the default HTR-PM design. The neutronic parameters considered in this study are high burnup values and peak temperature after DLOFC do not exceeding 1620 °C. Based on the achievement of the two parameters, the power in the default HTR-PM design can only be increased up to 260 MWt. Furthermore, calculation on the upgraded power are accompanied by setting on the enrichment and HM loading. The next step is optimizing the height and diameter of the reactor core by maintaining the default core volume (77.44 m<sup>3</sup>). The reduced diameter of the terrace can deliver maximum heat from the fission reaction outside the terrace. Then the enrichment and HM loading of the fuel are regulated to get maximum power. The optimal design in this study was obtained for 300 MWt power with HM loading of 6 gU/*pebble*, 8.5% enrichment and a terrace height of 14.64 m which can produce a burnup value of 77.11 MWd/Kg.HM.*

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

PLTN masih menjadi polemik yang menimbulkan pro-kontra di masyarakat Indonesia maupun di sebagian negara. Walaupun demikian, kecelakaan reaktor yang pernah terjadi di Chernobyl dan Fukushima menjadi salah satu pemicu pesatnya perkembangan teknologi reaktor. Saat ini penelitian dan perkembangan teknologi PLTN telah mencapai tahap generasi IV yang merupakan pengembangan dari PLTN generasi sebelumnya. Dari setiap perkembangan dari satu generasi ke generasi selanjutnya menunjukkan tingkat efisiensi, keselamatan dan keamanan yang semakin baik. Keunggulan dari reaktor generasi IV meliputi aspek ekonomi yaitu pengurangan biaya pokok, aspek keamanan nuklir yang ditingkatkan, limbah nuklir diperkecil dan pengurangan lebih lanjut dalam resiko pembuatan senjata.

*High Temperature-Gas Cooled Reactor* (HTGR) merupakan salah satu kandidat reaktor nuklir generasi IV yang menawarkan keuntungan selain pembangkit tenaga listrik, yaitu dalam produksi hidrogen dan ramah lingkungan. HTGR didesain menggunakan bahan bakar keramik dengan sistem keamanan yang terpadu dan melekat (*inherent safety*). *Inherent safety* pada HTGR didasarkan pada tingginya kapasitas termal grafit dalam teras untuk mentransfer panas ke permukaan luar reaktor dengan konduksi dan radiasi pada kondisi tidak adanya pendingin (Zuhair dkk., 2011).

Salah satu jenis HTGR adalah *Pebble Bed Reactor* (PBR) yaitu desain HTGR dengan bahan bakar jenis *Pebble Bed*. *Pebble Bed* adalah bahan bakar berlapis yang berada di dalam suatu *shell* berbentuk bola. Reaktor serupa telah dioperasikan di Cina sejak tahun 2003 dengan nama HTR-10. Reaktor ini dapat menghasilkan daya termal sebesar 10 MW. Kemudian Cina juga mengoperasikan HTGR komersial pertama di dunia, yaitu *High Temperature Reactor Pebble Modular* (HTR-PM). HTR-PM memiliki daya sebesar 250 MWt, dengan geometri teras reaktor yang besar. Ketinggian teras HTR-PM mencapai 11 meter dan diameter teras sebesar 3 meter (IAEA, 2011).

Indratoro dkk (2016) melakukan penelitian tentang reaktor berbasis HTR-PM minimalis dengan daya 150 MWt. Hasil penelitian tersebut yaitu ketika radius HTGR diperbesar melebihi 1,5 meter maka panas di dalam teras akan sulit untuk mengalir keluar teras dan mengakibatkan menurunnya faktor keselamatan. Setiadi 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).

Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan mengenai desain HTGR, reaktor ini merupakan reaktor yang berpotensi untuk dikembangkan dan digunakan sebagai pembangkit listrik di Indonesia. Desain HTGR yang paling optimal masih perlu terus disempurnakan sehingga serangkaian penelitian perlu dilakukan agar reaktor dapat menghasilkan daya yang besar dengan kinerja neutronik yang baik dan keselamatan yang baik pula. Penelitian yang akan dilakukan pada PBR yaitu meningkatkan daya hingga 300 MWt. Daya yang lebih besar diharapkan dapat mengalirkan listrik untuk cakupan luas daerah yang lebih besar. Analisis neutronik yang diinginkan yaitu mendapat nilai *burnup* yang maksimal dan *power density* yang optimal. Perhitungan dilakukan menggunakan *PEBBED6 code* yang merupakan program binari yang dirilis oleh *Idaho National Laboratory* (INL) pada tahun 2015.

## II. METODE

### 2.1 Spesifikasi Desain Teras HTGR

Langkah pertama yang dilakukan yaitu menentukan desain acuan untuk penelitian. Spesifikasi teras dan bahan bakar reaktor yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1** Spesifikasi desain reaktor

Parameter	Spesifikasi
Daya	250 MWt
Tinggi / diameter teras	11 / 3 m
Temperatur inlet / outlet He	260 / 760
Tekanan He primer	7 Mpa
Pengayaan 235U	8,5 %
HM-loading per <i>pebble</i>	7 gU/ <i>pebble</i>
Diameter bahan bakar	6 cm
Jumlah bahan bakar <i>pebble</i> dalam reaktor	~420.000

(Sumber : Setiadipura dkk., 2016)

## 2.2 Tahapan Penelitian

Perhitungan menggunakan PEBBED6 *code* diawali dengan menentukan spesifikasi umum desain reaktor. Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan pada kondisi *upgrade* daya dengan pengaturan mula-mula terhadap fraksi *enrichment* dan kemudian melakukan variasi HM *loading* bahan bakar. Pada perhitungan ini juga dilakukan pengaturan variasi ketinggian dan diameter teras reaktor. Pada simulasi ini perhitungan sirkulasi *pebble* per-hari diiterasi hingga konvergen dan tercapai kondisi setimbang ( $k_{eff} \sim 1$ ). Dengan demikian, hasil perhitungan sudah menunjukkan kondisi teras reaktor yang telah berada dalam kondisi setimbang.

### 2.2.1 Variasi enrichment

Desain *default* HTR-PM daya 250 MWt menggunakan fraksi *enrichment* yaitu 8,5%. Selanjutnya, perhitungan pada masing-masing daya yang sudah di *upgrade* dilakukan dengan variasi *enrichment* bahan bakar untuk melihat pengaruh fraksi *enrichment* terhadap parameter-parameter neutronik di dalam teras reaktor. Variasi *enrichment* yang digunakan adalah 6%, 7%, 10% dan 11%.

### 2.2.2 Variasi heavy metal loading

Desain *default* reaktor HTR-PM tidak mampu menghasilkan kinerja neutronik yang baik jika daya di-*upgrade* hingga 300 MWt. Untuk mengatasi keadaan ini maka pada saat daya di-*upgrade* dilakukan upaya pengaturan variasi HM *loading*. Desain *default* HTR-PM yaitu menggunakan HM *loading* 7 gU/*pebble* yang kemudian divariasikan dengan angka yaitu 5 gU/*pebble*, 6 gU/*pebble*, dan 8 gU/*pebble*.

### 2.2.3 Variasi ketinggian dan diameter teras

Langkah selanjutnya untuk memperoleh desain yang optimal adalah dengan upaya memvariasikan ketinggian dan diameter teras dengan volume tetap (77,4 m<sup>3</sup>). Variasi ini dilakukan agar panas hasil reaksi fisi dapat ditransfer keluar teras secara maksimal sehingga dapat mencapai daya 300 MWt dengan kinerja neutronik yang baik. Variasi ketinggian dan diameter teras reaktor dapat dilihat pada Tabel 2

**Tabel 2** Variasi ketinggian dan diameter teras reaktor dengan volume tetap

Tinggi (m)	Diameter (m)
11	3
11,77	2,9
12,63	2,8
13,58	2,7
14,64	2,6
15,84	2,5

### 2.2.4 Upgrade daya dengan variasi enrichment, heavy metal loading dan geometri teras

Penelitian ini bertujuan untuk mendapat daya 300 MWt dengan neutronik yang baik. Jika menggunakan HTR-PM *default*, variasi *enrichment*, variasi HM *loading*, variasi ketinggian dan diameter teras tidak dapat menghasilkan daya 300 MWt dengan neutronik yang baik, maka perlu dilakukan tahap selanjutnya yaitu memvariasikan *enrichment*, HM *loading*, variasi ketinggian dan diameter teras reaktor secara bersamaan.

### III. HASIL DAN DISKUSI

#### 3.1 Hasil perhitungan dengan *upgrade* daya

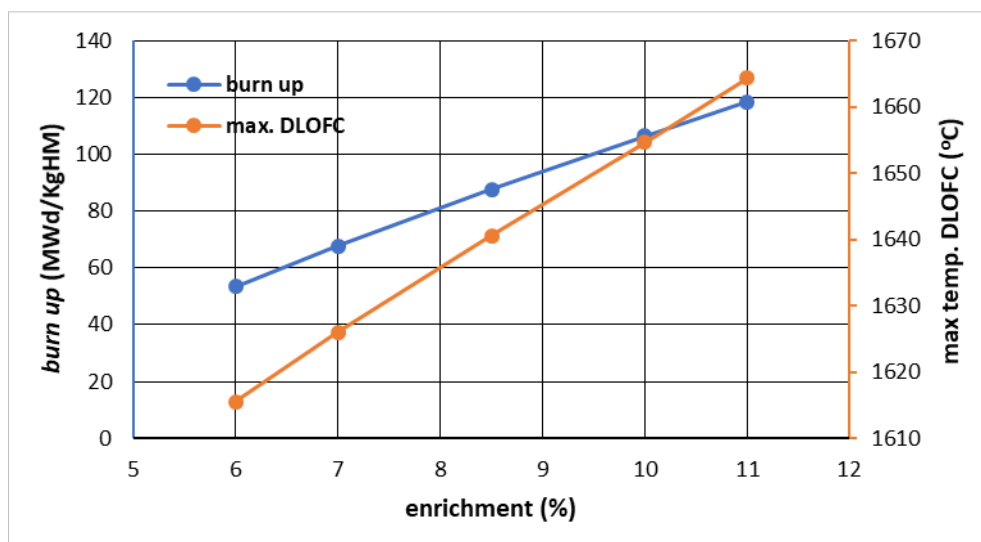
Hasil perhitungan neutronik dan keselamatan reaktor yang dilakukan dengan *upgrade* daya terhadap model *default* reaktor HTR-PM (*enrichment* 8,5%, HM loading 7 gU/pebble, tinggi dan diameter teras 11 m dan 3 m) dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil perhitungan pada kondisi *upgrade* daya menunjukkan bahwa temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC yang tidak melewati batas aman (1620 °C) hanya dicapai pada daya 250 MWt dan 260 MWt. Semakin tinggi daya semakin tinggi pula temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC. Hal ini disebabkan kemampuan transfer panas keluar teras tidak bekerja secara maksimal pada daya yang tinggi dengan desain *default* HTR-PM. Perpindahan panas secara konduksi maupun radiasi akan lebih mudah jika diameter teras diperkecil.

Tabel 3 Hasil perhitungan neutronik dengan *upgrade* daya

Daya (MWt)	Power density rerata (W/cm <sup>3</sup> )	Maks. power density (W/cm <sup>3</sup> )	Power peaking factor	Daya maks. per pebble (kW/peb)	Burnup (MWd/Kg.HM)	Temp. puncak setelah DLOFC (°C)
250	3,22	6,89	2,139	1,961	87,64	1582,8
260	3,34	7,17	2,146	2,039	87,59	1611,9
270	3,47	7,44	2,144	2,116	87,54	1640,6
280	3,60	7,72	2,144	2,193	87,49	1668,7
290	3,73	8,00	2,144	2,272	87,45	1696,8
300	3,86	8,27	2,142	2,348	87,38	1721,0

#### 3.2 Hasil perhitungan pada variasi *enrichment*

Perhitungan pada fraksi *enrichment* 6% menghasilkan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC yang tidak melewati 1620 °C. Semakin tinggi fraksi *enrichment* bahan bakar berarti semakin banyak kuantitas uranium (bahan fisil) di dalam bahan bakar yang menyebabkan lebih banyak terjadi reaksi fisi, sehingga temperatur bahan bakar setelah DLOFC akan semakin tinggi pula. Namun nilai *burnup* pada *enrichment* 6% merupakan nilai *burnup* paling rendah. Hal ini disebabkan semakin rendah *enrichment* maka jumlah energi yang diekstraksi dari bahan bakar semakin sedikit pula. Dengan demikian, tidak ada variasi *enrichment* yang dapat dipilih untuk daya 270 MWt. Grafik nilai *burnup* dan temperatur setelah DLOFC terhadap variasi *enrichment* dapat dilihat pada Gambar 1.

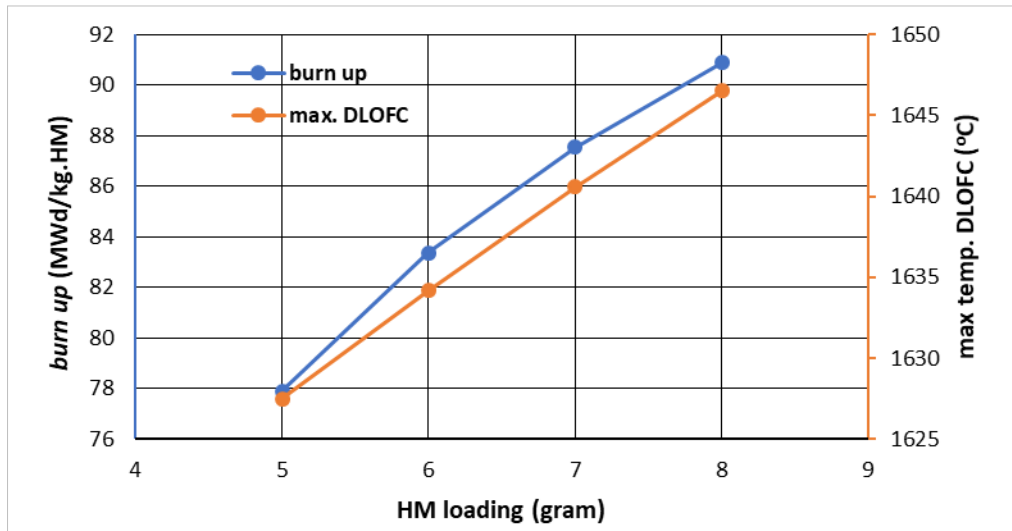


Gambar 1 Temperatur puncak setelah DLOFC dan *burnup* terhadap variasi *enrichment*

#### 3.3 Hasil perhitungan pada variasi *heavy metal loading* bahan bakar

Semua variasi HM loading bahan bakar yang dilakukan pada daya 270 MWt tidak dapat digunakan karena tidak memenuhi batas keselamatan. Namun, untuk nilai *burnup* memiliki nilai yang tinggi dan baik. Semakin besar nilai HM loading mengakibatkan nilai *burnup* semakin tinggi. Karena

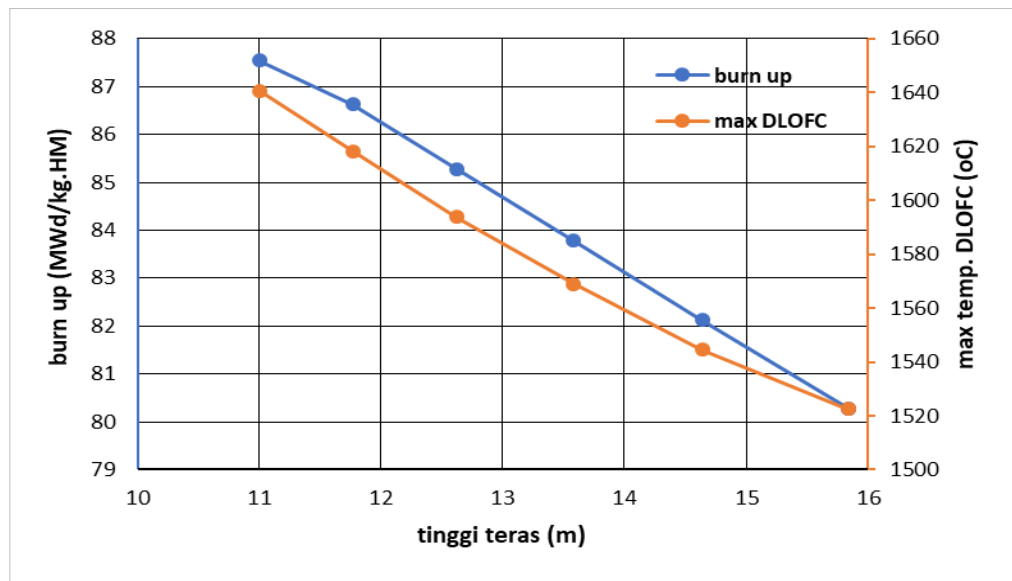
nilai HM loading yang besar berarti memiliki nuklida fisil yang besar pula, sehingga jumlah reaksi fisi meningkat dan menyebabkan nilai *burnup* meningkat. Reaksi fisi yang terjadi juga akan mempengaruhi temperatur bahan bakar. Semakin banyak jumlah reaksi fisi maka semakin tinggi pula temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC. Grafik nilai *burnup* dan temperatur setelah DLOFC terhadap variasi HM loading dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Temperatur puncak setelah DLOFC dan *burnup* terhadap variasi HM loading

### 3.4 Analisis pengaruh geometri teras

Daya 270 MWt dan 280 MWt dapat dihasilkan dengan keselamatan yang baik jika tinggi teras diperbesar dan diameter teras diperkecil. Semakin kecil diameter teras reaktor, semakin rendah temperatur puncak setelah DLOFC. Hal ini disebabkan diameter yang kecil mampu mengantarkan panas secara konduksi dan radiasi ke luar teras reaktor dengan lebih mudah. Daya 270 MWt dapat dihasilkan dengan tinggi teras 11,77 meter dan nilai *burnup* mencapai 86,63 MWd/Kg.HM. Sedangkan daya 280 MWt dapat dihasilkan dengan tinggi teras 13,58 meter dan nilai *burnup* mencapai 83,74 MWd/Kg.HM. Grafik nilai *burnup* dan temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC terhadap variasi tinggi teras dan diameter teras dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Temperatur setelah DLOFC dan nilai *burnup* terhadap tinggi teras

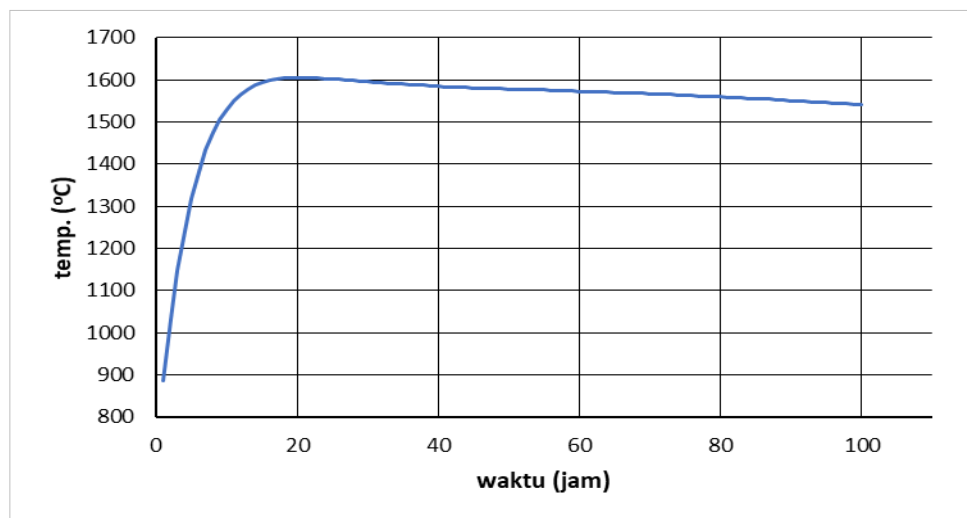
### 3.5 Optimasi teras reaktor daya 290 MWt

Desain reaktor daya 290 MWt dilakukan dengan mengecilkan diameter teras, menurunkan *enrichment* dan juga *HM loading* bahan bakar. Hasil perhitungan optimasi desain reaktor daya 290 MWt dapat dilihat pada Tabel 4. Desain dengan daya 290 MWt yang optimal yaitu pada tinggi teras 13,58 meter, *enrichment* default (8,5%) dan *HM loading* bahan bakar 6 gU/*pebble*. Temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC pada desain tersebut tidak melebihi batas dan memiliki nilai *burnup* yang cukup besar yaitu 79,03 MWd/kg.HM.

**Tabel 4** Hasil perhitungan neutronik daya 290 MWt

HM (g)	Enrichment (%)	Tinggi teras (m)	Diameter teras (m)	Maks. power density (W/cm <sup>3</sup> )	Power peaking factor	Daya maks. per pebble (kW/peb)	Burnup (MWd/Kg.HM)	Temp. puncak setelah DLOFC (°C)
7	8,5	14,64	2,6	8,63	2,313	2334	82,15	1598,2
7	7	13,58	2,7	8,33	2,233	2045	63,56	1603
7	6	13,58	2,7	8,26	2,214	1865	49,45	1591,7
6	8,5	13,58	2,7	8,4	2,252	2257	79,03	1613,3
5	8,5	13,58	2,7	8,34	2,235	2174	72,96	1605,7

Ketinggian teras juga menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam memilih desain reaktor. Desain reaktor dengan teras yang lebih rendah akan lebih ekonomis. Nilai *HM loading* 7 gU/*pebble* dan *enrichment* 8,5% tidak dapat dipilih karena memiliki ketinggian mencapai 14,64 m. Untuk distribusi temperatur bahan bakar jika terjadi DLOFC dapat dilihat pada Gambar 4.



**Gambar 4** Temperatur bahan bakar jika DLOFC

### 3.6 Optimasi teras reaktor daya 300 MWt

Desain reaktor dengan daya 300 MWt dilakukan hal yang sama dengan desain daya 290 MWt. Hasil perhitungan optimasi desain reaktor daya 300 MWt dapat dilihat pada Tabel 5. Perhitungan neutronik pada daya 300 MWt, dan didapatkan desain yang optimal yaitu dengan ketinggian teras 14,64 m, *enrichment* 8,5% dan *HM loading* bahan bakar 6 gU/*pebble*. Desain ini dipilih karena temperatur puncak setelah DLOFC tidak lebih dari 1620 °C dan nilai *burnup* mencapai 77,11 MWd/Kg.HM. *Enrichment* 8,5% dan *HM loading* 7 gU/*pebble* tidak dapat dipilih karena tinggi teras yang mencapai 15,84 meter, ini merupakan kerugian dari segi ekonomi.

**Tabel 5** Hasil perhitungan neutronik daya 300 MWt

HM (g)	Enrichment (%)	Tinggi teras (m)	Diameter teras (m)	Maks. power density (W/cm <sup>3</sup> )	Power peaking factor	Daya maks. per pebble (kW/peb)	Burnup (MWd/Kg.HM)	Temp. puncak setelah DLOFC (°C)
7	8,5	15,84	2,5	9,13	2,365	2423	80,19	1600,4
7	7	14,64	2,6	8,76	2,269	2116	61,78	1602,0
7	6	13,58	2,7	8,56	2,217	1928	49,38	1617,8
6	8,5	14,64	2,6	8,85	2,292	2338	77,11	1613,5
5	8,5	14,64	2,6	8,77	2,272	2245	70,81	1604,6

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan pada model desain HTR-PM dapat disimpulkan bahwa untuk mempertahankan kinerja neutron yang baik pada desain *default*, daya hanya dapat ditingkatkan dari 250 MWt hingga 260 MWt. Melalui pengaturan fraksi *enrichment* dan HM *loading* yang tinggi maka semakin besar pula densitas bahan fisil di dalam bahan bakar sehingga dapat memperbesar nilai *burnup* dan juga temperatur puncak bahan bakar setelah DLOFC. Selanjutnya dengan menambah ketinggian dan mengecilkan diameter teras dapat dihasilkan desain dengan daya 270 MWt (tinggi teras 11,77 meter) dan daya 280 MWt (tinggi teras 13,58 meter). Kemudian Desain dengan kinerja neutronik dan keselamatan yang optimal pada daya 290 MWt diperoleh pada tinggi teras 13,58 meter, *enrichment* 8,5% dan HM *loading* 6 gU/*pebble*, sedangkan untuk daya 300 MWt diperoleh pada tinggi teras 14,64 m, *enrichment* 8,5% dan HM *loading* 6 gU/*pebble*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Indratoro, G. P. Setiadipura, T. dan Agung, A., Optimasi Desain Teras HTGR 150 MWt dengan Variasi Geometri Teras dan Pengayaan Uranium, *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir*, diedit oleh Sembiring, T. M. dkk, (Batam, 2016), hal 889-896.
- Setiadipura, T., Bakhri, S., Sunaryo, G. R. dan Wisnubroto, D. S., Cooling Passive Safety Features of Reaktor Daya Eksperimental, AIP Conference Proceeding, diedit oleh Indartono, Y. S. dkk, (American Institute of Physics, 2018), hal 1-9.
- Setiadipura, T., Pane, J. S., dan Zuhair, Studi Awal Desain Pebble Bed Reactor Berbasis HTR-PM dengan Resirkulasi Bahan Bakar Once Through Then Out, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 18(1), hal 59-65, (2016).
- Zuhair, Suwoto, dan Irianto, I. G., Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Doppler Partikel TRISO Reaktor Temperatur Tinggi, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 13(1), hal 1-8 (2017).
- IAEA., 2011, <https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf>, diakses Agustus 2019.