

STUDI PARAMETER DESAIN TERAS INTEGRAL PRESSURIZED WATER REACTOR DENGAN BAHAN BAKAR MIXED OXIDE FUEL MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC

Harun Ardiansyah¹, Alexander Agung², Andang Widi Harto³

- 1) Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, Indonesia, (harun.ardiansyah@mail.ugm.ac.id)
- 2) Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, Indonesia, (a_agung@ugm.ac.id)
- 3) Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, Indonesia, (andangwh@ugm.ac.id)

ABSTRAK

STUDI PARAMETER DESAIN TERAS PWR INTEGRAL DENGAN BAHAN BAKAR MOX MENGGUNAKAN PROGRAM SRAC. PWR Integral menggunakan bahan bakar MOX dapat menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan elektrifikasi di negara kepulauan dan mengakomodasi pergantian bahan bakar dari UO_2 menuju MOX. PWR Integral merupakan reaktor nuklir modular dengan daya 160 MWt untuk satu modulnya. Saat ini, PWR Integral menggunakan bahan bakar UO_2 sebagai bahan bakar utama. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan performa teras reaktor dari yang sebelumnya menggunakan bahan bakar UO_2 menjadi bahan bakar MOX. Penelitian ini dilakukan dengan cara memvariasikan rasio PuO_2 dalam bahan bakar MOX, jumlah bahan bakar, dan jenis kelongsong dengan menggunakan sistem kode SRAC2006. Studi parameter dilakukan dengan memperhatikan nilai k_{eff} , rasio konversi, dan jumlah aktinida, serta akan dilakukan pula perbandingan dengan teras reaktor yang menggunakan bahan bakar UO_2 . Hasil penelitian menunjukkan performa teras reaktor dengan bahan bakar MOX lebih baik daripada UO_2 . Desain teras PWR Integral yang paling optimum adalah teras dengan rasio PuO_2 dalam MOX 12%, diameter teras 165 cm, dan jenis kelongsong *Zircalloy-4*. Hal ini dapat dilihat dari periode kekritisan teras reaktor yang mencapai 1521 hari dengan nilai CR paling rendah adalah 0,622004. *Excess reactivity* yang dimiliki juga lebih rendah yaitu 1,0745932 dimana desain UO_2 bernilai 1,1035821. Aktinida yang dihasilkan mengalami tren penurunan seiring reaktor beroperasi.

Kata kunci: PWR Integral, MOX, k_{eff} , rasio konversi, inventori aktinida.

ABSTRACT

CORE DESIGN PARAMETRIC STUDY OF INTEGRAL PRESSURIZED WATER REACTOR (IPWR) WITH MIXED OXIDE CERAMIC FUEL USING SRAC CODE SYSTEM. Integral PWR using MOX fuel can be used as solution to handle electrification problem in archipelagic nations as well as to accommodate the transition of fuel from UO_2 to MOX. Integral PWR is a modular nuclear power plant with 160 MWt for each module. Recently, Integral PWR use UO_2 fuel as the main fuel. This research's purpose is to determine the change of reactor core performance from UO_2 into MOX. This research is done by varying PuO_2 ratio in MOX, number of fuel, and type of fuel cladding using SRAC2006 code system. Parametric study is done by observing value of k_{eff} , conversion ratio, and actinide inventory, as well as by comparing with UO_2 fuel reactor core. Result shows that performance of reactor core using MOX is better than UO_2 reactor core. The most optimum design of Integral PWR is using 12% PuO_2 in MOX fuel, core diameter 165 cm, and *Zircalloy-4* cladding. This can be observed from period of criticality of reactor core up to 1521 days with lowest CR is 0,622004. *Excess reactivity* of this reactor core is lower than UO_2 fuel design (1,07745932 compared with 1,1035821). Actinide produced by this core shows declining trend during reactor operation.

Key words: Integral PWR, MOX fuel, k_{eff} , conversion ratio, actinide inventory.

PENDAHULUAN

Perkembangan ekonomi di Indonesia mengakibatkan kebutuhan energi yang meningkat, utamanya dalam bentuk listrik. Namun, muncul masalah dari hal ini yaitu ketidakmerataan elektrifikasi di Indonesia. Berdasarkan data dari Kementerian ESDM pada tahun 2017, beberapa provinsi seperti NTT dan Papua memiliki rasio elektrifikasi kurang dari 60%. Hal ini sangat timpang dengan kondisi di DKI Jakarta yang sudah teraliri listrik hingga 99,8% [1].

Selain itu, dalam dunia ketenaganukliran, masalah limbah selalu menjadi perhatian. Saat ini terjadi penumpukan jumlah plutonium dalam *spent fuel* karena pengelolaannya yang langsung dibuang ke *interim storage* tanpa *reprocessing*. Penumpukan ini menjadi rentan karena plutonium yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai senjata nuklir [2].

Teknologi *Small and Modular Reactor* seperti PWR Integral dapat menjadi pilihan untuk mengatasi masalah elektrifikasi di Indonesia. PWR integral adalah jenis reaktor modular dengan daya 160 MWt. Bentuknya yang modular menjadikan pembuatan dari setiap komponen tidak harus dilakukan secara *on-site*. Dayanya yang kecil memberikan keleluasaan penggunaan energi yang dibutuhkan [3]. Dengan menggunakan teknologi *reprocessing*, plutonium dapat dijadikan bagian dari bahan bakar PWR integral dengan menjadi MOX [4].

Konsep dari PWR integral adalah menggabungkan seluruh komponen primer ke dalam satu bejana. Dengan menggunakan konsep ini, waktu konstruksi dapat dipercepat sehingga reaktor bisa semakin cepat digunakan [5].

Bahan bakar MOX merupakan bahan bakar hasil *reprocessing* dari bahan nuklir bekas dari satu reaktor daya nuklir. Pada umumnya, dalam sebuah reaktor nuklir akan dihasilkan satu persen plutonium. Dari satu persen plutonium tersebut, dua per tiga bagian di antaranya merupakan isotop ^{239}Pu dan ^{241}Pu yang merupakan nuklida fisil. Dengan adanya ^{239}Pu dan ^{241}Pu dalam campuran bahan bakar, maka neutron yang diproduksi akan semakin banyak [6].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan performa teras PWR Integral dari yang awalnya menggunakan bahan

bakar UO_2 menjadi bahan bakar MOX. Beberapa parameter yang dilakukan variasi adalah rasio PuO_2 di dalam MOX, jumlah bahan bakar, dan jenis kelongsong yang digunakan. Perubahan performa ini diketahui dengan memperhatikan nilai k_{eff} , rasio konversi, dan jumlah aktinida. Perhitungan dilakukan dengan kode SRAC2006 dan COREBN, sistem kode yang dikembangkan oleh JAEA untuk perhitungan neutronik pada reaktor termal [7] [8].

METODE

Studi Pustaka

Tahap awal dari pelaksanaan penelitian yang dilakukan adalah studi pustaka. Studi pustaka ini dilakukan untuk mengetahui informasi parameter-parameter teras yang saat ini sudah dilakukan proses perizinan oleh NuScale, LLC. Kegiatan ini dilakukan dengan melakukan pengumpulan referensi dan data-data penting yang akan menunjang kegiatan penelitian. Referensi dan data-data tersebut dapat diambil dari berbagai literatur. Literatur yang digunakan dalam penelitian ini mencakup beberapa topik yaitu informasi mengenai rancang bangun PWR Integral, konfigurasi teras yang saat ini digunakan di dalam PWR Integral, komposisi bahan bakar yang saat ini digunakan, informasi mengenai material yang akan digunakan dalam variasi, konfigurasi teras untuk tujuan pengembangan dan variasi, serta studi mengenai SRAC dan COREBN yang digunakan sebagai simulator.

Perhitungan Data Nuklida

Data nuklida didapatkan dari proses perhitungan yang dilakukan berdasarkan informasi teras reaktor yang didapatkan dari studi literatur desain teras yang sudah ada sebelumnya. Berdasarkan informasi tersebut, dilakukan perhitungan nuklida dan berbagai informasi yang belum diketahui. Informasi yang belum diketahui tersebut di antaranya adalah suhu *gap*, suhu kelongsong, densitas UO_2 , PuO_2 , Gd_2O_3 , dan campuran $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ serta MOX. Informasi di atas sangat penting diketahui untuk melakukan perhitungan densitas nuklida dari material yang digunakan di dalam reaktor.

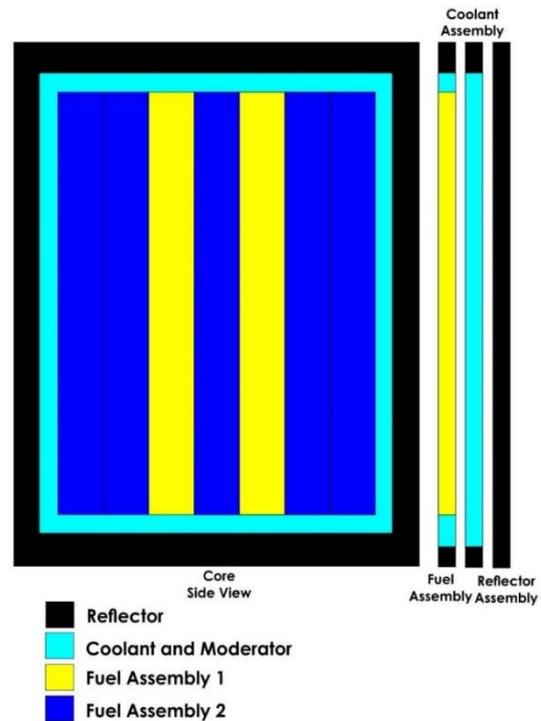
Bagian selanjutnya yang harus dihitung adalah densitas nuklida. Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung densitas nuklida adalah sebagai berikut:

$$N = \frac{N_{Av} \cdot \rho_{operasi} \cdot 1 \times 10^{-24}}{Mr_{nuklida}} \quad (1)$$

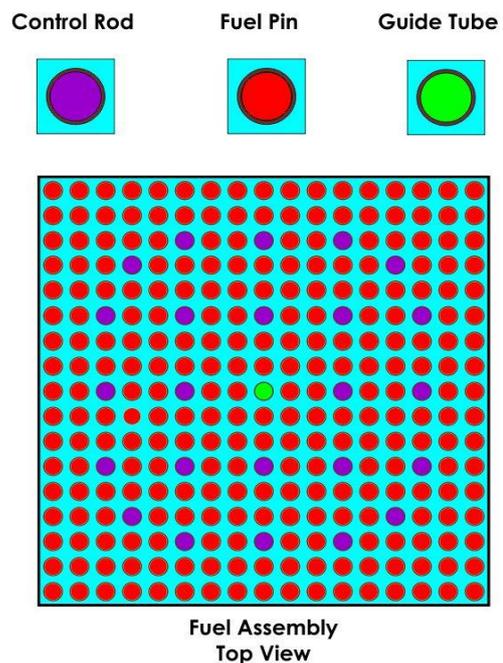
Dalam desain benchmark, terdapat dua jenis bahan bakar yang digunakan. Kedua bahan bakar ini disusun menjadi dua jenis *fuel assembly* yang berbeda. *Fuel assembly* (FA) yang pertama berisi bahan bakar UO_2 murni dengan pengayaan 4,05%. Di dalam FA kedua terkandung juga Gd_2O_3 pada pin bahan bakar. Pada desain *NuScale*, kandungan Gd_2O_3 dapat berkisar hingga 8%. Namun, pada penelitian ini digunakan nilai kandungan Gd_2O_3 sebesar 6,5%. Nilai ini didapatkan berdasarkan informasi dari penelitian-penelitian sebelumnya yang menggunakan bahan bakar campuran $UO_2-Gd_2O_3$. Pada penelitian-penelitian sebelumnya, kandungan Gd_2O_3 rata-rata sebesar 3,25%. Pada penelitian ini, diasumsikan kandungan Gd_2O_3 sebesar dua kali kandungan rata-rata Gd_2O_3 untuk mengompensasi kemungkinan *prompt jump* yang signifikan. Pada desain *NuScale*, Gd_2O_3 terdapat pada 32 pin saja. Namun untuk mempermudah desain, Gd_2O_3 diasumsikan tersebar merata.

Pembuatan Desain *Benchmark*

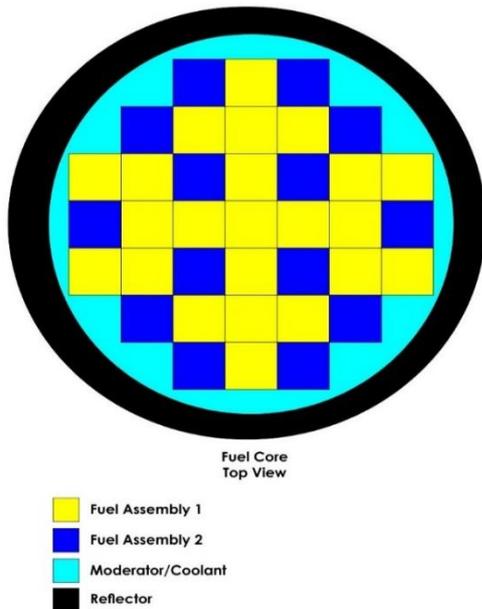
Proses desain selanjutnya adalah pembuatan desain teras benchmark yang mencakup *fuel assembly*, reflektor, moderator, dan ruang untuk batang kendali. *Fuel assembly* berbentuk persegi dengan ukuran *array* 17x17 pin. Ruang untuk batang kendali dimodelkan berisi dengan air karena batasan masalah yang tidak memperhitungkan batang kendali. Sebaran ruang untuk batang kendali disesuaikan dengan desain yang sudah ada dari *NuScale Reactor*.



Gambar. 1. Gambar teras reaktor dari sisi samping



Gambar. 2. Gambar *fuel assembly* dari sisi atas



Gambar. 3. Gambar teras reaktor dari sisi atas

Setelah geometri teras telah dipastikan dan semua data telah didapatkan, dilakukan proses pemodelan teras reaktor menggunakan kode simulasi SRAC dan COREBN, proses koding dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *AcroEdit*. Format kode yang dimasukkan ke dalam SRAC dan COREBN disesuaikan dengan format yang tersedia untuk SRAC dan COREBN. Teras reaktor pada mulanya digambarkan sebagai sebuah fuel assembly yang kemudian diperbesar menjadi satu teras.

Untuk menggambarkan *fuel assembly* dari teras reaktor, digunakan kode input SRAC PIJ (*collision probability method*) dimana kode input ini akan menentukan tambang lintang mikroskopis efektif yang merupakan hasil homogenisasi dari *fuel assembly*. Untuk menggambarkan teras reaktor yang terdiri dari sekumpulan fuel assembly tanpa melakukan perhitungan *burn-up*, digunakan modul CITATION dari SRAC yang mampu memodelkan teras yang tersusun atas assembly yang berbentuk persegi dengan pemodelan 3D cartesian (X-Y-Z). Dari pemodelan ini, didapatkan nilai k_{eff} dari konfigurasi teras reaktor benchmark.

Setelah dilakukan nilai k_{eff} dari konfigurasi teras, dilakukan pemodelan teras untuk melihat performa teras saat beroperasi pada mode *burnup* (*time dependent calculation*). Tahapan pemodelan yang dilakukan untuk mode *burnup* dimulai dengan

pembuatan tabel tampang lintang yang sebelumnya telah dibuat oleh PIJ. Kemudian tabel tersebut dilengkapi dengan informasi densitas nuklida dan informasi lain yang dibutuhkan oleh kode input COREBN. Untuk mendaftarkan informasi *fuel assembly* dan *assembly* lain yang digunakan di dalam teras, kode HIST juga dibuat. Di dalam kode input COREBN juga terdapat pengembangan kode CITATION yang berfungsi untuk menunjukkan posisi masing-masing *assembly* yang terdapat di dalam teras, daya operasi reaktor, waktu perhitungan *burnup* yang diinginkan, dan kriteria-kriteria perhitungan lainnya yang membuat perhitungan menjadi lebih efektif. Dalam pemodelan menggunakan COREBN ini, didapatkan nilai k_{eff} dari teras reaktor, *conversion ratio* (CR), fluks neutron pada masing-masing assembly, distribusi daya aksial dan radial sebagai fungsi waktu, dan informasi inventori aktinida bahan bakar di awal dan akhir simulasi.

Variasi Desain Teras Reaktor

Setelah didapatkan performa teras reaktor benchmark dari hasil simulasi SRAC dan COREBN, dilakukan pemodelan lebih lanjut dalam berbagai variasi parameter. Perubahan parameter dilakukan dengan mengubah kode input yang disesuaikan dengan variasi yang sedang ditinjau. Kode SRAC diubah sehingga tabel tampang lintang diubah diikuti kode input HIST yang mendaftarkan *assembly* dan kode COREBN yang digunakan dalam teras reaktor. Sedangkan pada variasi jumlah bahan bakar dan tebal reflektor, kode input HIST dan COREBN diubah dengan tidak mengubah kode SRAC karena tabel yang digunakan masih sama.

Pada variasi rasio PuO_2 dalam MOX, variasi yang digunakan adalah sebagai berikut,

Tabel. 1. Variasi rasio PuO_2 dalam MOX

Rasio PuO_2 dalam MOX (%)	Nomor Massa MOX (g/mol)		Massa Jenis (g/cm ³)	
	FA 1	FA 2	FA 1	FA 2
8	270,166	270,895	10,559	10,518
10	270,200	270,929	10,568	10,527
12	270,234	270,963	10,577	10,536
14	270,269	270,998	10,586	10,546
16	270,303	271,032	10,596	10,555

Pada variasi jumlah bahan bakar, massa bahan bakar dibuat konstan. Sehingga variasi yang dilakukan adalah variasi jumlah dan tinggi FA di dalam teras dengan melakukan perubahan

diameter teras reaktor. Variasi yang digunakan adalah sebagai berikut,

Tabel. 2. Variasi diameter teras

Diameter Teras (cm)	Tinggi Teras (cm)	Jumlah FA	
		FA 1	FA 2
115	569,077	9	4
140	352,128	17	4
165	200,000	23	14
190	164,402	31	14
215	121,319	37	24

Pada variasi jenis kelongsong, variasi yang digunakan adalah sebagai berikut,

Tabel. 3. Variasi jenis kelongsong

Jenis Kelongsong	$M_{r_{kelongsong}}$ (g/mol)	Densitas Kelongsong (g/cm ³)
Zircalloy-4	91,52402696	6,55089
SS 316	56,30490907	7,99
SS 410	56,25494474	7,74
Zr-2,5%Nb Alloy	91,19707	6,57

Dengan menggunakan variasi di atas, simulasi dilakukan dengan menggunakan SRAC dan COREBN.

Analisis dan pengolahan data dilakukan dengan menganalisis hasil keluaran dari SRAC dan COREBN dalam suatu perangkat lunak pengolahan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain Awal Teras Reaktor PWR Integral Menggunakan UO₂

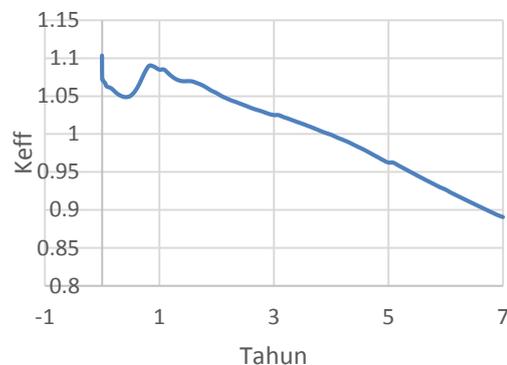
Desain awal yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam tabel sebagai berikut,

Tabel. 4. Properti dari desain awal PWR Integral

Properti	Unit	Besaran
Core		
Radius	cm	82,5
Jumlah assembly	-	37
Daya termal reaktor	MW	160
Fuel Assembly		
Tipe bahan bakar	-	UO ₂
Pengayaan ²³⁵ U	-	4,05% dan 4,55%
Model assembly	-	Square Array 17x17 pin
Jumlah fuel rod dalam FA	-	264
Jumlah Control Rod dalam FA	-	24
Jumlah Instrumentation Tube dalam FA	-	1

Tebal Struktur FA	cm	0,04
Bahan struktur	-	SS 304L
Pitch FA	cm	21,50364
Bahan pendingin	-	H ₂ O
Fuel Rod		
Diameter Luar Kelongsong	cm	0,94996
Diameter Dalam Kelongsong	cm	0,82804
Tebal Gap	cm	0,01651
Diameter Bahan Bakar	cm	0,81153
Material Gap	-	Helium
Material Kelongsong	-	Zircalloy-4
Fuel Rod Pitch	cm	1,25984
Tinggi Fuel Rod	cm	200
Reflektor		
Bahan reflektor	-	SS 304L
Tinggi reflektor aksial atas/bawah	cm	12,5
Tebal reflektor radial	cm	14
Parameter Termal Hidraulik		
Tekanan	psia	1450
Suhu rata-rata fuel pin	K	772,039
Suhu rata-rata gap	K	739,2094
Suhu rata-rata moderator	K	645,5721697
Suhu rata-rata kelongsong	K	557,039
Suhu rata-rata reflektor	K	557,039

Dengan menggunakan desain yang didasarkan pada parameter di atas, didapatkan nilai k_{eff} yang memiliki nilai lebih besar daripada 1. Nilai burnup ini dapat diturunkan hingga bernilai sama dengan 1 (kritis) atau bahkan kurang dari 1 (subkritis) dengan cara menambahkan Control Rod dan racun penyerap neutron.

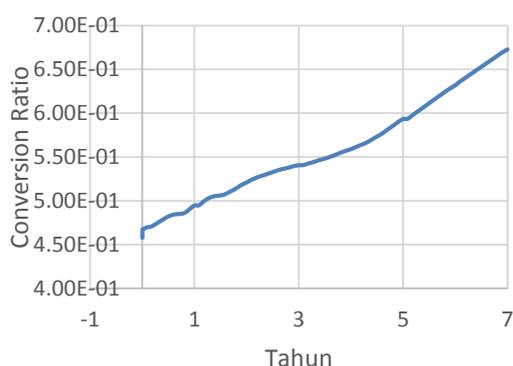


Gambar. 4. Nilai k_{eff} teras desain awal selama operasi reaktor

Desain teras benchmark ini dapat beroperasi sesuai dengan kriteria kekritisan hingga 1425,75 hari. Pada periode awal operasi reaktor, terjadi proses penurunan yang signifikan akibat produksi racun neutron Xenon dan Samarium yang sangat memengaruhi populasi neutron di dalam teras reaktor. Produksi Xenon dan Samarium kemudian berangsur-angsur stabil hingga menuju titik kesetimbangannya. Selain Xenon dan Samarium, juga terdapat efek serapan neutron dari gadolinia yang terkandung di dalam 14 FA di teras reaktor.

Xenon dan Samarium yang sudah setimbang kemudian dibarengi oleh proses fisi yang terus menerus di dalam reaktor yang superkritis sehingga menyebabkan adanya kenaikan kritikalitas teras reaktor. Puncak kritikalitas teras reaktor mencapai puncaknya ketika bahan fisil masih tersedia cukup banyak sehingga mampu mengatasi pertumbuhan bahan fertil akibat transmudasi maupun bahan yang diproduksi akibat produk fisi. Setelah kondisi ini, kritikalitas teras benchmark berangsur-angsur semakin berkurang dengan laju yang relatif konstan.

Selain perubahan nilai kritikalitas dalam teras, rasio banyaknya nuklida fisil dan fertil juga berubah seiring berjalannya waktu. Rasio banyaknya nuklida fisil dan nuklida fertil digambarkan melalui parameter rasio konversi (*Conversion Ratio/CR*). Fenomena rasio konversi yang terjadi di dalam teras digambarkan melalui grafik sebagai berikut,



Gambar. 5. Nilai rasio konversi desain awal teras reaktor selama periode operasi reaktor

Pada rasio konversi, didapatkan fenomena dimana nilai CR semakin lama semakin bertambah. Pada periode awal operasi teras reaktor, dapat dilihat bahwa nilai CR yang

dihasilkan bernilai 0,457805 dan terus meningkat hingga bernilai 0,672904 pada tahun ketujuh. Pada lima tahun operasi reaktor, teras benchmark ini bersifat sebagai pembakar (*burner*). Hal ini dikarenakan nilai CR yang dihasilkan lebih rendah daripada 0,6. Pada tahun kelima hingga akhir operasi reaktor, teras reaktor bersifat sebagai *converter*. Namun, perlu diperhatikan bahwa ketika nilai CR yang dihasilkan cukup baik, teras reaktor berada dalam fase subkritis. Hal ini menunjukkan meskipun konsumsi bahan bakar fisil memiliki rasio yang lebih rendah dibandingkan periode awal teras reaktor, bahan bakar fisil tersebut tidak mampu untuk menyediakan neutron yang cukup sehingga teras menjadi kritis ataupun superkritis.

Inventori aktinida merupakan parameter lain yang dapat diperhatikan untuk melihat bagaimana perilaku teras reaktor dalam mengonsumsi bahan bakar yang ada dan memproduksi bahan bakar yang baru. Pada penelitian ini dibatasi hanya pada tujuh nuklida saja yang diamati yaitu ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}Pu , dan ^{240}Pu . Distribusi dari ketujuh nuklida tersebut seiring operasi reaktor ditampilkan pada Tabel 5,

Tabel. 5. Jumlah aktinida yang dihasilkan oleh desain awal teras reaktor

Tahun	Aktinida (gram)				
	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{239}Pu	^{240}Pu
0	390.170	8.930.100	0	0	0
1	334.300	8.895.500	21.006	2.309	865,22
3	242.380	8.819.700	43.225	9.752,7	5.417,8
5	167.840	8.740.200	54.287	16.925	10.355
7	111.200	8.653.500	58.788	22.998	14.632

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan informasi bahwa terjadi penambahan jumlah ^{239}Pu dan juga pengurangan jumlah ^{238}U . Pengurangan jumlah ^{238}U dapat dijelaskan karena konsumsi bahan bakar reaktor seiring berjalannya waktu. Penambahan ^{239}Pu merupakan hasil transmudasi yang terjadi akibat reaksi serapan di dalam teras reaktor. Konsumsi ^{235}U dan ^{238}U pada tahun pertama operasi teras reaktor dapat dikatakan signifikan. Hal ini dapat disebabkan oleh nilai rasio konversi teras pada periode awal operasi teras yang berkisar antara 0,4 hingga 0,5 sehingga begitu banyak bahan bakar yang dikonsumsi. Kemudian, nilai tersebut cenderung turun secara stabil pada

tahun ketiga hingga ketujuh. Nilai dari ²³⁹Pu sendiri mengalami kenaikan terus menerus dengan laju yang relatif konstan.

Hasil dari desain di atas dijadikan acuan untuk melakukan analisis pada variasi yang akan dilakukan. Variasi-variasi yang dilakukan juga akan mempertimbangkan parameter utama seperti k_{eff} , CR, densitas daya aksial, dan inventori aktinida yang dihasilkan selama operasi teras reaktor.

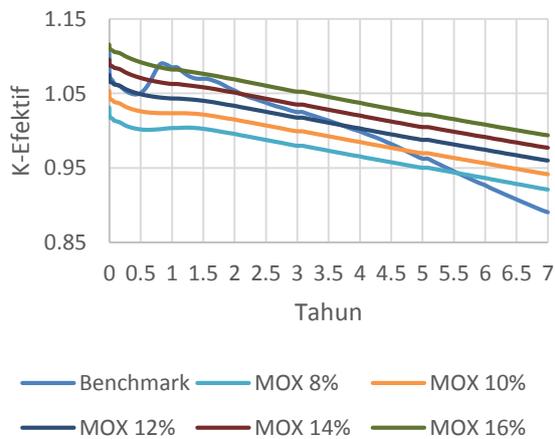
Variasi Rasio PuO₂ di dalam Bahan Bakar MOX

Variasi rasio PuO₂ di dalam bahan bakar MOX dilakukan dengan mengubah jumlah nuklida yang dari material yang digunakan untuk menyusun bahan bakar MOX. Bahan bakar MOX yang digunakan adalah bahan bakar PuO₂-UO₂ dan PuO₂-UO₂-Gd₂O₃ yang dicampurkan secara homogen. Kandungan isotop plutonium yang menyusun bahan bakar MOX dibuat konstan dengan pembagian sebagai berikut,

Tabel. 6. Komposisi plutonium pada PuO₂

Komposisi Plutonium	Persentase (%)
²³⁸ Pu	4,6
²³⁹ Pu	50,5
²⁴⁰ Pu	24
²⁴¹ Pu	12,5
²⁴² Pu	8,4

Setelah dilakukan perhitungan dan diterapkan pada kode SRAC dan COREBN, didapatkan hasil perhitungan k_{eff} sebagai berikut,



Gambar. 6. Nilai k_{eff} selama operasi reaktor pada variasi rasio PuO₂ dalam MOX

Pada variasi yang telah ditunjukkan pada grafik di atas, diketahui bahwa variasi varfuel2 (PuO₂ 2% dalam MOX) dan varfuel4 (PuO₂ 4% dalam MOX) selalu bernilai kurang dari 1 sejak awal operasi reaktor. Hal ini dapat dijelaskan karena jumlah nuklida fisil di dalam variasi tersebut tidak cukup untuk membuat teras berada dalam kondisi kritis. Jumlah neutron yang dihasilkan oleh teras reaktor masih terlalu kecil bila dibandingkan dengan serapan neutron yang terjadi. Pada variasi selanjutnya, nilai awal operasi reaktor semakin lama semakin tinggi. Nilai paling tinggi dihasilkan oleh varfuel20 (PuO₂ 20% dalam MOX) dengan nilai 1,1545849. Nilai ini merupakan nilai pada variasi rasio PuO₂ dalam MOX yang tertinggi, sehingga nilai ini dapat disebabkan oleh banyaknya nuklida fisil yang terkandung di dalam bahan bakar.

Pada variasi 2% hingga 8% dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai kritikalitas di periode awal operasi teras reaktor seperti halnya yang terjadi pada teras benchmark. Hal ini menunjukkan pengaruh Xenon, Samarium, dan gadolinia masih cukup signifikan di dalam kritikalitas teras reaktor. namun, hal ini tidak terjadi pada variasi 10% hingga 20% karena nuklida fisil yang dihasilkan bersumber plutonium yang memiliki nilai ν yang besar. Nilai ν ini mengompensasi pengaruh gadolinia di dalam teras reaktor sehingga kurva yang dihasilkan menjadi turun secara konstan.

Dari hasil grafik di atas, dapat disimpulkan kemampuan teras reaktor untuk mampu bertahan menjaga kekritikalitasnya dalam waktu yang berbeda-beda. Periode kekritisan dari masing-masing variasi ditunjukkan melalui tabel berikut,

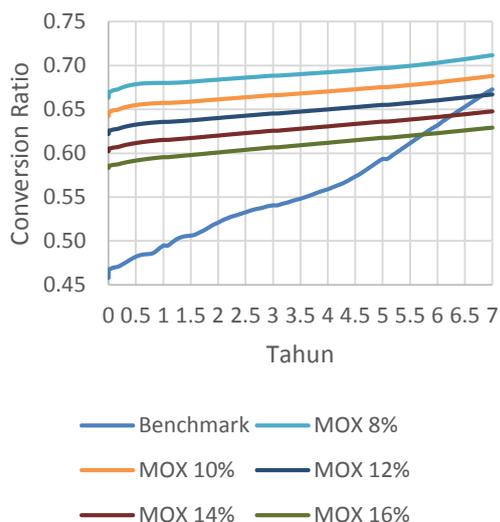
Tabel. 7. Periode kekritisan yang dihasilkan oleh variasi rasio PuO₂ dalam MOX

Kandungan PuO ₂ (%)	Periode Kekritisian (hari)
8	605,8
10	1060,5
12	1521
14	1946,25
16	2371,5

Secara umum, dapat dilihat bahwa penambahan rasio PuO₂ di dalam teras reaktor akan secara signifikan menambah periode kekritisan teras reaktor. perubahan ini dapat dilihat secara signifikan pada variasi 6% ke

variasi 8% dimana terjadi perubahan periode kekritisitas teras reaktor secara signifikan dengan selisih sekitar 604 hari. Pada variasi selanjutnya, perubahan yang terjadi rata-rata berselisih sekitar 400 hari. Pada variasi 18% dan 20% perubahannya tidak dapat diperlihatkan karena sudah melewati periode yang sudah ditentukan dalam COREBN.

Rasio PuO₂ ini juga menyebabkan adanya perubahan fenomena dalam rasio konversi. Perubahan yang terjadi di dalam teras reaktor digambarkan melalui grafik sebagai berikut,



Gambar. 7. Nilai rasio konversi selama operasi reaktor pada variasi rasio PuO₂ dalam MOX

Fenomena yang berkebalikan dengan k_{eff} terjadi pada rasio konversi. Pada variasi 2% PuO₂ dalam MOX, nilai rasio konversi menjadi yang paling tinggi. Hal ini berarti kemampuan bahan bakar untuk mengkonversi menjadi material fisil menjadi lebih baik. Namun, hal itu tidak diimbangi dengan konsumsi bahan bakar karena jumlah neutron yang diproduksi tidak cukup untuk membuat teras menjadi kritis. Semakin tinggi nilai PuO₂ dalam MOX, maka nilai CR menjadi semakin kecil meskipun seluruh variasi menunjukkan tren kenaikan yang sama seiring berjalannya waktu. Meskipun begitu, variasi teras hanya menghasilkan reaktor yang bertipe *converter*.

Dengan menggunakan nilai kritikalitas dan rasio konversi, maka dipilihlah variasi varfuel12 yang memiliki rasio PuO₂ sebesar 12% di dalam MOX. Nilai ini dipilih karena periode kritikalitas teras varfuel12 dapat melebihi benchmark, nilai excess reactivity yang juga lebih kecil dari teras benchmark, dan

juga CR yang dimiliki masih berada di rentang yang sama dengan reaktor PWR pada umumnya (sekitar 0,6). Selain itu, nilai ini masih tidak jauh melebihi rasio PuO₂ di dalam bahan bakar MOX yang digunakan pada umumnya yaitu 7% hingga 11%.

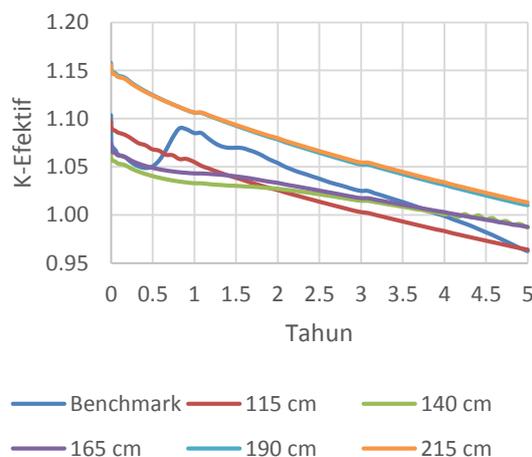
Variasi Jumlah Bahan Bakar

Variasi jumlah bahan bakar dilakukan dengan melakukan variasi pada jumlah fuel Assembly dan tinggi dari teras reaktor dan dengan mempertahankan massa bahan bakar selama variasi dilakukan. Massa bahan bakar yang telah dihitung adalah 10.672.499,9020841 gram. Nilai ini kemudian disesuaikan dengan variasi diameter teras reaktor. Variasi diameter teras reaktor kemudian akan menyesuaikan tinggi teras reaktor. Besaran baru bernama rasi H/D atau rasio tinggi teras terhadap diameter juga akan berubah seiring dengan perubahan yang terjadi pada variasi ini. Variasi diameter dan tinggi teras yang sudah dihitung adalah sebagai berikut,

Tabel. 8. Nilai diameter, tinggi, dan H/D dari variasi jumlah bahan bakar

Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Diameter/Tinggi	Buckling Geometri
115	569,076	4,949	1,996E-03
140	352,127	2,515	1,427E-03
165	200,000	1,212	1,097E-03
190	164,402	0,865	8,876E-04
215	121,319	0,564	7,473E-04

Nilai-nilai hasil perhitungan di atas dijadikan sebagai informasi dasar untuk melakukan perbaikan terhadap kode SRAC dan COREBN. Dengan menggunakan kode untuk variasi jumlah bahan bakar, didapatkan informasi sebagai berikut,

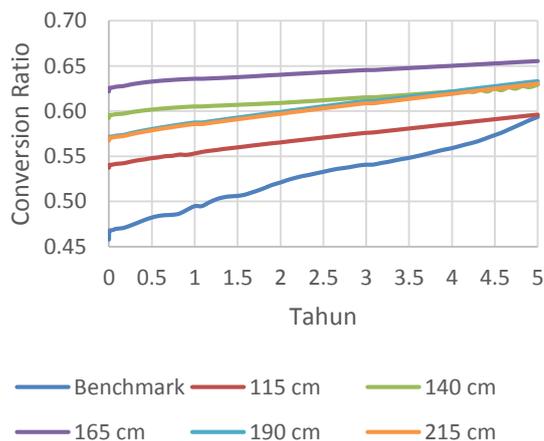


Gambar. 8. Nilai k_{eff} selama periode operasi reaktor dalam variasi jumlah bahan bakar

Hasil dari perhitungan di atas menunjukkan pada variasi diameter 115 cm, 140 cm, dan 160 cm nilai kekritisitas teras reaktor secara berurutan bernilai lebih kecil. Secara berurutan, periode kekritisitas dari masing-masing teras reaktor adalah 1155,75 hari, 1491 hari, dan 1521 hari. Hal ini dapat disebabkan oleh turunnya nilai buckling geometri yang menyebabkan adanya penurunan nilai buckling material yang akan berpengaruh pada kriteria kekritisitas yang perlu dicapai oleh teras reaktor. Kebocoran neutron karena pengaruh arah radial menjadi penting untuk diperhatikan karena sangat memengaruhi populasi teras reaktor. Hal yang unik terjadi pada variasi diameter 140 cm dimana setelah reaktor menjadi subkritis pada 1491 hari, pada hari ke-1551 teras sempat kembali kritis sebentar lalu kembali menjadi subkritis dalam periode 30 hari. Hal ini mungkin dapat terjadi karena adanya fluktuasi fluks neutron di dalam teras reaktor akibat nilai buckling geometri.

Namun, hal yang sebaliknya justru terjadi pada variasi diameter teras 190 cm dan 215 cm. Periode kekritisitas teras reaktor bernilai lebih dari 5 tahun dengan nilai kekritisitas tertinggi masing-masing adalah 1,1578549 dan 1,1557086. Hal ini dapat disebabkan oleh bertambahnya jumlah fuel Assembly dari teras reaktor. Meskipun tinggi dari FA ini tidak setinggi sebelumnya, namun adanya penambahan FA ini tentunya akan berpengaruh pada fluks neutron yang ada di dalam teras reaktor tersebut. Adanya pengaruh pada fluks neutron akan memengaruhi kekritisitas teras reaktor. Meskipun kebocoran neutron dari arah aksial (atas dan bawah) tidak bisa dihindarkan, namun nampaknya pada variasi ini jumlah FA yang bertambah menjadi faktor yang mendominasi terjadi perubahan pada variasi 190 cm dan 165 cm. Berdasarkan hasil simulasi, didapatkan informasi bahwa nilai kekritisitas tertinggi dari variasi diameter teras 190 cm dan 215 cm lebih tinggi daripada teras benchmark. Perbedaannya cukup signifikan mengingat nilai kekritisitas tertinggi dan teras benchmark sebesar 1,1035821. Hal ini menjadi penting untuk menentukan variasi mana yang bisa dipilih untuk melakukan variasi selanjutnya.

Dari sisi parameter teras yang lain, hasil dari rasio konversi pada variasi ini ditunjukkan melalui gambar berikut,



Gambar. 9. Nilai rasio konversi selama operasi reaktor dalam variasi jumlah bahan bakar

Variasi jumlah bahan bakar memberikan pengaruh yang cukup signifikan pada rasio konversi dari teras reaktor. Variasi diameter 115 cm, 140 cm, dan 160 cm memberikan nilai yang makin lama makin naik. Hal ini dapat dijelaskan karena bertambahnya jumlah bahan bakar di dalam teras reaktor. Bertambahnya jumlah bahan bakar akan berpengaruh terhadap jumlah bahan bakar yang melakukan transmudasi yang kemudian akan berpengaruh terhadap seberapa banyak proses konversi yang terjadi dari bahan bakar yang bersifat fertil menjadi bahan bakar yang bersifat fisil.

Namun, hal yang sebaliknya terjadi pada variasi selanjutnya. Efek yang berbalik dari k_{eff} terjadi pada rasio konversi. Adanya perubahan tinggi yang signifikan memengaruhi bagaimana proses transmudasi terjadi di dalam teras reaktor. Dalam hal ini, penambahan jumlah FA dengan konsekuensi penurunan tinggi teras reaktor memperkecil kemampuan transmudasi teras reaktor dimana bahan bakar yang akan tertransmudasi tidak berubah dari material fertil menjadi material fisil karena neutron yang seharusnya menumbuk bahan bakar fertil tersebut justru sudah bocor keluar reaktor sebelum proses transmudasi terjadi. Pada hal ini, pengaruh kebocoran neutron secara aksial menjadi faktor yang dominan memengaruhi bagaimana perilaku teras reaktor.

Dengan menggunakan informasi yang sudah diperoleh, maka diputuskan variasi dengan diameter teras 165 cm untuk variasi selanjutnya. Variasi ini dipilih karena nilai kekritisitas tertinggi yang dimiliki tidak lebih tinggi dari teras benchmark dan periode

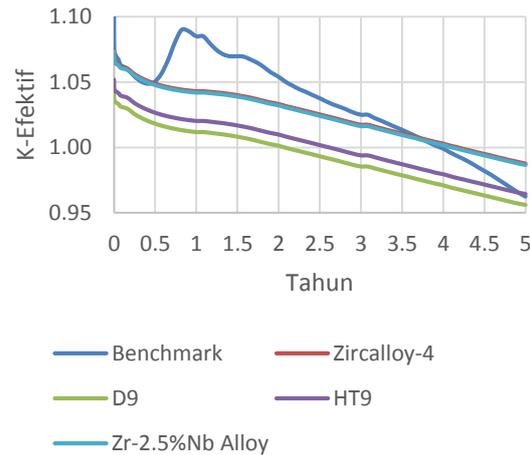
kekritisannya yang dimiliki lebih tinggi dari teras benchmark. Hal ini baik dan diperlukan untuk keselamatan teras reaktor dalam hal excess reactivity yang harus diatasi oleh bahan penyerap neutron. Selain itu, dapat dilihat juga bahwa variasi diameter teras 165 cm memiliki nilai rasio konversi yang lebih baik daripada teras benchmark dan variasi yang lain.

Variasi Jenis Kelongsong

Pada variasi ini digunakan empat jenis kelongsong yang merupakan jenis zirconium-based alloy dan stainless steel. Material zirconium-based alloy yang digunakan adalah zircalloy-4 dan Zr-2,5%Nb Alloy, sementara material *stainless steel* yang digunakan adalah D9 dan HT9.

Zircalloy-4 merupakan material yang sangat umum digunakan sebagai material kelongsong. Hal ini dikarenakan kemampuannya yang dapat menahan panas radiasi karena sifat termofisikanya yang baik, dan juga karena memiliki tampang lintang serapan yang relatif kecil. Pada Zr-2,5%Nb Alloy, zirkonium masih mendominasi susunan materialnya. Namun, penambahan Niobium sebesar 2,5% di dalam paduan logam tersebut memberikan kemampuan termal yang makin baik. Hal ini terlihat dari nilai kapasitas panas dan konduktivitas panas dari Zr-2,5%Nb alloy yang lebih besar daripada zircalloy-4. Selain itu, nilai ekspansi termal linier dari Zr-2,5%Nb alloy juga lebih kecil dibandingkan dengan zircalloy-4.

D9 merupakan material yang bertipe austenitic. Material ini memiliki perilaku ekspansi termal dan konduktivitas termal yang serupa dengan *stainless steel* tipe 316. Material ini memiliki kandungan Nikel yang cukup banyak dan dapat menambahkan kemampuan dari sisi ketahanan terhadap karat dan *stress corrosion*. Selain itu, terdapat penambahan unsur karbon di dalam D9 yang digunakan untuk menstabilkan struktur besi yang austenitic. Paduan logam lain yang digunakan adalah HT9. Material ini memiliki sifat yang cukup mirip dengan *stainless steel* tipe 410. Material ini bertipe martensitic. Material ini memiliki ketahanan terhadap korosi yang rendah karena kandungan nikelnya yang sedikit, namun material ini lebih kuat dan lebih tangguh. Nilai k_{eff} selama proses operasi teras reaktor digambarkan melalui grafik sebagai berikut,



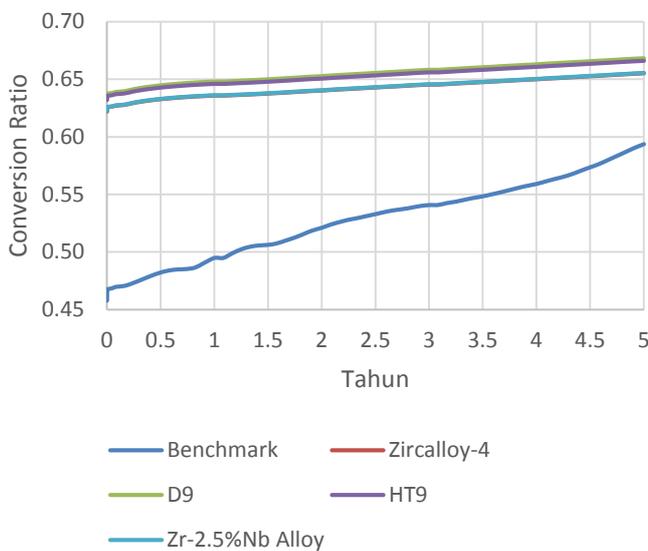
Gambar. 10. Nilai k_{eff} selama operasi teras reaktor pada variasi jenis kelongsong

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan informasi bahwa teras reaktor yang menggunakan material kelongsong berupa baja tahan karat (*stainless steel*) secara neutronik memiliki kemampuan yang tidak cukup baik. Secara visual dapat dilihat bahwa variasi D9 dan HT9 memiliki nilai k_{eff} yang lebih kecil sepanjang periode operasi teras reaktor dibandingkan dengan teras yang menggunakan kelongsong berbasis zirkonium. Teras reaktor dengan kelongsong D9 dan HT9 secara berurutan memiliki periode operasi reaktor sebesar 730,5 hari dan 940,5 hari. Hal ini cukup jauh bila dibanding dengan teras benchmark yang mampu beroperasi selama 1425,75 hari. Hal ini dapat disebabkan oleh adanya material yang memiliki tampang lintang serapan yang tinggi untuk neutron termal di dalam jenis kelongsong. Kandungan krom, vanadium, dan titanium dapat berkontribusi terhadap berkurangnya periode operasi reaktor karena ketiga unsur ini memiliki nilai tampang lintang serapan pada energi termal yang relatif besar dibandingkan dengan jenis logam yang lain.

Sementara itu, teras reaktor dengan kelongsong berbasis zirkonium memiliki kemampuan yang mirip dengan teras benchmark. Secara visual, perbedaan antara kelongsong zircalloy-4 dan Zr-2,5%Nb alloy memberikan pengaruh yang tidak signifikan. Namun, bila ditelaah lebih dalam, teras dengan kelongsong Zr-2,5%Nb alloy memiliki kemampuan neutronik yang lebih rendah dibandingkan teras dengan kelongsong zircalloy-4. Periode operasi teras reaktor dari teras dengan kelongsong zircalloy-4 dan Zr-

2,5%Nb alloy secara berturut-turut adalah 1521 hari dan 1491. Perbedaan dari keduanya hanya terlampau 30 hari. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan kandungan niobium yang ada di dalam kelongsong. Kandungan niobium ini cukup berarti dari sisi neutronik karena niobium memiliki tampang lintang serapan neutron yang cukup besar pada energi termal, yaitu 1,15 barn. Nilai ini memiliki pengaruh yang signifikan bila ditelaah kembali karena terkandung dalam bungkus pin bahan bakar yang digunakan di dalam teras reaktor.

Selain nilai k_{eff} selama periode operasi reaktor, nilai rasio konversi dari variasi ini juga dapat diketahui melalui grafik sebagai berikut,



Gambar. 11. Hubungan rasio konversi selama operasi teras reaktor dalam variasi jenis kelongsong

Bila dibandingkan menggunakan parameter rasio konversi. Fenomena yang berkebalikan dengan nilai k_{eff} terjadi. Pada variasi ini, secara umum nilai rasio konversi dari teras reaktor dengan kelongsong berbasis baja tahan karat memiliki kemampuan yang lebih baik dibandingkan dengan teras reaktor yang menggunakan kelongsong berbasis zirkonium. Secara visual, dapat dilihat bahwa perbedaan antara kelongsong berbasis baja tahan karat dengan zirkonium tidak terlalu jauh, hal ini menunjukkan kemampuan konversi dari keempat variasi yang dapat dikatakan serupa. Namun, pada teras reaktor dengan kelongsong zirkonium, nilainya rendah karena proses transmudasi yang terjadi juga lebih sedikit dan juga proses konversi yang menjadi kelanjutannya menjadi lebih sedikit. Adanya

niobium dalam Zr-2,5%Nb alloy memengaruhi bagaimana perilaku teras reaktor dalam mengonversi material fertil menjadi material fisil. Dengan nilai serapan yang bertambah, kemungkinan hasil serapan tersebut menjadi aktinida yang kemudian terinduksi oleh neutron sehingga dikonversi menjadi material fisil juga semakin besar.

Fenomena yang serupa juga terjadi pada kelongsong berbasis baja tahan karat. Dengan kemampuan serapan yang tinggi dari material penyusunnya, D9 dan HT9 memiliki kemungkinan penyerapan material yang kemudian menghasilkan nuklida fertil lalu kemudian diinduksi neutron menjadi nuklida fisil yang lebih besar dibandingkan kelongsong berbasis zirkonium. Bila dilihat lebih jauh, D9 memiliki rasio konversi yang lebih baik dibandingkan dengan HT9, hal ini dikarenakan kandungan Nikel dan titanium di dalam baja D9 memberikan efek serapan yang lebih tinggi dibandingkan tungsten dan vanadium yang terkandung di dalam HT9. Meskipun perbedaan yang dimilikinya tidak signifikan, tapi sangat penting untuk mengetahui mengapa perbedaan tersebut terjadi.

Aktinida yang dihasilkan untuk variasi kelongsong zircalloy-4 adalah sebagai berikut.

Tabel. 9. Jumlah aktinida variasi kelongsong Zircalloy-4

Tahun	Aktinida (gram)			
	U-235	U-238	Pu-239	Pu-240
0	58.577	8.180.400	569.810	271.930
1	55.569	8.150.700	542.470	269.920
3	49.639	8.086.700	490.500	264.380
5	44.144	8.021.000	443.360	257.360

Berdasarkan nilai k_{eff} dan rasio konversi, dan jumlah aktinida, dipilih teras reaktor dengan kelongsong zircalloy-4 untuk menjadi acuan pada variasi berikutnya. Hal ini karena meskipun memiliki rasio konversi yang lebih kecil dibandingkan variasi yang lain, kemampuan neutroniknya cukup baik dan memiliki selisih yang cukup besar dibandingkan yang lain. Di sisi lain, nilai rasio konversi dari seluruh variasi ini masih lebih tinggi dibandingkan dengan teras benchmark, sehingga tidak masalah bila menggunakan teras yang memiliki rasio konversi yang paling kecil dibandingkan dengan yang lain.

KESIMPULAN

Performa teras PWR integral memiliki perubahan yang signifikan pada saat bahan bakar diubah dari awalnya menggunakan UO_2 menjadi MOX. Perubahan jumlah bahan bakar dan jenis kelongsong memberikan pengaruh yang signifikan pula. Secara umum, teras reaktor dengan menggunakan bahan bakar MOX memiliki performa yang lebih baik daripada teras berbahan bakar UO_2 . Teras PWR Integral yang memiliki performa terbaik adalah teras dengan 12% PuO_2 , diameter teras 165 cm, dan kelongsong zircalloy-4. Bila dilihat dari faktor-faktor yang memengaruhi, maka kesimpulan yang didapatkan adalah sebagai berikut,

1. Nilai Kekritisitas (k_{eff}) pada periode operasi teras reaktor bertambah secara signifikan dari yang awalnya bernilai teras reaktor dapat beroperasi selama 1425,75 hari bisa bertambah menjadi 1521 hari. Pada parameter ini, variasi yang paling berpengaruh adalah variasi rasio PuO_2 di dalam MOX,
2. Nilai rasio konversi yang dihasilkan oleh teras reaktor dengan bahan bakar MOX memiliki kecenderungan untuk tetap stabil dalam periode waktu tertentu. Perubahan nilai rasio konversi yang terjadi tidak signifikan apabila digunakan bahan bakar UO_2 ,
3. Inventori aktinida dari teras reaktor yang menggunakan MOX memiliki tren penurunan yang stabil. Hal ini terjadi selama seluruh variasi sudah dilakukan. Hal ini menunjukkan bahwa tren penurunan tersebut adalah sifat yang melekat di dalam bahan bakar MOX,

2. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, "Plutonium Management in the Medium Term," OECD/NEA, Paris, 2003.
3. NuScale Power, LLC, "NuScale Standard Plant, Design Certification Application, Reactor," NuScale Power, LLC, Oregon, 2016.
4. International Atomic Energy Agency, "Spent Fuel Reprocessing Options," IAEA, Vienna, 2008.
5. P. H. M. S. K. Koroush Shirvan, "The Design of a Compact Integral Medium Size PWR," *Nuclear Engineering and Design*, vol. I, no. 243, pp. 393-403, 2012.
7. World Nuclear Association, "Mixed Oxide (MOX) Fuel," 2017. [Online]. Available: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>. [Accessed 8 April 2018].
7. K. Okumura, T. Kugo and K. Tsuchisashi, SRAC2006: A Comprehensive Neutronic Calculation Code System, Ibaraki-Ken: JAEA, 2007.
8. K. Okumura, COREBN: A Core Burn-up Calculation Module for SRAC2006, Ibaraki-ken: JAEA, 2007.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika FT UGM yang telah menyediakan fasilitas bagi penulis untuk melakukan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi, Buku Statistik EBTKE 2016, Jakarta: Direktorat Jenderal EBTKE Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2016.