

DESAIN TERAS DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR) DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC

Sungkowo Wahyu Santoso¹⁾, Andang Widiharto¹⁾, Yohannes Sardjono²⁾

¹⁾Jurusan Teknik Fisika Fakultas Teknik - Universitas Gadjah Mada

²⁾Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN

Email : andangwh@yahoo.com

Diterima editor 5 Mei 2014

Disetujui untuk publikasi 12 Juni 2014

ABSTRAK

DESAIN TERAS DAN BAHAN BAKAR PLTN JENIS PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR) DENGAN MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC. Analisis desain down scale teras dan bahan bakar PBMR-HTR dengan menggunakan program SRAC bertujuan mengetahui pengaruh variasi pengayaan U^{235} , burnable poison, laju aliran pendingin dan suhu pendingin masuk terhadap kekritisan teras serta aspek-aspek keselamatan reaktor nuklir dengan parameter nilai keff dan koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, moderator dan pendingin. Teras PBMR-HTR berbentuk silinder finite dengan lubang ditengahnya yang berisi 334.000 bahan bakar pebble bed. Bahan bakar berupa UO_2 , moderator grafit dan pendingin helium. Model desain down scale dilakukan pada $\frac{1}{2}$ teras yang mewakili keseluruhan teras. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan pengayaan bahan bakar sebesar 8%, 8,5%, 9%, 9,5% dan 10% sementara variasi konsentrasi burnable poison sebesar 5 ppm, 7 ppm, 9 ppm, 11 ppm, dan 15 ppm. Variasi laju aliran pendingin sebesar 60%, 80%, 100%, 120%, dan 140% sementara variasi suhu masukan pendingin sebesar 673,15K; 723,15K; 773,15K; 823,15K dan 873,15K. Pada penelitian ini keff pada BOL tanpa Gd_2O_3 sebesar 1.026213 dan EOL sebesar 0.995865 dengan excess reactivity sebesar 2,5 % dengan pengkayaan U^{235} 9%. Sementara keff pada BOL dengan menggunakan Gd_2O_3 sebesar 1.0069680 dan EOL sebesar 0.9961928 dengan excess reactivity sebesar 0.69 % dengan konsentrasi Gd_2O_3 7 ppm. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, moderator dan pendingin berturut-turut sebesar $-9,074583E-05 /K$, $-2,971833E-05 /K$ dan $1,120700E-05 /K$. Koefisien reaktivitas bernilai negatif menunjukkan karakteristik keselamatan melekat (inherent safety) telah terpenuhi. Peningkatan suhu masukan dan penurunan laju aliran pendingin berkontribusi menurunkan nilai keff teras sehingga koefisien reaktivitas bernilai negatif.

Kata Kunci : PBMR-HTR, kekritikalitas, reaktivitas, down Scale, burnable poison

ABSTRACT

CORE AND FUEL DESIGN FOR PEBBLE BED MODULAR REACTOR (PBMR) USING SRAC COMPUTER CODE. Core and fuel down scale analysis on PBMR-HTR using SRAC program aims to identify the influence of U^{235} enrichment, burnable poison, coolant flow rate and coolant temperature entered to criticality core and safety aspects of nuclear reactor with the parameters are multiplication factor (keff) and fuel temperature coefficient, moderator temperature coefficient and coolant temperature coefficient. Core PBMR-HTR finite cylindrical with a hole in the middle which contains 334,000 pebble fuel bed. That consist of UO_2 fuel, graphite moderator and helium coolant. Down scale the design model performed on the half core represent the whole core. The study was conducted by varying the fuel enrichment of 8%; 8.5%; 9%; 9.5% and 10%, while variation burnable poison enrichment at 5 ppm, 7 ppm, 9 ppm, 11 ppm and 15 ppm. The variation of coolant flow rate of 60%, 80%, 100%, 120% and 140% from its original value at 17.118 kg/s while the variation of coolant temperature input at 673.15 K; 723.15 K; 773.15 K; 823.15 K and 873.15 K. In this research, value of keff without Gd_2O_3 are 1.026213 (BOL) and 1.004173 (EOL) with excess reactivity of 2.55% with 9% U^{235} enrichment. While keff on BOL by using 7 ppm Gd_2O_3 of 1.006968 and 1.004198 for EOL with excess reactivity of 0.69%. Fuel temperature reactivity coefficient, moderator and coolant in a row for $-8.597317E-05/K$; $-2.595284E-05 /K$ and $1.1496E-06/K$. Temperature reactivity coefficient is negative. This indicates inherent safety characteristic have been met. Increasing the input temperature and coolant flow rate reduction lowers the value of keff core, and it will contribute to negative reactivity coefficient.

Keyword : PBMR-HTR, criticality, reactivity, down scale, burnable poison

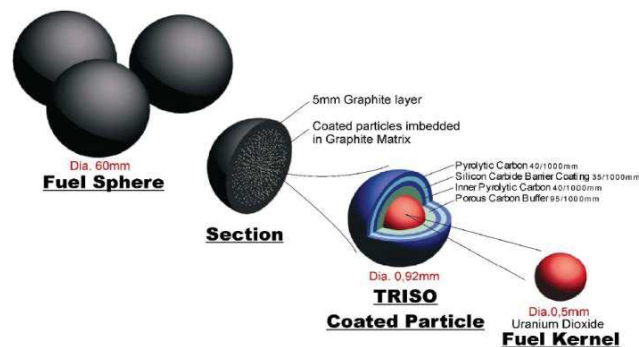
PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik Indonesia berbanding lurus dengan jumlah populasi rakyat Indonesia. Beban daya puncak dan daya terpasang di setiap wilayah Indonesia berbeda-beda seperti di Jawa dapat dibangun pembangkit maksimum daya 1000 MWe, Sumatera 300 MWe, Kalimantan 100 MWe, Sulawesi, Nusa Tenggara Timur (NTT) 75 MWe, Maluku dan Papua 50 MWe. Untuk itu perlu dilakukan desain pembangkit listrik yang sesuai dengan kapasitas beban sesuai dengan wilayahnya masing-masing seperti di Papua 50 MWe. Listrik di Indonesia saat ini masih mengandalkan bahan bakar fosil seperti minyak (20 %), batu bara (35%) dan gas (30%) selebihnya energi baru dan terbarukan(17%) dimana energi nuklir termasuk didalamnya. Berdasarkan Keputusan Menteri ESDM No. 2682K/21/MEM/2008 bahwa pemerintah menargetkan dapat memeberikan listrik ke seluruh rumah tangga, desa serta memenuhi kebutuhan industri [1,2,3]. PLTN merupakan salah satu opsi untuk mendorong program pemerintah di bidang energi yang tertuang dalam keputusan menteri ESDM. PLTN jenis PBMR-HTR dapat dijadikan opsi dalam pemilihan teknologi PLTN yang cocok untuk Indonesia. Suhu operasi yang tinggi sekitar 1000°C memberikan nilai tambah bagi reaktor dalam diversifikasi energi yakni reaktor nuklir selain sebagai pembangkit listrik juga dapat digunakan untuk kepentingan lain seperti proses desalinasi, proses gasifikasi dan pencairan batu bara sehingga mempunyai nilai ekonomi yang kompetitif dengan pembangkit listrik nonnuklir yang ada. Oleh karena itu, desain tentang PBMR-HTR sangat perlu dilakukan. Desain PBMR-HTR telah dilakukan dengan mendesain PBMR-HTR dengan bahan bakar berbentuk bola (UO_2) bermoderator dan bahan struktur berupa grafit serta pendingin berupa gas helium. Daya keluaran pada PBMR-HTR sebesar 50 MWe dengan efisiensi siklus sebesar 41% pada kondisi *Begining Of Life* (BOL) sampai dengan *End Of Life* (EOL) yang dapat dijadikan acuan awal dalam mendesain bahan bakar dan teras reaktor jenis PBMR-HTR serta sebagai salah satu rujukan bagi pengembangan dan pembangunan reaktor nuklir di Indonesia.

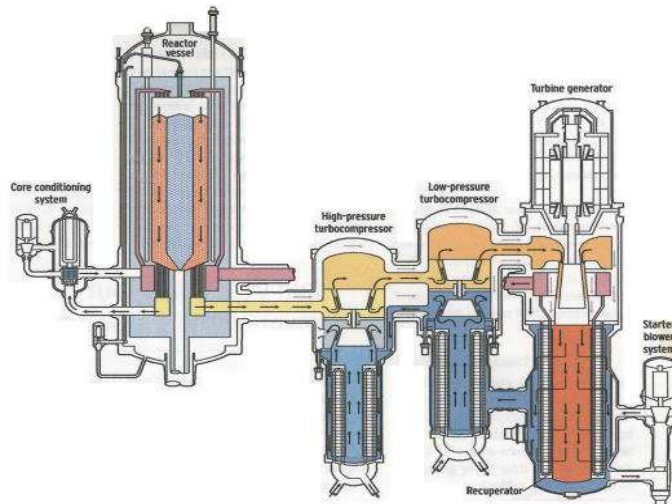
TEORI

Pebble Bed Modular Reactor (PBMR)

Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) merupakan reaktor salah satu jenis reaktor suhu tinggi dengan bahan bakar berbentuk bola berukuran sebesar bola tenis yang disebut *pebble bed*. Sementara itu, pendingin dari reaktor PBMR berupa gas dengan moderator sekaligus sebagai material struktur berupa grafit. Bahan bakar PBMR berupa *pebble bed* mempunyai susunan fuel kernel berisi UO_2 sebagai bahan bakar, lapisan pirolitik karbon densitas rendah (*Carbon Buffer*) merupakan lapisan terdalam yang melapisi fuel kernel dengan densitas rendah serta berpori, lapisan karbon pirolitik dalam dengan desitas tinggi (*Inner Pyrolytic Carbida/IPyC*) berfungsi mengungkung tekanan gas fisi, lapisan silikon karbida(SiC) berfungsi sebagai pengungkung produk fisi sebagai penghalang mekanik dan penghalang kimia karena suhu dekomposisinya sangat tinggi yaitu sekitar 2100°C , lapisan karbon pirolitik luar densitas tinggi (*Outer Pyrolytic Carbida/OPyC*) berfungsi sebagai penghalang mekanik bahan bakar, lapisan *shell* matrik C. Lapisan ini berfungsi sebagai material struktur dan moderator[4]. Gambaran bahan bakar grafit tipe *pebbel* dapat ditunjukkan oleh Gambar 1 dan gambar skematis sistem reaktor PBMR dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 1. Bahan bakar *Pebble Bed* beserta bagian-bagiannya[5]



Gambar 2. Skematis sistem Pebble Bed Modular Reactor(PBMR) [6]

Tabel 1. Karakteristik PBMR[4,7,8,9]

Parameter		Parameter	
Teras Reaktor:	350 cm	Tebal reflektor bawah	2,61 m
Diameter teras	852 cm	Tebal daerah reflektor samping	6/13/22,5/19/14,5
Tinggi rata-rata teras	80.000 MWD/T	Densitas grafit reflektor atas	1,53 g/cm ³
<i>Burnup</i> rata-rata	Multiple pass(x10)	Densitas grafit reflektor bawah	1,54 g/cm ³
<i>Refuelling strategy</i>	8,13% (²³⁵ U)	Densitas grafit reflektor samping	1,7/1,17/1,7/1,48/1,7
Pengayaan bahan bakar	874 hari	Jumlah batang kendali (<i>control rod</i>)	18
Waktu radiasi rata-rata bahan bakar	2	Daya termal	121 MWt
Nomor zona bahan bakar	428	Daya net electrical	50 MWe
<i>Moderation to fuel ratio</i> (N_C / N_U)	334.000	Efisiensi PBMR	41 %
Jumlah bahan bakar bola (<i>pebble</i>)	0/50/100	Maksimum reaktivitas lebih[10]	1,3 %
Persen bahan bakar di tengah/ <i>mixed</i> / zona bahan bakar	1,35 m	Tebal reflektor bawah	2,61 m
Tebal reflektor atas	1,35 m	Tebal reflektor atas	1,35 m

Down Scale Pebbel Bed Modular Reactor

Down scale mengandung pengertian memperkecil daya keluaran reaktor tanpa mengubah dimensi reaktor. Desain *down Scale* dengan daya keluaran 50 MWe dapat diproyeksikan di Indonesia bagian timur dan daerah-daerah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik yang ada saat ini. Karakteristik neutronik dan *burn up* berubah secara signifikan seiring dengan penurunan daya reaktor dan dimensi reactor tapi secara praktis karakteristik neutronik dan *burn up* tidak berubah ketika daya dikurangi sementara dimensi teras tetap. Mekanisme lain dalam memperkecil daya keluaran adalah modularisasi yang artinya membangun banyak unit berdaya kecil yang identik pada satu lokasi daripada membangun satu unit berdaya besar[11,12,13,14].

Analisis Neutronik Pebble Bed Modular Reactor

Paket Program SRAC merupakan paket program komputer (*computer code*) untuk analisis neutronik secara deterministik untuk memperkirakan karakteristik reaktor, aspek keselamatan reaktor, strategi siklus bahan bakar, dan aspek-aspek lain[3.]

Teori Difusi Neutron

Ada dua metode menyelesaikan pemodelan fisis dari fenomena fisika reaktor yaitu Metode Difusi dan ABH. Metode difusi berdasarkan asumsi bahwa teori difusi valid baik di bahan bakar maupun di moderator. Selain itu, densitas perlambatan neutron bernilai nol sehingga sumber neutron hanya ada di moderator dan densitas perlambatan termal di moderator konstan dan tidak gayut waktu serta densitas neutron nol sepanjang batas masing-masing sel satuan yang berisi *fuel lump*. Persamaan matematis dapat ditunjukkan oleh persamaan (1). Sementara Metode ABH berdasarkan teori transport neutron atau lebih dikenal dengan metode tumbukan ABH. Asumsi yang dipakai pada metode ABH adalah arus neutron nol pada batas sel, sumber perlambatan neutron bersifat seragam di moderator dan nol di bahan bakar [7].

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \phi_g + \Sigma_{Rg} \phi_g = \frac{\lambda_g}{k_{\text{eff}}} \sum_{g'} v_{g'} \Sigma_{fg'} \phi_{g'} + \sum_{g'=1} \Sigma_{sg'g} \phi_{g'} \quad (1)$$

Kritikalitas dan Reaktivitas

Kekritisitas suatu reaktor dapat ditunjukkan oleh suatu faktor multiplikasi k yang didefinisikan sebagai perbandingan antara jumlah reaksi fisi pada suatu generasi dengan jumlah reaksi fisi pada generasi sebelumnya. Reaktivitas didefinisikan sebagai fraksi perubahan kritikalitas dari kondisi kritis menjadi superkritis atau subkritis. Pengaruh temperatur teras terhadap faktor multiplikasi ditunjukkan oleh koefisien reaktivitas temperatur (*temperature coefficient of reactivity*), yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\alpha_T = \frac{1}{k} \frac{\partial k}{\partial T} \quad (2)$$

Pengaruh Variasi Laju Aliran Pendingin dan Suhu Pendingin Masukan Terhadap Kekritisitas Teras

Laju aliran pendingin yang mengalir dalam teras dapat berubah-ubah disebabkan oleh beberapa faktor di antaranya gangguan pada jalur kalang yang dilalui oleh pendingin, gangguan pengambilan panas oleh sistem sekunder dan kegagalan sistem pemompaan. Kegagalan ini dapat mengakibatkan kenaikan atau penurunan temperatur pendingin yang masuk dalam teras sehingga akan mengubah distribusi temperatur bahan bakar dan moderator. Perubahan distribusi suhu ini akan mengakibatkan perubahan kekritisitas teras reaktor [2].

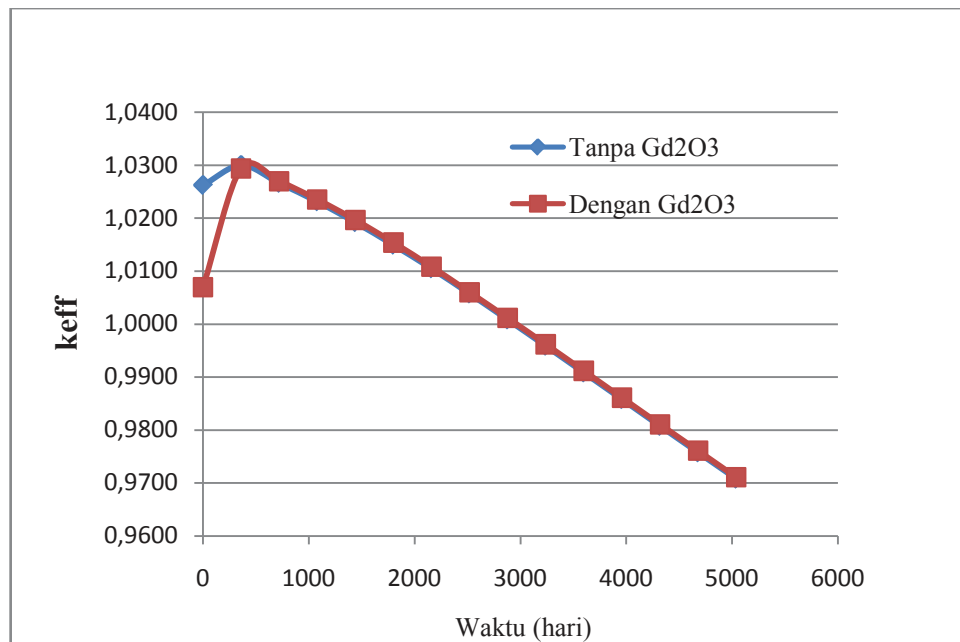
Aspek Keselamatan Pebble Bed Modular Reactor

Beberapa konsep keselamatan yang dimiliki oleh PBMR berdasarkan karakteristik sifat *inherent safety* antara lain bahan bakar berupa keramik *coated-particle* teruji mampu mengungkung produk fisi selama operasi maupun dalam kondisi kecelakaan, pendingin *inert* fase tunggal (helium) sehingga tidak ada batasan transfer panas terkait perubahan fase, kombinasi densitas daya rendah, teras reaktor dan kapasitas panas yang besar, konduktifitas termal yang tinggi dan margin suhu bahan bakar besar mengakibatkan perubahan respon dengan cepat pada saat kehilangan sistem shutdown normal tanpa aksi dari sistem proteksi reaktor, margin suhu bahan bakar dan koefisien reaktivitas suhu negatif cukup untuk mengkompensasi penambahan reaktivitas tak terduga.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kekritisitas dan Umur Teras

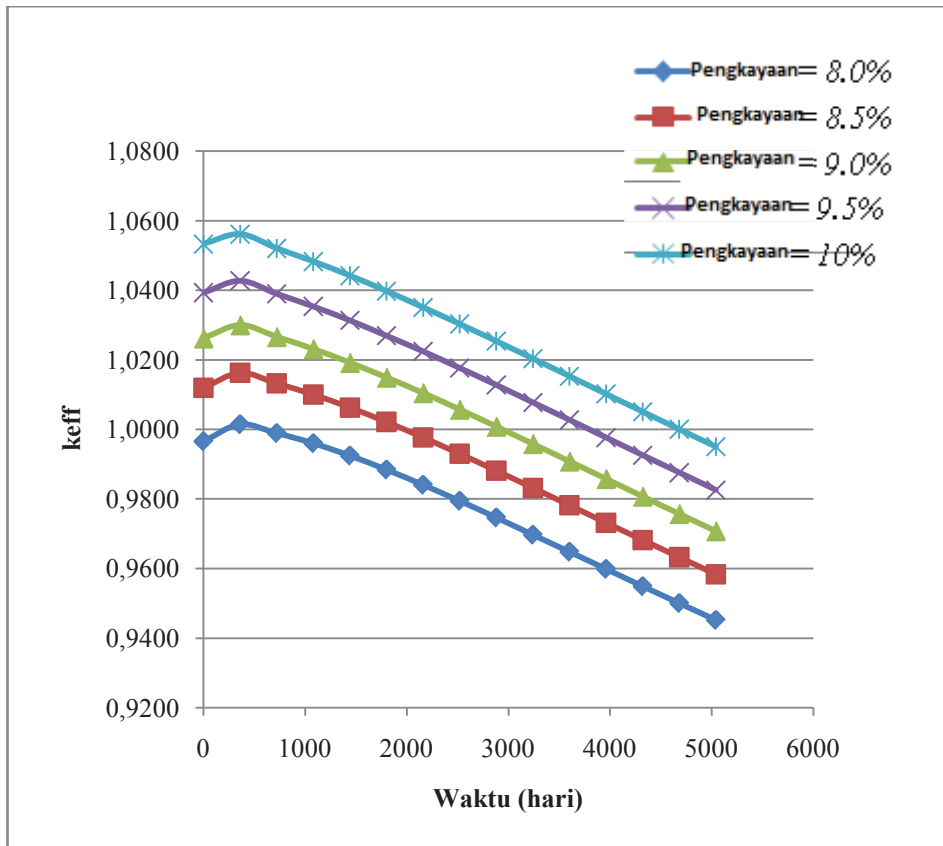
Berdasarkan Gambar 3 nilai keff teras pada saat *Beginning Of Life* (BOL) tanpa Gd_2O_3 sebesar 1,026213 dan ketika menggunakan Gd_2O_3 sebesar 1,006968. Pada kondisi *End Of Life* (EOL) keff teras tanpa Gd_2O_3 sebesar 1,004173 dan 1,004198 ketika menggunakan Gd_2O_3 . Kondisi EOL ditentukan dengan batasan keff tepat kritis ($keff = 1$) ditambah 70% dari fraksi neutron kasip (harga keff = 1 ditambah $0,7\beta$). Kondisi EOL terjadi pada hari ke 2634 tanpa menggunakan Gd_2O_3 dan ketika menggunakan Gd_2O_3 EOL terjadi pada hari ke 2658. Penggunaan *burnable poison* dapat menurunkan keff sehingga *excess reactivity* menjadi lebih kecil dibandingkan tanpa menggunakan *burnable poison* pada saat teras tidak menggunakan *burnable poison* *excess reactivity* (BOL) sebesar 2,55 % sementara pada saat menggunakan *burnable poison* *excess reactivity* (BOL) sebesar 0,69 %.



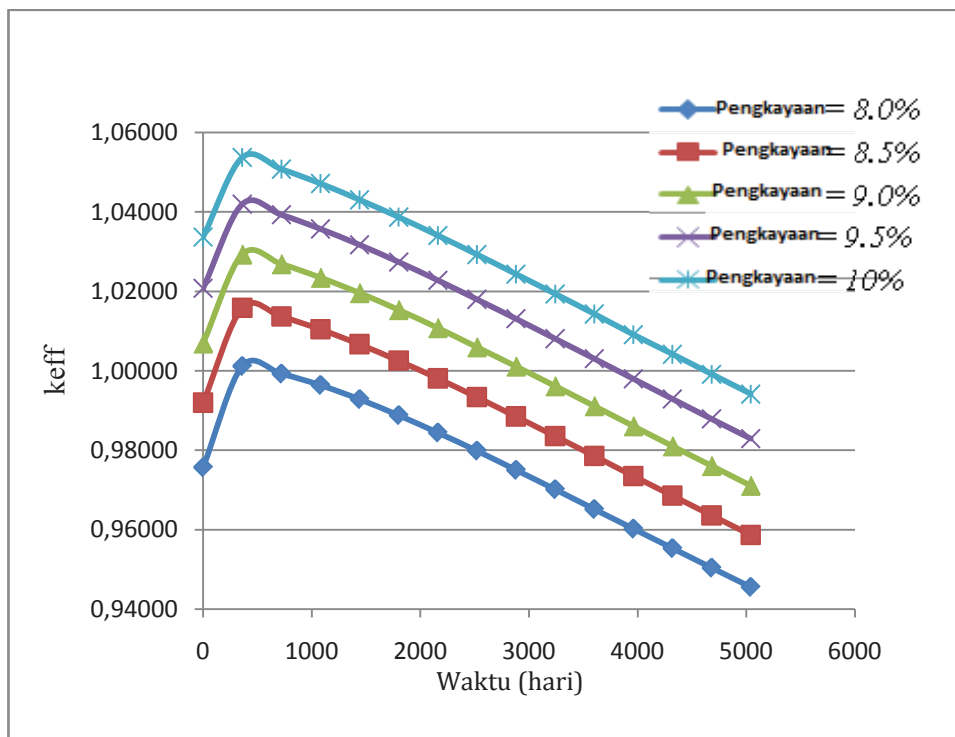
Gambar 3. Perubahan keff teras dengan dan tanpa Gd_2O_3

Pengaruh Pengayaan Bahan Bakar Terhadap Nilai keff

Perubahan pengayaan bahan bakar dapat mempengaruhi perubahan kriticalitas (keff) teras. Semakin tinggi pengayaan bahan bakar maka nilai keff akan semakin tinggi begitu juga dengan *excess reactivity* teras. Pada penelitian ini dilakukan variasi pengayaan sebesar 8 %; 8,5%; 9%; 9,5% dan 10%. Nilai keff teras pada kondisi *Begining of Life* (BOL) sangat dipengaruhi oleh racun dapat bakar atau *burnable poison* Gd_2O_3 . bahan ini mempunyai sifat sangat kuat menyerap neutron dan setelah menyerap neutron sifatnya berubah menjadi inti lain dan menjadi lemah bahkan tidak dapat menyerap neutron lagi. Oleh karena itu Gd_2O_3 sangat penting dalam pengendalain reaktor khususnya disaat awal operasi atau BOL. Selain itu juga dapat memperpanjang umur teras reaktor sehingga dalam keekonomian operasi reaktor menjadi lebih ekonomis. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 4 dimana operasi reaktor tanpa Gd_2O_3 di saat awal operasi tekanan (depresi) keff teras tidak sekuat seperti pada gambar 5 yang pola operasinya menggunakan Gd_2O_3 . Demikian juga gambar 4 lama operasi reaktor tanpa Gd_2O_3 tidak sepanjang operasi yang ditampilkan pada gambar 5 yang dengan memakai Gd_2O_3 .



Gambar 4. Nilai keff terhadap waktu dengan variasi pengayaan U^{235} tanpa Gd_2O_3



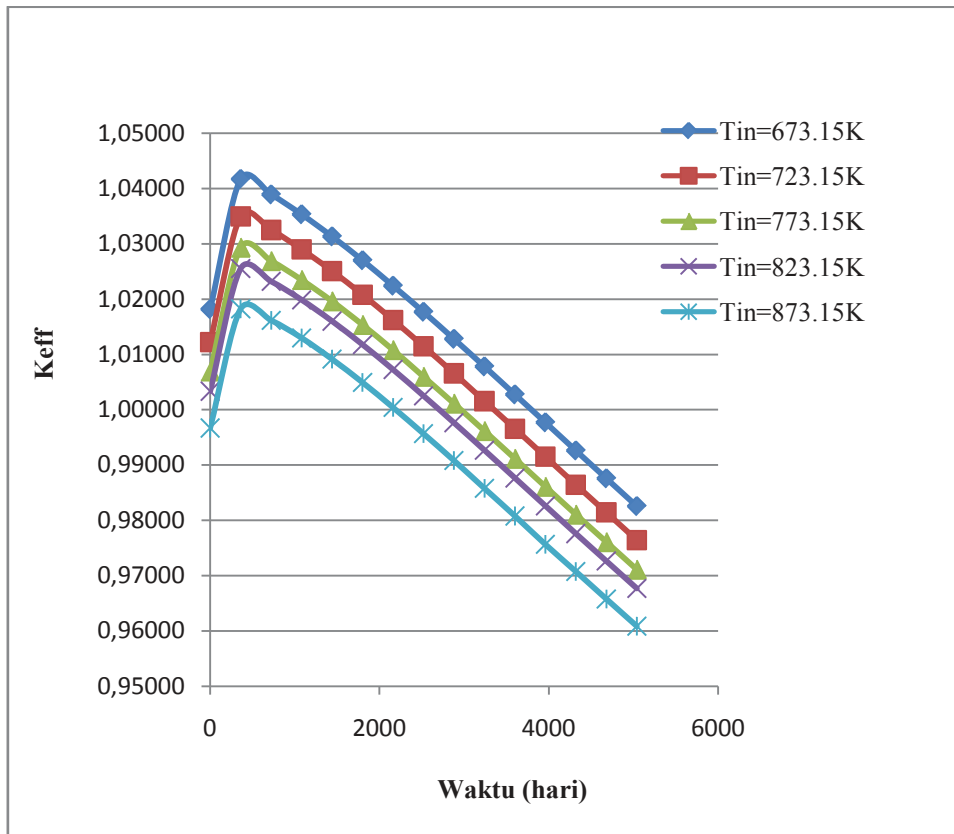
Gambar 5. Nilai keff terhadap waktu dengan variasi pengayaan U^{235} dengan 7 ppm Gd_2O_3

Pemilihan pengayaan optimum didasarkan *requirement excess reactivity* yaitu maksimum *excess reactivity* sebesar 1,3 % (BOL) dan pertimbangan biaya. Pada pengayaan bahan bakar 9% ditambah 7 ppm *burnable poison excess reactivity* sebesar 0,69% (BOL) dengan *burn up* rata-rata

sebesar 21836,90 MWD/T sehingga dipilih pengayaan 9%. Selain itu, peningkatan pengayaan akan menyebabkan penambahan reaktivitas lebih dan biaya pengayaan yang cukup besar.

Pengaruh Suhu Masukan Pendingin Terhadap Kekritisan Teras

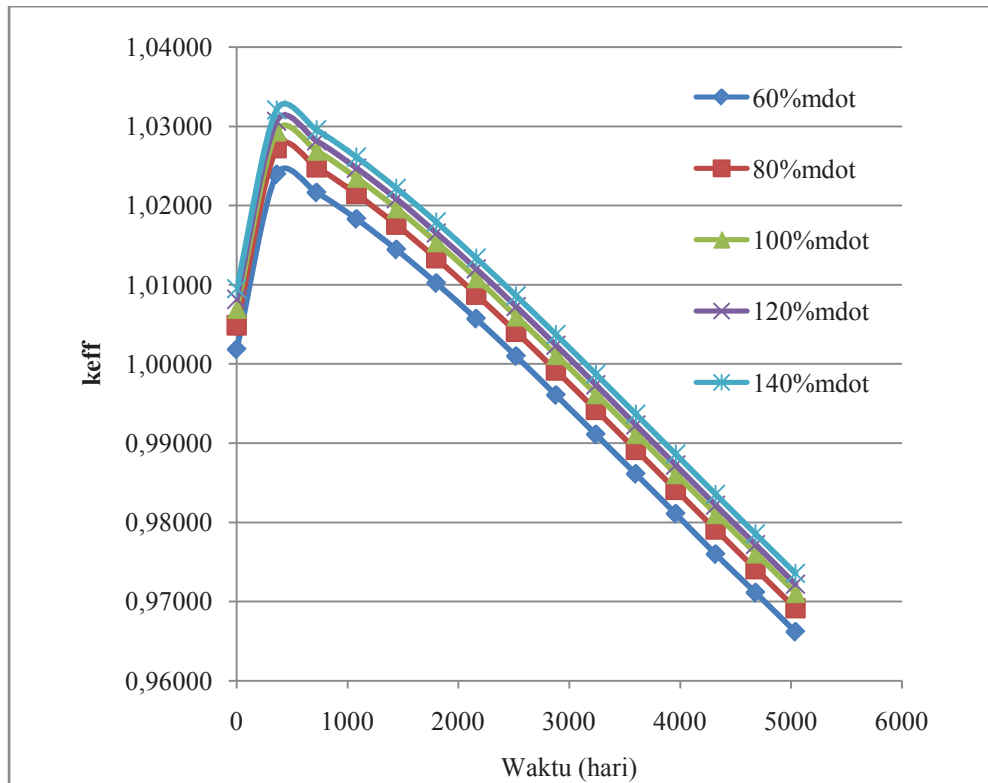
Perubahan suhu pendingin masuk yang masuk ke teras dapat diakibatkan oleh proses transfer panas yang terjadi pada sistem primer dan sekunder. Kegagalan transfer panas dari sistem primer ke sistem sekunder akan mempengaruhi distribusi suhu dalam teras yang berdampak pada berubahnya nilai keff teras. Gambar 6 menunjukkan nilai keff teras akibat perubahan suhu masukan pendingin ke dalam teras dimana keff teras semakin rendah sehingga koefisien reaktivitas suhu teras juga negatif.



Gambar 6. Variasi suhu masukan pendingin dengan Gd_2O_3

Pengaruh Laju Aliran Pendingin Terhadap Kekritisan Teras

Perubahan laju aliran pendingin akan mempengaruhi proses transfer panas pada bahan bakar dan juga moderator. Perubahan tersebut diakibatkan oleh kegagalan pompa primer dalam mengalirkan pendingin ke dalam teras. Kegagalan tersebut mengakibatkan proses transfer panas dari sistem primer ke sistem sekunder menjadi terganggu. Gambar 7 menunjukkan nilai keff teras dalam rentang waktu tertentu akibat perubahan laju aliran pendingin yang masuk ke dalam teras.



Gambar 7. Nilai keff terhadap waktu akibat variasi laju aliran pendingin(\dot{m}) dengan Gd_2O_3

Berdasarkan Gambar 7 menunjukkan penurunan laju aliran pendingin mengakibatkan peningkatan nilai keff teras. Penurunan laju aliran pendingin mengakibatkan proses transfer panas akan semakin lambat sehingga suhu bahan bakar akan meningkat yang pada akhirnya akan menurunkan nilai keff.

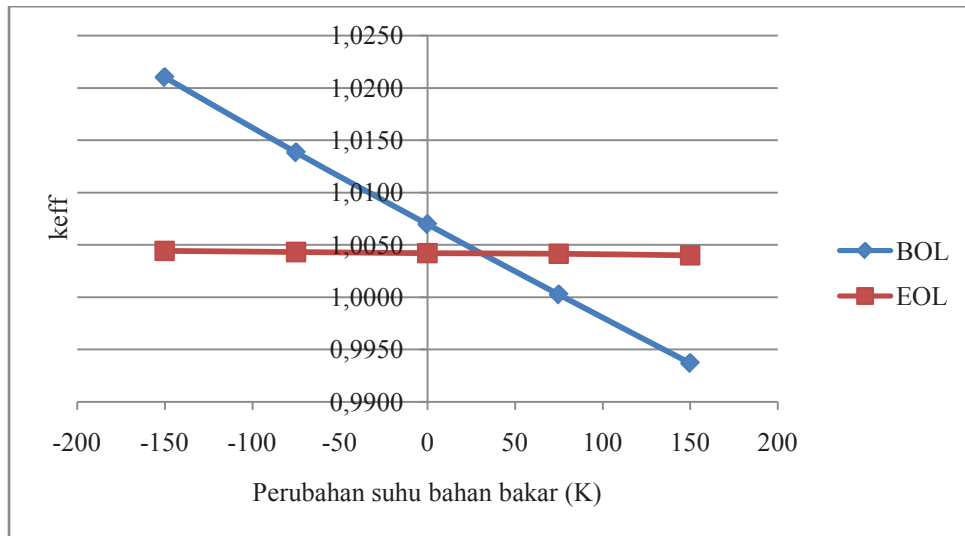
Reaktivitas Suhu Bahan Bakar

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan program SRAC nilai keff teras akibat perubahan suhu bahan bakar ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dengan 7 ppm Gd_2O_3

$\Delta T(K)$	keff(BOL)	$\alpha_{Tf}(BOL)$	Keff(EOL)	$\alpha_{Tf}(EOL)$
-150	1,021006	-8,718960E-05	1,004416	-4,339093E-05
-75	1,013824	-8,496587E-05	1,00431	-6,185387E-05
0	1,006968	-	1,004198	-
75	1,000253	-8,624613E-05	1,004144	-4,921280E-05
150	0,9937005	-8,549107E-05	1,003990	-6,885707E-05
α_{Tf}	Rata-rata(BOL) = -8,597317E-05		Rata-rata(EOL) = -1,263333E-06	

Tabel 2 dan Gambar 8 menunjukkan hasil koefisien reaktivitas suhu bahan bakar dengan 7 ppm Gd_2O_3 memberikan hasil koefisien reaktivitas suhu bahan bakar sebesar $-8,597317E-05 /K$ pada kondisi BOL dan $-1,263333E-06/K$ pada kondisi EOL.



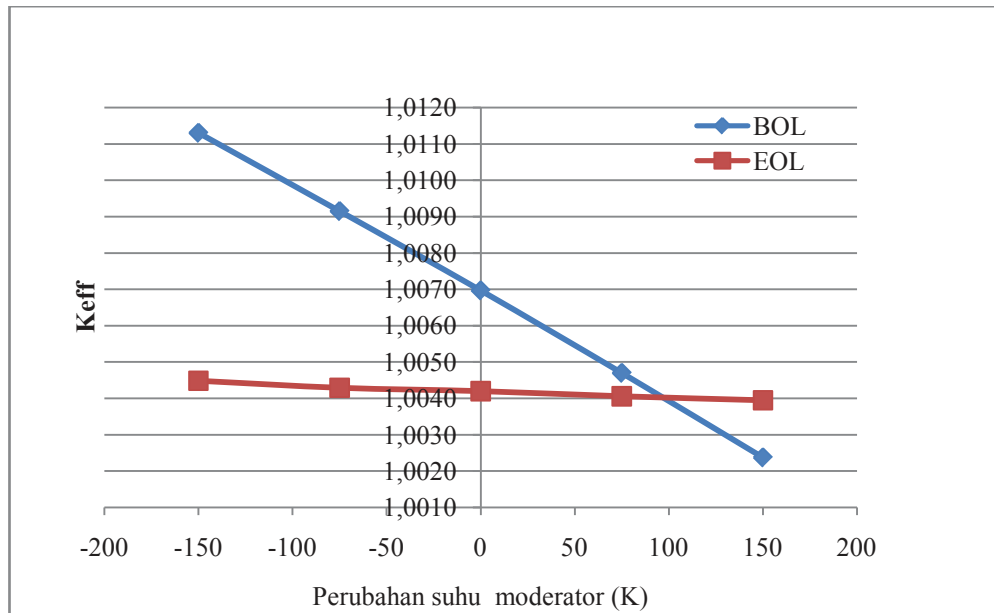
Gambar 8. Pengaruh perubahan suhu bahan bakar terhadap keff teras tanpa Gd₂O₃

Reaktivitas Suhu Moderator

Koefisien reaktivitas suhu akibat perubahan suhu moderator dihitung dengan mengubah suhu moderator saja sementara parameter lain tetap. Moderator grafit dipilih berdasarkan pertimbangan termal maupun neutronik. Grafit merupakan material yang stabil pada suhu operasi yang tinggi. Selain itu, moderator berupa grafit efektif untuk memoderasi neutron dalam teras.

Tabel 3. Koefisien reaktivitas suhu moderator dengan 7 ppm Gd₂O₃

$\Delta T(K)$	Keff(BOL)	$\alpha_{Tm}(BOL) K^{-1}$	Keff(EOL)	$\alpha_{Tm}(EOL) K^{-1}$
-150	1,011303	-2,560773E-05	1,004482	-2,346667E-06
-75	1,009150	-2,621947E-05	1,004290	-2,133333E-06
0	1,006968	-	1,004198	-
75	1,004699	-2,562187E-05	1,004058	-9,600000E-06
150	1,002374	-2,636227E-05	1,003948	-1,213333E-06
α_{Tm}	Rata-rata(BOL) = -2,595284E-05		Rata-rata(EOL) = -1,663333E-06	



Gambar 9. Pengaruh perubahan suhu moderator terhadap keff teras dengan Gd_2O_3

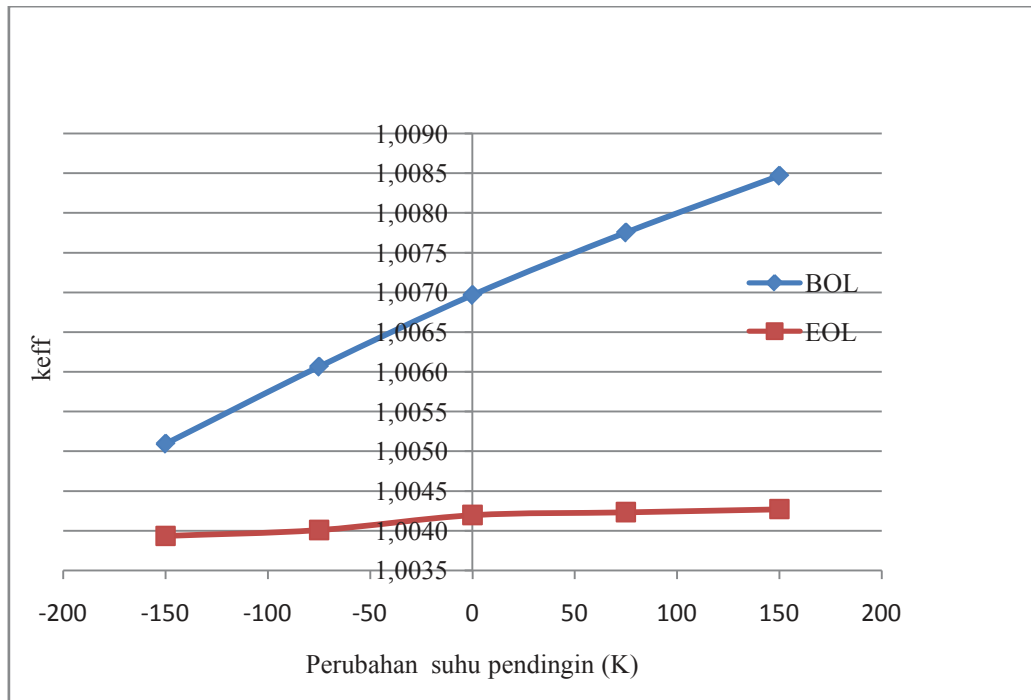
Perhitungan koefisien reaktivitas akibat perubahan suhu moderator untuk konsentrasi Gd_2O_3 sebesar 7 ppm menghasilkan nilai koefisien reaktivitas suhu moderator sebesar $-2.971833E-05$ /K pada kondisi BOL dan $-2.610917E-05$ /K pada kondisi EOL sebagaimana terlihat pada Gambar 9.

Reaktivitas Suhu Pendingin

Helium merupakan gas inert yang sangat efektif untuk pendingin. Pertimbangan penggunaan gas helium adalah bahwa tidak ada nilai batasan suhu yang dapat mengubah fase helium. Parameter yang berubah adalah suhu pendingin dengan densitas pendingin tetap.

Tabel 4. Koefisien reaktivitas suhu pendingin dengan 7 ppm Gd_2O_3

$\Delta T(K)$	keff(BOL)	α_{Tc} (BOL) K^{-1}	keff(EOL)	α_{Tc} (EOL) K^{-1}
-150	1,005096	1,183333E-05	1,003936	1,293333E-06
-75	1,006066	1,110400E-05	1,004010	1,600000E-06
0	1,006968	-	1,004198	-
75	1,007755	1,141600E-05	1,004234	1,386667E-06
150	1,008474	1,047467E-05	1,004272	9,466667E-07
α_{Tc}	Rata-rata(BOL) = 1,120700E-05		Rata-rata(EOL) = 1,306667E-06	



Gambar 10. Pengaruh perubahan suhu pendingin terhadap keff teras dengan Gd_2O_3

Berdasarkan tabel 4 dan Gambar 10 didapat koefisien reaktivitas suhu akibat perubahan suhu pendingin dengan racun dapat bakar memberikan hasil koefisien reaktivitas suhu pendingin sebesar $1,120700E-05$ /K pada kondisi BOL dan $1,306667E-06$ /K pada kondisi EOL. Untuk kebutuhan keselamatan teras reaktor yang dipentingkan adalah koefisien reaktivitas total dan harganya adalah negatif maka dari segi *inherent safety* tetap aman.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa umur teras dapat mencapai ~2658 hari dengan keff pada BOL dengan racun dapat bakar (*burnable poison*) 7 ppm Gd_2O_3 sebesar 1,00698 dan keff pada EOL sebesar 1,004198. Racun dapat bakar (*burnable poison*) berfungsi untuk mengkompensasi *excess reactivity*. *Excess reactivity* tanpa menggunakan racun dapat bakar (*burnable poison*) sebesar 2,55% sementara ketika menggunakan racun dapat bakar (*burnable poison*) sebesar 0,69%. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar, moderator, pendingin dan total pada saat BOL sebagai berikut: -8,597317 pcm/K, -2,595284 pcm/K, 1,1207 pcm/K dan -10,0430; pcm/K. Sedangkan untuk EOL adalah sebagai berikut: -0,1 pcm/K 26333 pcm/K, -0,166333 pcm/K 0,130667 pcm/K dan -0,1620 pcm/K. Koefisien reaktivitas suhu bahan bakar (α_{Tr}) dan moderator (α_{Tm}) bernilai negatif menunjuk bahwa karakteristik keselamatan melekat (*inherent safety*) untuk desain pada penelitian ini telah terpenuhi meskipun koefisien reaktivitas suhu pendingin (α_{Tc}) bernilai positif. Penurunan laju aliran pendingin dari kondisi normal (17,1188 kg/s) mengakibatkan penurunan nilai keff teras dan peningkatan suhu masukan laju aliran pendingin mengakibatkan peningkatan nilai keff teras sehingga memberikan nilai koefisien reaktivitas negatif

SARAN

Perlu dilakukan analisis *down scale* baik analisis neutronik maupun termohidrolik dengan menggunakan program komputasi lain seperti MCNP-ORIGEN, VSOP, SCALE, HELIOS/MASTER untuk analisis neutronik. Sementara analisis termohidrolik dapat digunakan program komputasi THERMIX, ORECA, REDTOP, RELAP5, FLUENT, dan lain-lain. Peningkatan *burn up* penting dilakukan agar bahan bakar yang ada dalam teras reaktor pembakarannya optimal. Selain itu, Variasi geometri bahan bakar maupun racun dapat bakar (*burnable poison*) dalam analisis *down scale* penting

dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kekritisan teras reaktor. Perhitungan ekonomi dalam analisis *down scale* akan memberikan pertimbangan pengambilan kebijakan pembangunan PLTN dengan jenis reaktor yang tepat terutama untuk Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan terima kasih kepada PTRKN BATAN yang sudah share beberapa computer code terakit analisis teras bahan bakar PLTN baik SRAC, MCNP dan beberapa computer code lainnya. Kami ucapkan terima kasih pada Ir. Tagor Malem Sembiring dan Prof. Ir. Yohannes Sardjono yang telah banyak membantu menjalankan program komputer hingga familier.

DAFTAR PUSTAKA

1. Sardjono, Yohanes. Desain *down scale* teras dan bahan bakar PLTN PBMR - HTR dengan menggunakan program MCNP. Diktat, PTAPB, Yogyakarta; 2009.
2. Adinugroho, Aries. Analisis neutronik teras HTR tipe pebble bed berpendingin ${}^7\text{LiF}+\text{BeF}_2$ dengan menggunakan bahan bakar uranium oksida. Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta; 2005.
3. W. Bernnat, W. Feltes. Models for reactor physics calculations for HTR pebble bed modular reactors. Nuclear Engineering and Design. 2003;222: 331-347
4. Daryani, Winda. analisis desain teras dan bahan bakar PLTN pebble bed modular reactor (PBMR) 100 MWe dengan menggunakan program MCNP5. Skripsi, Jurusan Fisika MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta; 2009.
5. Agustina, Mega. optimasi geometri teras reaktor dan komposisi bahan bakar berberntuk bola pada desain High Temperature Fast Reactor (HTFR). Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta; 2010.
6. Leotlela, Mosebtesi. Gaseous fission product from pebble bed modular reactor's triso coated fuel particle during the HFR-K5 fuel irradiation test. Tesis, Faculty of Science, University of the Witwatersrand, Johannesburg; 2010.
7. Mariana, Pitri. Analisis desain teras dan bahan bakar PLTN pebble bed modular reactor (PBMR) 50 MWe dengan menggunakan program MCNP5. Skripsi, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta; 2009.
8. Peng Hong, Liem. Fuel burn-up characteristics of small high temperature reactor. Center for Multipurpose Reactor (PRSG), National Atomic Energy Agency (Batan), Puspittek Complex, Serpong; 1997.
9. Wirawan, Ayi. Desain PLTN tipe Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) 150 MWth menggunakan program MCNP5 (Monte Carlo N-Particle). Skripsi, Jurusan Teknik Fisika, UGM, Yogyakarta; 2010
10. Alexander Agung. Diktat Analisis Reaktor Nuklir. Diktat, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta; 2008.
11. Keisuke, OKUMURA, Teruhiko KUGO, Kunio KANEKO dan Keichiro TSUCHIHASHI. SRAC (Ver. 2002) The Comprehensive Neutronics Calculation Code System. JAERI, Jepang; 2002.
12. IAEA. Innovative small and medium sized reactors: Design features, safety approaches and R&D trends. Dokumen teknis, IAEA, Viena; 2005.
13. Steve Thomas. The Pebble Bed Modular Reactor: An obituary. Energy Polic. (2011; 39: 2431-2440.
14. Andrew C. Kadak, Marc V. Berte. Advanced modularity design for the MIT pebble bed reactor. Nuclear Engineering and Design. 2006; 236: 502-509.