

# STUDI DESAIN REAKTOR AIR BERTEKANAN (PWR) BERUKURAN KECIL BERUMUR PANJANG BERBAHAN BAKAR THORIUM

Moh Nurul Subkhi<sup>1,2,a)</sup>, Zaki Suud<sup>1,b)</sup>, Abdul Waris<sup>1)</sup> and Sidik Permana<sup>1)</sup>

<sup>1</sup>*Nuclear Physics and Biophysics Research Group,  
Faculty of Mathematics and Natural Science, Bandung Institute of Technology.*

*Jalan Ganesha 10, Bandung, Indonesia*

<sup>2</sup>*Physics Dept., Faculty of Science and Technology, State Islamic University of Sunan  
Gunung Djati Bandung*

*Jalan A.H Nasution 105 Bandung, Indonesia*

<sup>a)</sup>nsubkhi@students.itb.ac.id

## Abstrak

Penelitian desain *small long-life* PWR berukuran kecil, berumur panjang, berbahan bakar thorium sudah berhasil dilakukan. Riset ini merupakan kelanjutan riset sebelumnya dengan melakukan survei parameter dan optimasi untuk disain teras pada daya sebesar 350 MWt. Teras didisain agar dapat beroperasi secara kritis 10 tahun tanpa pengisian bahan bakar. Reaktor termal kecil dapat beroperasikan dengan waktu yang lama tanpa *refueling* dengan cara memilih bahan bakar dengan *internal conversion ratio* besar dan eksese reaktivitas rendah selama waktu operasi. Oleh karenanya ada tiga strategi yang akan dilakukan seperti memanfaatkan *thorium cycle*, memakai konsep *tight lattice* dan menambahkan *burnable poison* Protactinium-231 dalam bahan bakar. Pada penelitian ini akan dilakukan survei parameter untuk fraksi bahan bakar dari 35% sampai dengan 65%, konsentrasi U-233 dan Pa-231 yang variatif dan optimasi neutronik juga akan dilakukan untuk mereduksi ukuran geometri teras aktif eksese reaktivitas seoptimal mungkin dengan distribusi daya yang merata. Perhitungan cell dan difusi multigrup pada penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan kode SRAC-COREBN yang dikembangkan oleh JAERI dengan memanfaatkan data nuklida JENDL-3.2/3.3.

**Kata kunci:** *small long-life*, PWR, *refueling*, *conversion ratio*, *burn up*, eksese reaktivitas, *thorium cycle*, *tight lattice*, *burnable poison*, distribusi daya.

## I. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan menggunakan teras *long*

*life* yang berumur panjang beserta

dengan aspek ekonomisnya cukup

prospektif untuk pembangkit listrik di

Indonesia. Model PLTN kecil dengan daya 100-1000MWt menjadi pilihan cukup baik untuk memenuhi kebutuhan listrik di kota/provinsi luar pulau Jawa-Bali. Adapun PLTN berdaya sedang/besar lebih tepat untuk memenuhi listrik di Jawa-Bali. Pada tanggal 11 maret 2011, kecelakaan nuklir Fukushima Jepang karena dampak gempa dan tsunami telah memberikan pelajaran cukup berharga tentang pentingnya memperhitungkan faktor keselamatan atau *safety*, khususnya untuk teknologi reaktor nuklir generasi IV di masa depan. Oleh karenanya, tipe PLTN generasi IV yang akan diperkenalkan harus benar-benar mempunyai karakteristik khusus sesuai dengan situasi dan kondisi di Indonesia yang notabane mirip seperti Jepang yang merupakan negara yang rentan gempa. Setidaknya tipe PLTN di Indonesia harus mempunyai faktor manfaat dan kehandalan yang tinggi, mempunyai kemampuan *inhern safety*, umur operasi panjang tanpa pengisian

bahan bakar atau *refueling*, resistan terhadap *proliferation* dan cukup ekonomis.

Disain teras adalah tahap awal dan salah satu bagian penting dalam tahap merancang reaktor nuklir sehingga menghasilkan sistem PLTN yang aman, efektif, efisien dan ekonomis pada waktu operasi dan energi yang telah ditentukan. Oleh karenanya dibutuhkan analisa detail, lengkap, komprehensif dan berkelanjutan pada proses perancangannya. Penelitian-penelitian dalam rangka melanjutkan dan memperbaiki / menyempurnakan disain reaktor termal kecil berbahan bakar thorium dari beberapa penelitian sebelumnya sangat penting dilakukan agar dapat memastikan kelayakan dan kehandalannya. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Hasil penelitian ini diyakini bisa bermanfaat dan dapat diusulkan sebagai salah satu kandidat

PLTN yang akan dikembangkan di Indonesia, khususnya di luar Jawa-Bali.

Penelitian ini bertujuan mendesain reaktor nuklir termal masa depan generasi IV berdaya 350 MWt berukuran kecil berumur panjang menggunakan thorium sebagai bahan bakar. Reaktor ini diharapkan memiliki *excess reactivity* kecil selama beroperasinya dan faktor *safety* yang tinggi. Pemanfaatan siklus thorium akan menjamin proses *burnup* berlangsung lama dan ini merupakan strategi efektif dan efisien yang dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir alternatif disamping uranium. Thorium memiliki faktor kapasitas pembangkit yang lebih tinggi dibanding uranium, dengannya reaktor akan memiliki karakteristik *long-life core* (teras berumur operasi panjang/lama). Namun demikian, bukan pekerjaan mudah untuk menekan eksese reaktivitas pada teras selalu rendah agar tetap kritis selama waktu *burnup*. Dalam penelitian ini kita fokus pada analisa neutronik dan terdapat

tiga strategi akan untuk mencapai tujuan diatas.

Pendisainan teras reaktor akan difokuskan pada tinjauan analisa neutronik dimana analisa lebih dalam akan dilakukan mengenai karakteristik inti atom yang berasal dari bahan bakar yang mengalami perubahan komposisi sepanjang reaktor beroperasi sehingga ini akan berpengaruh pada kekritisan reaktor. Optimasi disain *core* atau teras diterapkan pada PLTN tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan daya 350MWt pada geometri teras tiga dimensi (X-Y-Z). Reaktor dirancang dalam kondisi kritis dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian bahan bakar. Disain reaktor menggunakan bahan bakar thorium nitrida dimana U-233 sebagai material fisilnya yang ditambahkan protactinium (Pa-231). Adapun *cladding* menggunakan material ZIRLO dan moderator/pendinginnya menggunakan air ringan(H<sub>2</sub>O).

Studi awal menunjukkan tercapainya *long-life core* untuk reaktor termal kecil berbahan bakar thorium dengan memanfaatkan material aktinida neptunium dan protactinium. Disamping itu, penelitian tentang pemanfaatan bahan bakar thorium oksida pada reaktor kecil tipe PWR berumur panjang atau *small long life* sudah berhasil dilakukan.

Proses disain reaktor nuklir berukuran kecil berumur panjang memiliki beberapa masalah saat kondisi *power density* atau densitas daya standar, dimensi teras yang kecil akan membutuhkan *fissile material* dengan tingkat *enricment* yang tinggi dan ini berakibat nilai *reactivity swing* akan menjadi besar selama proses *burnup* sehingga ini akan berakibat reaktor tidak akan tergolong kedalam karakteristik reaktor nuklir generasi IV. Oleh karenanya untuk mendapatkan disain optimal pada reaktor kecil yang dapat beroperasi lama berkelanjutan tanpa pengisian bahan bakar atau *refueling*,

maka reaktor membutuhkan *internal conversion ratio* besar agar eksese reaktivitas yang dicapai cukup rendah selama waktu *burnup* yang panjang tersebut.

Namun disain reaktor termal ber-*internal conversion ratio* cukup tinggi termasuk pekerjaan yang tidak mudah. Dalam Penelitian ini terdapat tiga strategi untuk mencapai tujuan diatas yaitu menggunakan thorium sebagai bahanbakar dengan memanfaatkan siklus thorium-nya,menambahkan nuklida Protactinium-231 sebagai racun bahan bakar serta menggunakan tipe *tight lattice* pada sel bahanbakar.

Pada studi ini akan mencoba meneliti untuk mendapatkan hasil yang optimal sebagai kelanjutan dari penelitian sebelumnya yaitu dengan cara, pertama memanfaatkan siklus thorium lebih optimal, kedua memasukkan nuklida Protactinium-231 yang tepat dalam bahan bakar dan ketiga mengadopsi konsep *tight lattice* yang

efektif. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mendisain reaktor air bertekanan (PWR) berukuran kecil-berumur panjang (*small long life*) berbahan bakar thorium. Adapun strategi *burnup* yang dipakai dalam studi ini yaitu memanfaatkan siklus thorium, penambahan protactinium-231 sebagai *burnable poison* dalam bahan bakar dan pengadopsian konsep *tight lattice* sampai didapatkan fraksi bahan bakar yang tepat.

## II. Kajian Teori

### II.1. *Pressurized Water Reactor* (PWR)

Reaktor nuklir adalah suatu sistem tempat terjadinya reaksi fisi berantai, yang dapat dikendalikan dan dapat dipertahankan pada laju yang konstan, sehingga dapat menghasilkan energi. Bagian-bagian penting pada reaktor nuklir di antaranya yaitu elemen bakar, perisai, moderator dan elemen kendali (*control rod*). Syarat terjadi reaksi fisi berantai adalah apabila suatu inti unsur yang dapat membelah atau *fisil*

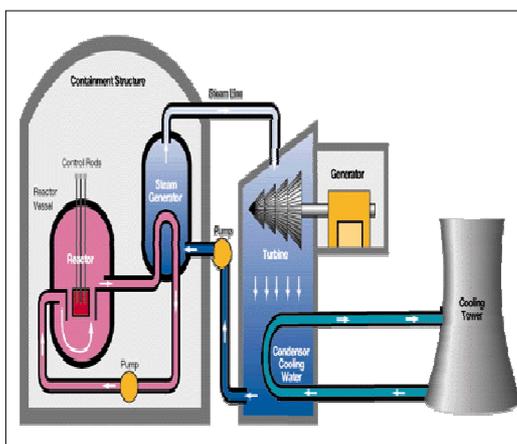
(Uranium-235, Uranium-233) bereaksi dengan neutron termal dan hasil reaksinya akan memproduksi unsur-unsur lain serta menghasilkan energi panas dan 2 - 3 neutron baru (Stacey, 2006).

#### *Pressurized Water Reactor*

(PWR) atau reaktor air bertekanan adalah termasuk reaktor nuklir termal yang menggunakan air ringan (*light water*) baik sebagai moderator maupun *coolant*. Moderator berfungsi sebagai material penahan untuk memperlambat laju neutron di dalam teras reaktor, sedangkan *coolant* berfungsi sebagai penyerap panas hasil reaksi fisi yang terjadi di dalam teras reaktor. Awalnya PWR dirancang oleh *Westinghouse Bettis Atomic Power Laboratory* khusus untuk keperluan kapal laut militer USA. Kemudian oleh *Westinghouse Nuclear Power Division*, mulai dilakukan perancangan PWR komersial. Reaktor PWR komersial pertama di USA adalah *Shippingport*, yang beroperasi hingga

tahun 1982. Reaktor tipe PWR ini merupakan reaktor daya yang paling banyak digunakan di dunia, yaitu sekitar 63 persen. Data IAEA terakhir (tahun 2012) menunjukkan dari 435 buah total reaktor di dunia, 272 buah diantaranya adalah reaktor PWR.

Pada dasarnya, PLTN itu adalah suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan panas dari hasil fisi untuk menghasilkan uap yang diperlukan untuk memutar turbin generator listrik (lihat Gambar II.1)



Gambar II.1 *Pressurized Water Reactor (PWR)*

Reaktor termal berpendingin air ringan atau *Light Water Reactor (LWR)*,

khususnya tipe PWR telah mengalami perkembangan dari generasi ke generasi hingga sampai pada generasi IV saat ini. Adapun penelitian-penelitian terkait untuk reaktor termal kecil berumur panjang, berbahan bakar thorium tertulis pada tabel II.1

### II.3. Analisa Neutronik

Pada perhitungan neutronik teras reaktor, hal terpenting yang harus dilakukan adalah membuat suatu deskripsi fisis yang bersifat analitis dan kuantitatif mengenai keadaan neutron di dalam teras reaktor. Keadaan neutron yang dimaksud mencakup populasi neutron, distribusi neutron, energi neutron, kerapatan neutron, fluks neutron dan lain sebagainya. Teori yang membahas hal-hal tersebut dikenal sebagai teori transport neutron. Akan tetapi, persamaan transport adalah persamaan yang relatif sulit untuk dicari solusinya. Oleh karena itu dapat dilakukan beberapa penyederhanaan, misalnya aproksimasi difusi. Untuk

menurunkan persamaan difusi multigrup, kita dapat menggunakan konsep keseimbangan neutron (*neutron balance*)

Berdasarkan konsep keseimbangan neutron tersebut terdapat dua faktor yang menambah jumlah neutron dalam suatu grup:

1. neutron muncul dalam grup  $g$  dari sumber neutron, sumber neutron ini terutama dihasilkan dari reaksi fisi nuklir
2. neutron dengan sembarang energi mengalami reaksi hamburan nuklir (*scattering*), sehingga energinya berubah dan termasuk dalam interval energi grup  $g$ .

Terdapat 3 faktor yang mengurangi jumlah neutron dalam suatu grup, yaitu:

1. kebocoran neutron, yaitu neutron keluar dari teras reaktor
2. absorpsi, yaitu neutron diserap oleh material di dalam teras reaktor
3. neutron dalam grup  $g$  mengalami reaksi hamburan nuklir (*scattering*),

sehingga energinya berubah dan keluar dari interval energi grup  $g$

Dalam keadaan *steady state*, persamaan difusi multigrup akan menjadi:

$$-\tilde{N}D_g \nabla^2 f_g + \sum_{Rg} \hat{a}_{Rg} f_g = \frac{\chi_g}{k_{eff}} \sum_{g'} v_{g'} \hat{a}_{fg'} f_{g'} + \sum_{g'} \hat{a}_{sg'} f_{g'} \quad (II.4)$$

Solusi untuk persamaan difusi dua grup masih bisa dilakukan secara analitik, tetapi untuk persamaan yang lebih dari dua grup diperlukan penyelesaian secara numerik. Solusi persamaan difusi dua dimensi multigrup secara numerik dapat diselesaikan dengan metode numerik beda hingga SOR (*successive over relation*). Caranya, pertama persamaan difusi diintegrasikan terhadap volume silinder.

Bentuk persamaan difusi bila dituliskan dengan metode numerik beda hingga (*finite-difference*) untuk suatu elemen ruang berindeks  $i$  (arah radial) dan  $j$  (arah aksial) adalah

$$-\tilde{N}D_g \nabla^2 f_g \cdot dA + \hat{a}_{fg} f_g V^{i,j} = \frac{\chi_g}{k} \sum_{g'} v_{g'} \hat{a}_{fg'} f_{g'} V^{i,j} + \sum_{g'} \hat{a}_{sg'} f_{g'} V^{i,j}$$

Dengan memasukkan syarat batas pada seluruh ruang maka persamaan di atas akan berbentuk matriks pentadiagonal M, sehingga persamaan difusi multigrup menjadi :

$$M \vec{f} = S$$

dengan S adalah

komponen suku sumber neutron.

Fluks neutron dan harga  $k_{eff}$  dapat diketahui dari pemecahan persamaan tersebut dengan menginverskan matriks M, dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

Tebak harga  $f^{(0)}$  dan  $k^{(0)}$ .

Hitung sumber neutron

$$S^{(0)} = \frac{\chi_g}{k^{(0)}} \sum_{g^i} v_{g^i} \sum_{g^i} f_g^{i,j(0)} + \sum_{g^i} \sum_{g^i} f_g^{i,j(0)}$$

Hitung  $f^{(0)}$  dengan menyelesaikan matriks pentadiagonal dengan menggunakan metode SOR sampai konvergen

Hitung

$$k^{(1)} = k^{(0)} \frac{\sum_{i,j} \sum_{g^i} v_{g^i} \sum_{g^i} f_g^{i,j(1)} V^{i,j}}{\sum_{i,j} \sum_{g^i} v_{g^i} \sum_{g^i} f_g^{i,j(0)} V^{i,j}}$$

Ulangi langkah 2 sampai konvergen

### II.4. Analisa *Burnup*

Perhitungan terhadap deplesi bahan bakar melibatkan beberapa jenis proses nuklir. Pertama perhitungan dilakukan dengan penyelesaian terlebih dahulu persamaan difusi multigrup untuk mendapatkan fluks neutron. Kemudian baru menyelesaikan persamaan *burnup*, yaitu pemecahan densitas inti sebagai fungsi waktu dan posisi (fluks neutron perlu diketahui).

Persamaan kecepatan reaksi menggambarkan densitas jumlah inti. Andaikan  $N_A(r,t)$  adalah densitas untuk nuklida jenis A, maka persamaannya menjadi:

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \sum_{g^s} \sum_{g^s} \sigma_{a_s}^A f_g^{i,j} N_A + \lambda_B N_B + \sum_{g^s} \sum_{g^s} \sigma_{i_s}^C f_g^{i,j} N_C \quad (II.5)$$

dengan:

$$\lambda_A N_A = \text{peluruhan radioaktif dari A}$$

$$\int_{\epsilon_g}^{\epsilon_g} \sigma_{ag}^A f_g \bar{\nu} N_A = \text{tangkapan neutron}$$

oleh A

$$\lambda_B N_B = \text{peluruhan dari B ke A}$$

$$\int_{\epsilon_g}^{\epsilon_g} \sigma_{cg}^C f_g \bar{\nu} N_C = \text{perpindahan dari C ke}$$

A melalui tangkapan neutron

Sehingga persamaan burnup untuk

setiap material adalah:

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \sigma_{a,i} f) N_i + \sum_m S_{m,i} N_m \quad (\text{II.6})$$

$N_i$  = densitas atom inti ke- $i$

$\lambda_i$  = konstanta peluruhan

$\sigma_{a,i}$  = penampang lintang absorpsi mikroskopik

$f$  = fluks neutron

$S_{m,i}$  = kecepatan produksi inti ke- $i$  dari inti ke- $m$

### III. Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam dua bagian. Bagian pertama terkait dengan analisa neutronik perilaku reaktor pada teras reaktor. Bagian kedua adalah analisa *burnup*. Rancangan tersebut

berupa sebuah reaktor yang mempunyai periode pengisian bahan bakar (*refuelling period*) yang lama yaitu 10 tahun.

Perhitungan neutronik dalam penelitian ini menggunakan program SRAC dengan sumber data nuklida JENDL-3.3/4.0 yang dikembangkan oleh JAEA-Jepang. Dengan memanfaatkan data nuklida tersebut, program SRAC ini dapat digunakan untuk melakukan perhitungan sel bahan bakar, *burnup* dan teras (*core*) pada desain reaktor PWR yang dirancang.

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi dari sel bahan bakar. Optimasi dilakukan pada beberapa jenis konsentrasi U-233 dari 2 w/o sampai 10 w/o dengan interval 0.2 w/o. Teras didesain dalam bentuk tiga dimensi X-Y-Z dan dibagi menjadi tujuh *region*, enam *region* untuk bahan bakar dan satu *region* sebagai *reflector*. Berdasarkan jenis bahan bakarnya teras berisi tiga tipe bahan bakar dengan variasi konsentrasi U dan *percentage* protactinium (Pa) yang

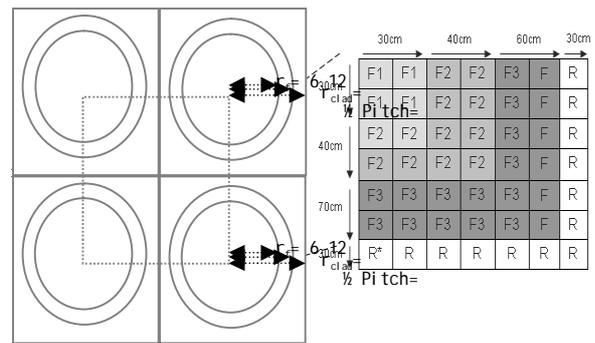
berbeda dan variasi fraksi bahan bakar yang berbeda dari 35% sampai 60%. Selain itu, melalui optimasi ini pula, kita mencoba untuk mengurangi ukuran geometri teras sekecil mungkin sampai mendapatkan hasil yang optimal.

Tabel 1 Parameter dan spesifikasi umum desain reaktor

Parameter	Spesifikasi
Bahan bakar	<i>thorium-uranium dioksida, thorium-uranium nitrida &amp;</i>
Struktur	<i>Zircalloy</i> dan <i>ZIRLO</i>
Coolant	air ( $H_2O$ )
Tipe sel Bahan bakar	<i>square cell</i>
Smear Density	90 % T.D.
Densitas	9.64 $g/cm^3$ ( $Th,U$ ) $O_2$ ;
Fraksi bahan bakar	35-60%
Fraksi Moderator	10%
Pitch	1.4 cm

Akhirnya, analisa neutronik akan dilakukan terhadap keadaan teras selama reaktor beroperasi (*burnup*), khususnya faktor multiplikasi dan eksponen reaktivitasnya. Selain itu, agar dihasilkan plot distribusi daya termal datar (*power flattening*) dan mempunyai *power peaking* yang kecil, kita harus mengoptimasi besar-kecil region teras

dan mengatur konfigurasi konsentrasi  $^{233}U$  dan persentase  $^{231}Pa$  yang tepat untuk setiap *region*-nya.



Gambar 1 Model sel bahan bakar tipe *square* dan model teras X-Y PWR

Jadi, optimasi desain sel bahan bakar dan teras reaktor PWR akan mencakup optimasi teras reaktor memanfaatkan *thorium cycle*, variasi fraksi bahan bakar, *power density* atau daya termal keluaran akan dilakukan. Kemudian *flattening* distribusi daya radial diupayakan sampai mendapatkan nilai *power peaking* kecil.

Perhitungan difusi multigrup pada geometri tiga dimensi X-Y-Z dilakukan menggunakan *software* SRAC-COREBN dengan menggunakan data nuklida dari

JENDL-3.3/4.0. SRAC akan melakukan perhitungan sampai menghasilkan data penampang lintang mikroskopik dan makroskopik dari masing-masing material teras reaktor. Adapun skema perhitungannya yaitu pertama SRAC akan melakukan perhitungan sel dan *burnup* untuk setiap sel bahan bakar, kemudian dihomogenisasi dan di-*collapsed* berdasarkan grup yang telah ditentukan. Perhitungan tersebut terus berulang sesuai dengan banyaknya *burnup* yang diinginkan dan sel bahan bakar yang terlibat, hasilnya akan disimpan dalam *User Library*. Kemudian, data makroskopik dari *User Library* akan digunakan sebagai data pada program COREBN untuk mencari faktor multiplikasi, reaktivitas dan distribusi *power density* dari teras reaktor.

#### IV. Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam penentuan bahan bakar yang akan digunakan perlu dilakukan survei

parameter atau *parametric survey*. *parametric survey* yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah penentuan karakteristik dari bahan bakar thorium saat kondisi *tight lattice* dan *burnable poison* ditambahkan.

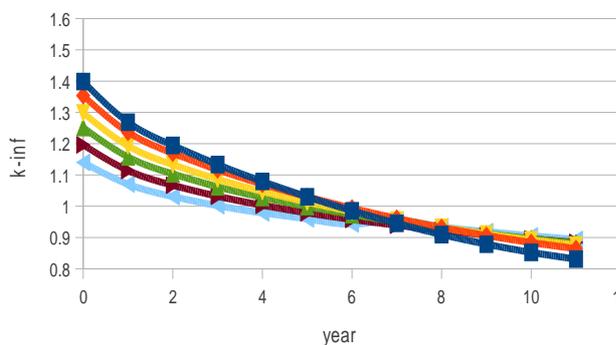
Survei parameter untuk reaktor tipe PWR kecil berdaya 350 MWt berumur panjang telah dilakukan. Standar parameter ditunjukkan pada tabel 2. Dalam studi ini pemanfaatan thorium oksida, karbida dan nitrida akan diteliti pada beberapa variasi fraksi bahan bakar.

Tabel 2. Parametrik survei

Parameter	Specification
<i>Thermal Power</i>	350 MWt
<i>Refueling period</i>	10 tahun
<i>Fuel</i>	<i>Th-Pa-U oxide,</i> <i>Th-Pa-U carbide,</i> <i>Th-Pa-U nitride</i>
<i>Cladding</i>	Zircalloy dan ZIRLO
<i>Coolant/moderator</i>	Air ringan (H <sub>2</sub> O)
<i>Fuel density</i>	9.64 g/cm <sup>3</sup> ( <i>Th oxide</i> ) 10.6 g/cm <sup>3</sup> ( <i>Th carbide</i> )

	11.6 g/cm <sup>3</sup> ( <i>Th nitride</i> )
<i>U-233 percentage</i>	3.0%- 8.0%
<i>Burnable Poisson</i>	0.2%-7.0% Pa-231
<i>Smear Density</i>	90 % T.D
<i>Water density</i>	0.64 g/cm <sup>3</sup>
<i>Pin cell geometry</i>	<i>square cell</i>
<i>Fuel fraction</i>	60%
<i>Pin Pitch</i>	1.4 cm

Bahan bakar oksida dengan *fuel fraction* lebih tinggi menghasilkan pola k-inf

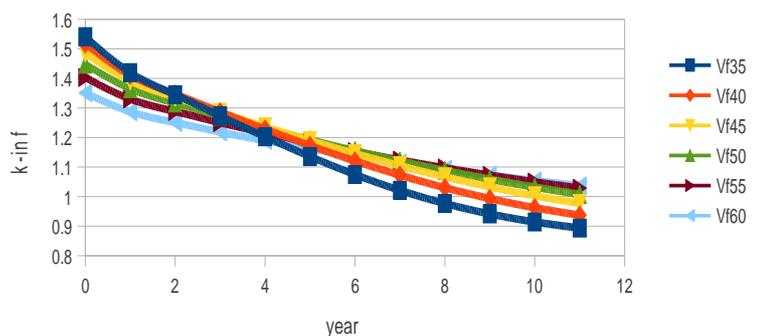
Fuel Volume Fraction UO<sub>2</sub>

burnup lebih baik selama waktu burnup yang panjang tanpa *refueling* atau *fuel shuffling* seperti terlihat pada Fig.2 dan Fig.3. Penggunaan 4.8% U-233 dengan fraksi bahan bakar 60% memberikan pola burnup yang relatif flat atau dengan kata lain eksen reaktivitas yang didapat lebih kecil, karena *tight lattice* praktis

memberikan fraksi moderator lebih sedikit sehingga akan mengurangi produksi neutron termoderasi ke lingkungan energi termal dalam proses reaksi fisi yang terjadi pada teras.

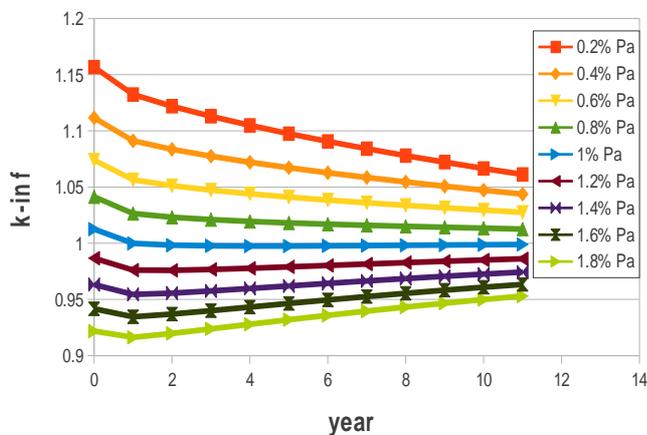
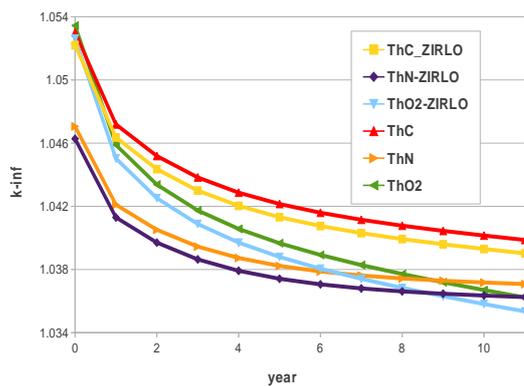
Fig.2 k-inf selama waktu burn-up untuk thorium oksida dengan 4.8% U-233 untuk fraksi bahan bakar yang berbeda. Fig.3 k-inf selama waktu burn-up untuk uranium oksida dengan 4.8% U-235 untuk fraksi bahan bakar yang berbeda

Berdasarkan Fig.2 dan Fig.3 juga kita dapat lihat bahwa bahan bakar thorium lebih baik dari pada bahan bakar uranium, ini menunjukkan

Fuel Volume Fraction (Th,U)O<sub>2</sub>

thorium lebih unggul dibandingkan uranium di lingkungan energi termal. k-inf pada bahan bakar thorium selama waktu burnup lebih tinggi daripada bahan bakar uranium.

Pengaruh bahan bakar thorium oksida, karbida dan nitrida dengan bahan *cladding* Zircalloy dan ZIRLO terhadap kinerja parameter neutronik selama



waktu operasi burn up terlihat pada Fig. 4.

Fig.4 k-inf selama waktu burn-up untuk *thorium oxide*, *thorium carbide* dan *thorium nitride* dengan bahan *cladding* Zircalloy dan ZIRLO

Ekses reaktivitas dari bahan bakar oksida, karbida dan nitrida dengan bahan

*cladding* ZIRLO cukup lebih baik dibandingkan bahan bakar menggunakan Zircalloy. ZIRLO mengandung Zr, 1 w/o Nb, 1 w/o Sn dan 0.1 w/o Fe yang memiliki penampang lintang hamburan (*scattering cross section*) tinggi. Adapun ekses reaktivitas dari bahan bakar karbida sedikit lebih baik dibandingkan oksida, sedangkan bahan bakar nitrida yang memiliki densitas bahan bakar tinggi dan konduktivitas termal cukup baik menunjukkan pengurangan yang paling signifikan terhadap ekses reaktivitas selama waktu burn up.

Fig.5 Pengaruh 3% U233-Pa231 pada perubahan k-inf selama burn-up untuk bahan bakar thorium nitrida

Penambahan bahan protaktinium yang mempunyai penampang lintang *capture* besar sebagai racun bahan bakar cukup efektif menekan k-inf di awal operasi. Pengaruh Pa-231 terhadap faktor multiplikasi infinit selama waktu burnup untuk U-233 sebesar 3% pada thorium nitrida ditunjukkan pada Fig.5. Bahan

bakar nitrida dengan presentase U-233 dan jumlah Pa-231 lebih tinggi menghasilkan pola  $k_{inf}$ -burnup lebih baik untuk waktu lama tanpa *refueling* or *fuel shuffling*.

Optimasi long life PWR berdaya 350 MWt selama 5 tahun tanpa refueling atau fuel shuffling pada bahanbakar thorium dengan 5% U-233 dan 2.8% Pa-231, 6%U-233 dan 4.2% pa231, 7% U233 dengan 6% Pa-231 memberikan hasil ekses reaktivitas berbeda yang ditunjukkan pada Fig.6

Hasil menunjukkan bahwa penggunaan 5% U-233 & 2.8% Pa-231 dan 6% U-233 & 4.2% Pa-231 memberikan ekses reaktivitas sekitar 1% dk/k. Namun demikian, penggunaan 7% U-233 & 6% Pa-231 memberikan ekses reaktivitas lebih rendah sekitar 0.5% dk/k

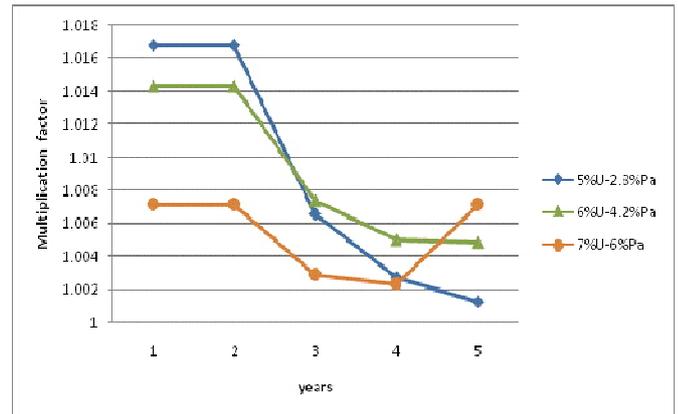


Fig.6 perubahan faktor multiplikasi efektif selama burnup untuk *long life* PWR berdaya 350 MWt tanpa *refueling* atau *fuel shuffling*

Hasil optimasi PWR berdaya 350 MWt PWR menunjukkan penambahan 4%-4.2% of Pa-231 dalam konfigurasi ini memberikan *excess reactivity* sekitar 1% dk/k selama 10 tahun burnup tanpa *refueling* atau *fuel shuffling*. Sedangkan penambahan 4.4% Pa-231 memberikan *excess reactivity* 0.5% dk/k selama 10 years operasi burn up .

Fig.7 menunjukkan teras PWR kecil berumur panjang berdaya 350 MWt dengan campuran bahan bakar thorium nitrida 5% U-233 & 3% Pa-231, 6% U-233 & 4.4% Pa-231 dan 7% U-233 & 3% Pa-231 telah berhasil dilakukan untuk waktu optimal operasi 6 tahun dengan

mengurangi *excess reactivity* sampai dengan 0.5 % Fig.7 dan Fig.8

Fig.6

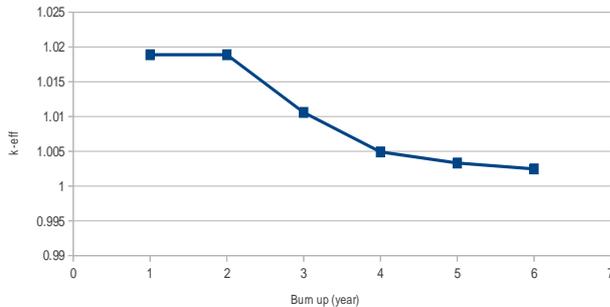


Fig.7 faktor multiplikasi efektif selama burnup untuk *long life* PWR berdaya 350 MWt untuk teras heterogen

## V. Kesimpulan

Analisa neutronik untuk PWR berukuran kecil berumur panjang menggunakan bahanbakar Thorium dengan penambahan protactinium telah dilakukan. Strategi pemanfaatan siklus thorium, bahanbakar yang *tight lattice* dan penambahan protactinium dapat menghasilkan teras berumur panjang dengan pengurangan *excess reactivity* selama waktu optimum operasi 6 tahun. Dalam sistem bahan bakar thorium, *reactivity swing* dari bahan bakar nitrida lebih baik daripada okisda dan

karbida. Kemudian optimasi PWR kecil berdaya 350 MWt berumur panjang berbahan bakar thorium nitrida menghasilkan *excess reactivity* rendah 0.5% dk/k. Optimasi teras *long-life* PWR untuk menganalisa aspek burn-up dan distribusi daya juga perlu dilakukan agar dapat beroperasi 10 tahun atau lebih.

## VI. Daftar Pustaka

1. Yuli Astuti and Zaki S (2005): *Preliminary design study of 40-100MWth Small PWR Using Thorium-Uranium Based Fuel*, Tokyo Tech COE INES – Indonesia International Symposium, Bandung, Indonesia.
2. Topan S. D. and Zaki S (2005) : *Neutronic Study Design of Very Small Long Life PWR with (Th,U)O<sub>2</sub> Fuel*, Tokyo Tech COE INES – Indonesia International Symposium, Bandung, Indonesia.
3. M. Nurul S . and Zaki S (2005): *Design Study of Small Long Life Th-U Fueled PWR*”, Tokyo Tech COE

- INES – Indonesia International Symposium, Bandung, Indonesia.
4. Topan S. D. , M. Nurul S ., Yuli Astuti and Zaki S (2005): *Neutronic Design Study of Small Long-live PWR with (Th,U)O<sub>2</sub> Fuel*, Proceedings of GLOBAL 2005 , Tsukuba, Japan
5. Nikitin, K., et al.(2001): *Long-life water cooled small reactor with U-Np-Pu fuel*, J.Nucl.Sci.Tecnology, Vol. 38 p.511-516
6. J.Stephen Herring, et al.(2001): *Low cost, proliferation resistant, uranium-thorium dioxide (ThO<sub>2</sub>-UO<sub>2</sub>) fuels for light water reactors*, Nuclear Engineering and Design, Vol.203 p.65 – 85
7. Vladimir Barchevtsev, et al. (2002) : *Potential to approach the long-life core in a light water reactor with uranium oxide fuel* , Annals of Nuclear Energy, Vol.29 p.595–608
8. Iyos Subki, et al.(2008): *The utilization of thorium for long-life small thermal reactors without on-site refueling*, Progress in Nuclear Energy, Vol.50 p.152-156
9. Sidik Permana et al.(2008): *Study on feasibility of large and small water cooled thorium breeder reactor in equilibrium states*, Progress in Nuclear Energy, Vol.50 p.320-324
10. Waris, A., et al.(2010): *Study on equilibrium characteristics of thorium-plutonium-minor actinides mixed oxides fuel in PWR*, Proc. Int. Conf. On Advances in Nuclear Sciences and Engineering (ICANSE), 3-4 November, 2009, Bandung, Indonesia, 2009.
11. Juraj Breza et al.(2010): *Study of thorium advanced fuel cycle utilization in light water reactor VVER-440*, Annals of Nuclear Energy Vol.37 p.685–690
12. Haileyesus Tsige-Tamirat(2011): *Neutronic assesment of the use of thorium fuels in current pressurized water reactors*, Progress in Nuclear Energy Vol.53 p 717-721

13. Report of Japanese Government to IAEA Ministerial Conference on Nuclear Safety - Accident at TEPCO's Fukushima Nuclear Power Stations, 2011
14. Zaki Su'ud(2003): "*The Role of Energy in Indonesia in 21<sup>st</sup> Century*", GENES4/ANP2003,1227
15. IAEA International Status and Prospects for Nuclear Power, 2012
16. James J. Duderstadt and Louis J. Hamilton(1976): *Nuclear Reactor Analysis.*: John Wiley & Sons
17. Neil E. Todreas and Mujid S. Kazimi(1990): *Nuclear System II Element of Thermal Hydraulic Design.* United States of America: Hemisphere Publishing Corporation
18. Stacey, W.M.( 2001): *Nuclear Reactor Physics*, John Wiley & Sons