

STUDI DESAIN SEL BAHAN BAKAR THORIUM NITRIDE (ThN) PADA GAS-COOLED FAST REACTOR

Sari Novalianda¹, Panangian Mahadi Sihombing², Fitria Nova Hulu³

^{1,2}Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar
Jl. Pintu Air IV No.214, Kwala Bekala, Medan, Sumatera Utara-20142

³Teknik Telekomunikasi, Politeknik Negeri Medan
Jl. Almamater No.1, Padang Bulan, Medan, Sumatera Utara-20155
E-mail: sarivaldano4@gmail.com

Abstrak

Energi Nuklir merupakan salah satu energi alternatif yang memiliki kelebihan pada jumlah energi yang dihasilkannya, bahan bakar yang digunakannya dan tidak menghasilkan pencemaran udara. Gas-Cooled fast Reactor merupakan reaktor cepat berpendingin helium yang termasuk dalam reaktor Generasi IV yang memiliki keunggulan dalam segi penggunaan bahan bakar dan keselamatan. Thorium merupakan salah satu bahan bakar nuklir yang bersifat fertile yang jumlahnya melimpah, yaitu empat kali lebih banyak dibandingkan dengan jumlah uranium. Perhitungan kekritisan desain reaktor cepat berbahan bakar thorium nitride (ThN) menggunakan seperangkat program SRAC yang menghasilkan kondisi kritis pada pengayaan uranium-233 sebesar 5% dengan nilai excess reactivity sebesar 0,044% pada fraksi volume 65% fuel, 10% cladding dan 25% coolant dan menghasilkan level burnup $1,93 \times 10^5$ MWd/ton. Bahan bakar thorium bisa digunakan sebagai bahan bakar nuklir untuk pembangkit listrik tenaga nuklir dengan waktu burnup 50 tahun.

Kata kunci: burnup; Sel; SRAC; Thorium Nitride (ThN)

Abstract

Nuclear energy is an alternative energy that has advantages in the amount of energy it produces, the fuel it uses and does not produce air pollution. Gas-Cooled Fast Reactor is a helium-cooled fast reactor which is included in Generation IV reactor which has advantages in terms of fuel use and safety. Thorium is one of the fertile nuclear fuels which is abundant, which is four times more than the amount of uranium. Calculation of the criticality of the fast reactor design with thorium nitride (ThN) fuel using a set of SRAC programs that produces a critical condition for enrichment of uranium-233 by 5% with an excess reactivity value of 0.044% in volume fraction of 65% fuel, 10% cladding and 25% coolant and produces a burnup level of 1.93×10^5 MWd/ton. Thorium fuel can be used as nuclear fuel for nuclear power plants with a burnup time of 50 years.

Keywords: burnup; Cell; SRAC; Thorium Nitride (ThN)

PENDAHULUAN

Di Indonesia, energi fosil masih menjadi energi utama yang digunakan untuk mencukupi kebutuhan energi. 85% kebutuhan energi Indonesia masih bergantung pada energi fosil yang merupakan energi tidak terbarukan. Kebergantungan dan konsumsi energi fosil yang tinggi membuat laju pengurangan sumber energi fosil menjadi lebih cepat. Sehingga pemerintah berupaya untuk mengatasi masalah energi ini melalui konservasi dan diversifikasi energi [1].

Energi nuklir menjadi salah satu rencana Kebijakan Energi Nasional (KEN) dalam surat Perintah Gubernur Lemhannas RI No : Sprin/95/I/2013. Surat perintah tersebut mengenai “Pengembangan Teknologi Nuklir Guna Pemanfaatan Energi Terbarukan Dalam Meningkatkan Ketahanan Energi Nasional” [2]. Kebijakan ini mengingat bahwa energi nuklir memiliki beberapa kelebihan yaitu bahan bakar yang lebih ekonomis, mudah dipindahkan dengan keamanan yang ketat, energi yang dihasilkan sangat besar, dan tidak mempunyai efek gas rumah kaca serta hujan

asam. Energi nuklir juga memiliki keunggulan dari kepadatan dayanya serta biaya operasinya yang relatif murah dibandingkan dengan sistem-sistem lainnya [3].

Riser terkait perkembangan energi nuklir terus berkembang dengan ditandai perkembangan generasi reaktor nuklir. Generasi reaktor dimulai sejak generasi I hingga ke IV yang terus mengalami perubahan dalam segi desain penggunaan bahan bakar, faktor keamanan yang terus meningkat. Salah satu desain reaktor nuklir generasi ke IV adalah reaktor cepat berpendingin helium atau *Gas-Cooled Fast Reactor* yang dapat menggunakan bahan bakar berupa Uranium dan Thorium. Akhir-akhir ini perkembangan minat dalam riset penelitian penggunaan bahan bakar thorium sebagai bahan bakar alternatif selain uranium pada reaktor cepat terus berkembang pesat. Hal ini dikarenakan sifat dari bahan bakar thorium sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang lebih aman, lebih murah dan lebih ramah lingkungan. Thorium lebih murah karena jumlahnya yang melimpah di bumi, yaitu empat kali lebih banyak dibandingkan dengan jumlah uranium [4]. Selain itu, bahan bakar thorium lebih bersih dan ramah lingkungan karena mengurangi emisi gas CO₂ dari sektor energi listrik dan menghasilkan limbah yang lebih sedikit [5].

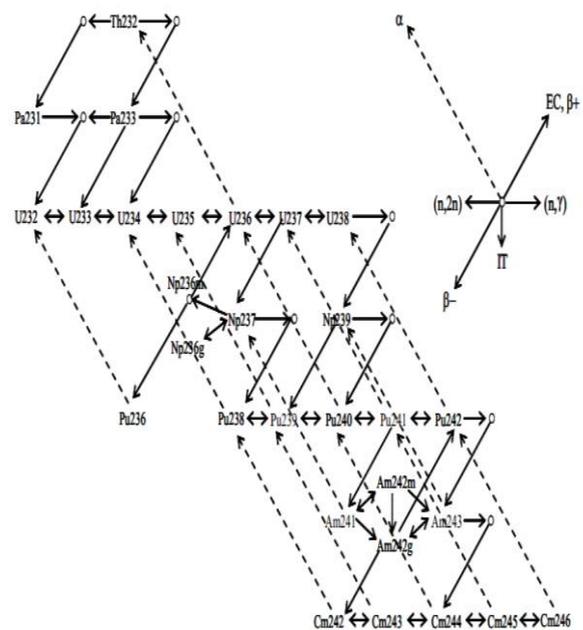
Limbah radioaktif yang dihasilkan oleh thorium lebih ramah lingkungan jika dibandingkan dengan uranium karena memiliki waktu paruh yang lebih singkat. Bahan bakar thorium menghasilkan 0,5 kg plutonium, sementara bahan bakar uranium menghasilkan 230 kg plutonium dari reaktor dengan kapasitas 1 GWe dalam waktu operasi satu tahun [5].

Dalam penggunaan bahan bakar, spektrum cepat reaktor cepat memungkinkan untuk menggunakan bahan bakar yang dapat langsung membelah (*fissile*) dan bahan bakar yang tidak dapat langsung membelah (*fertile*) yang tersedia [6]. Penggunaan bahan bakar nuklir banyak didasarkan pada bahan bakar *fissile* yaitu uranium-235 dan plutonium-239 sedangkan bahan bakar *fertile* seperti thorium-232 (²³²Th) menjadi bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan.

Isotop thorium alam terdiri dari thorium-232 yang bersifat *fertile*. Meskipun thorium-232 bersifat *fertile*, thorium-232 juga dapat

digunakan sebagai bahan bakar nuklir. Thorium-232 akan menyerap neutron dan bertransmutasi menjadi uranium-233 yang bersifat *fissile*.

Hampir 100% isotop thorium di alam adalah thorium-232. Thorium memiliki rasio konversi yang lebih besar dari siklus uranium. Sehingga thorium memiliki potensi untuk dapat beroperasi lebih lama dan pada saat yang sama mengurangi reaktivitas maksimum selama reaktor beroperasi [7]. Rantai burnup thorium di tunjukkan oleh Gambar 1.



Gambar 1. Rantai *Burnup* Thorium [8].

Perhitungan dasar dalam manajemen bahan bakar adalah perhitungan penyusutan dan produksi isotop sebagai fungsi dari waktu. Persamaan kecepatan reaksi yang menggambarkan densitas jumlah inti dalam teras dapat diperoleh dengan menggunakan prinsip keseimbangan yang sederhana. Andaikan $N_A(\mathbf{r}, t)$ adalah densitas untuk nuklida jenis A , maka persamaan kecepatan secara umum dapat digambarkan dalam skema [9].

$$\frac{dN_A}{dt} = -\lambda_A N_A - \left[\sum_g \sigma_{Ag}^A \phi_g \right] N_A + \lambda_B N_B + \left[\sum_g \sigma_{\lambda g}^C \phi_g \right] N_C \quad (1)$$

Selain dengan memperhatikan kecepatan neutron, keadaan reaktor agar dapat beroperasi dengan stabil juga harus diperhatikan. Stabil berarti bahwa jumlah neutron yang dihasilkan yang terserap sama dengan yang hilang [10]. Secara matematis, dapat dituliskan:

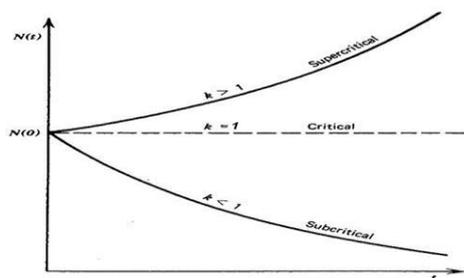
$$k = \frac{\text{jumlah neutron pada satu generasi}}{\text{jumlah neutron pada generasi sebelumnya}} \quad (2)$$

dengan ketentuan,

$k = 1$, disebut sebagai keadaan kritis, dimana jumlah neutron pada satu generasi sama dengan jumlah neutron pada generasi berikutnya,

$k > 1$, disebut sebagai keadaan superkritis, artinya jumlah neutron yang dihasilkan akan bertambah secara terus menerus,

$k < 1$, disebut sebagai keadaan subkritis, dimana jumlah neutron yang dihasilkan lebih sedikit sehingga lama kelamaan, reaktor bisa mati karena jumlah neutron tiap generasi semakin menurun.



Gambar 2. Faktor Multiplikasi Efektif

METODE

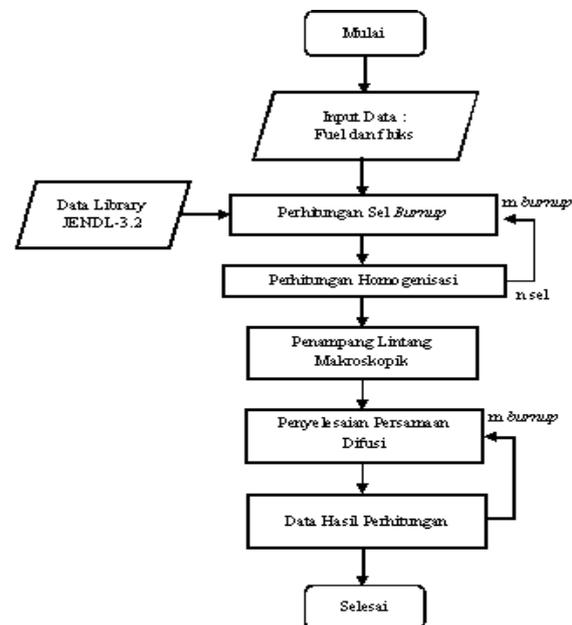
Metode penelitian ini adalah menggunakan seperangkat komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu 12.1 SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*) adalah kode program komputer yang digunakan untuk perhitungan neutronik untuk berbagai macam tipe reaktor yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). SRAC adalah sebuah program komprehensif dan terintegrasi yang memiliki lima kode pokok untuk melakukan berbagai perhitungan neutronik, yaitu : PIJ yang berdasarkan pada metode CP, SN transport, TWOTRAN (2D), difusi dan CITATION.

Dalam mendesain reaktor diperlukan spesifikasi ukuran sel bahan bakar dan teras, dimana parameter desain GFR ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Desain GFR.

Parameter	Spesifikasi
Daya termal	500 MWt
Bahan bakar	Thorium Nitride (ThN)
Cladding	Stainless Steel (SS316)
Coolant	Helium
Fraksi volume, Fuel/Cladding/Coolant	60%:10%:30%
Diameter pitch	1,4 cm
Geometri teras	Cylinder
Tinggi/ lebar teras aktif	350 cm / 240 cm
Tebal reflektor	100 cm

Diagram alir penelitian ini ditunjukkan pada gambar:



Gambar 3. Diagram Alir Perhitungan SRAC

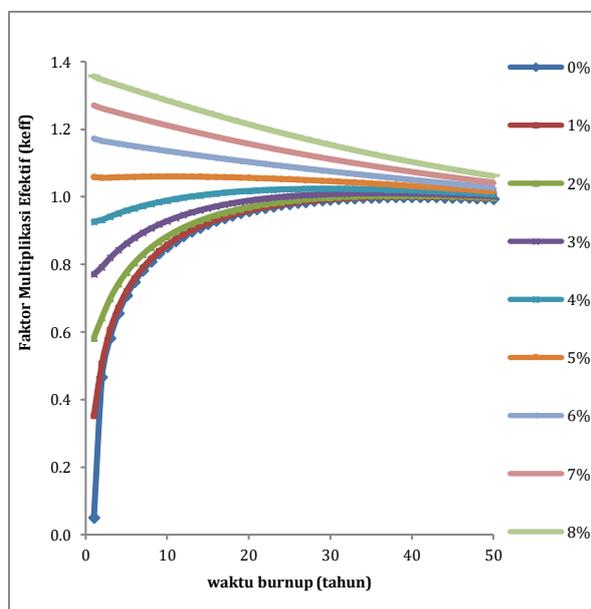
HASIL DAN PEMBAHASAN

Sel bahan bakar merupakan bagian terkecil dari susunan bahan bakar nuklir yang terdiri dari bahan bakar (*fuel*), kelongsong (*cladding*) dan pendingin (*coolant*).

Hasil dari perhitungan sel bahan bakar Thorium Nitride (ThN) menggunakan SRAC menghasilkan beberapa parameter desain diantaranya:

1. Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff})

Faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) pada sel bahan bakar menunjukkan rasio antara jumlah neutron yang dihasilkan pada suatu generasi terhadap jumlah neutron pada generasi sebelumnya dalam satu sel bahan bakar. Nilai k_{eff} pada sel bahan bakar yang menggunakan bahan bakar ThN dengan variasi pengayaan uranium 233 ditunjukkan pada Gambar 4 (IAEA, 2005). Penggunaan bahan bakar thorium alam (0% U-233) menghasilkan nilai k_{eff} pada tahun pertama sangat rendah kemudian naik secara perlahan pada tahun berikutnya tetapi tidak dapat mencapai kritis ($k_{eff} = 1$) selama 50 tahun periode *burnup*. Hal ini karena thorium alam (Th-232) merupakan bahan bakar *fertile* yang tidak dapat langsung membelah sehingga cenderung lambat dalam memproduksi neutron. Oleh karena itu, untuk dapat memicu terjadinya reaksi berantai pada Th-232 dan mendapatkan nilai k_{eff} yang kritis dari tahun pertama diperlukan pengayaan berupa bahan bakar *fisille*.



Gambar 4. Nilai Faktor Multiplikasi Efektif terhadap waktu *burnup* untuk variasi pengayaan uranium-233

Uranium-233 merupakan salah satu bahan bakar *fisille* yang berasal dari rantai *burnup* Th-232. Uranium-233 dapat memicu terjadinya reaksi berantai pada thorium-232. Pengayaan U-233 pada thorium-232 dapat menguntungkan. Selain dapat memicu reaksi berantai, uranium-233 yang berasal dari rantai *burnup* thorium dapat dihasilkan selama

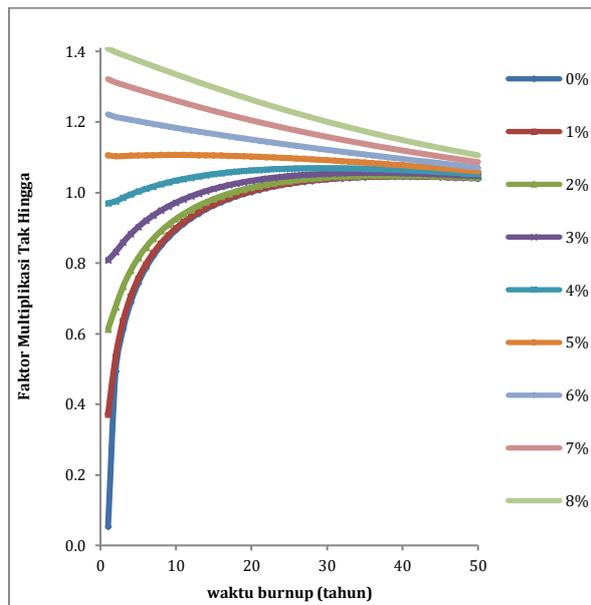
burnup thorium-232 berlangsung. Dengan dihasilkannya kembali uranium-233, maka reaksi berantai dapat dipertahankan untuk dapat terus mencapai keadaan kritis. Peningkatan persentase pengayaan uranium-233 dapat meningkatkan nilai k_{eff} pada tahun pertama yang ditunjukkan pada variasi pengayaan uranium-233 sebesar 1% hingga 8%. Pengayaan uranium-233 sebesar 1 – 4% belum dapat membuat reaktor mencapai kritis pada tahun pertama. Keadaan kritis baru dapat dicapai dengan pengayaan uranium-233 lebih dari 5%. Pengayaan uranium-233 sebesar 6% – 8% memiliki nilai k_{eff} mencapai kritis pada tahun pertama tetapi cenderung menurun selama waktu *burnup*. Hal ini karena meningkatnya persentase pengayaan uranium-233, otomatis akan menurunkan persentase thorium-232. Peningkatan persentase uranium-233 akan membantu uranium-233 untuk melakukan reaksi berantai dan meningkatkan populasi neutron pada tahun pertama. Ketika densitas pengayaan uranium-233 mulai berkurang, uranium-233 yang berasal dari hasil transmutasi thorium-232 akan digunakan selanjutnya. Tetapi dikarenakan penurunan persentase thorium-232 memperkecil produksi uranium-233 yang dihasilkan. Maka jumlah produksi uranium-233 selama waktu *burnup* akan terus menurun dan menyebabkan semakin berkurangnya peningkatan populasi neutron pada sel bahan bakar.

Selain dari nilai k_{eff} , tingkat kekritisan juga ditentukan pada nilai *excess reactivity*. Semakin rendah nilai *excess reactivity* maka akan semakin tinggi tingkat kekritisannya. Nilai *excess reactivity* yang dimiliki dari pengayaan uranium-233 sebesar 5% hingga 8% masing-masing 0,044%, 0,083%, 0,120% dan 0,155%. Pengayaan uranium-233 sebesar 5% memiliki nilai *excess reactivity* terendah. Sehingga pada sel bahan bakar, ThN dengan pengayaan uranium-233 sebesar 5% dapat mencapai kritis pada tahun pertama waktu *burnup*.

2. Faktor Multiplikasi Tak Hingga (k_{inf})

Faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) menunjukkan kenaikan atau penurunan fluks neutron, yang dihitung tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras dengan mengasumsikan ukuran sel bahan bakar tak hingga. Gambar 5 menunjukkan nilai k_{inf}

terhadap waktu *burnup* untuk variasi pengayaan uranium-233.

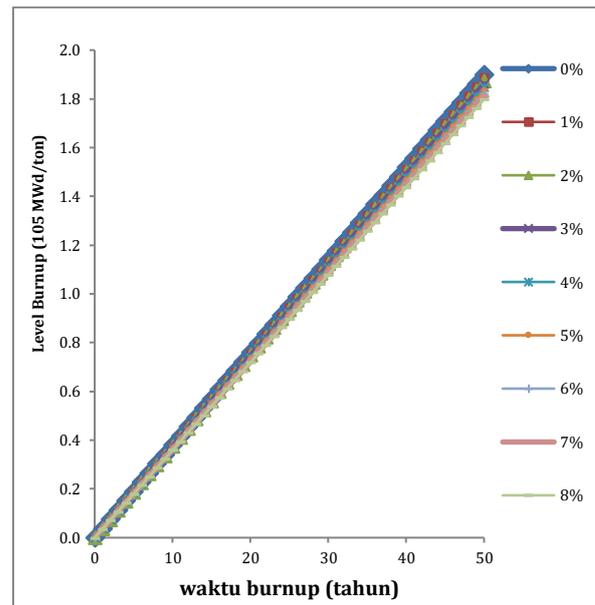


Gambar 5. Nilai Faktor Multiplikasi Tak Hingga terhadap waktu *burnup* untuk variasi pengayaan uranium-233

Nilai k_{inf} pada pengayaan uranium-233 sebesar 0 – 4% cenderung mengalami kenaikan yang cukup signifikan tetapi belum dapat mencapai keadaan kritis pada tahun pertama. Sedangkan pada pengayaan 6% hingga 8%, nilai k_{inf} pada tahun pertama telah mencapai 1 dan cenderung mengalami penurunan selama waktu *burnup*. Pengayaan uranium-233 sebesar 5% cenderung stabil sekitar 1,01. Nilai ini tentunya lebih besar daripada nilai k_{eff} dikarenakan dihitung tanpa adanya kebocoran

3. Level *burnup*

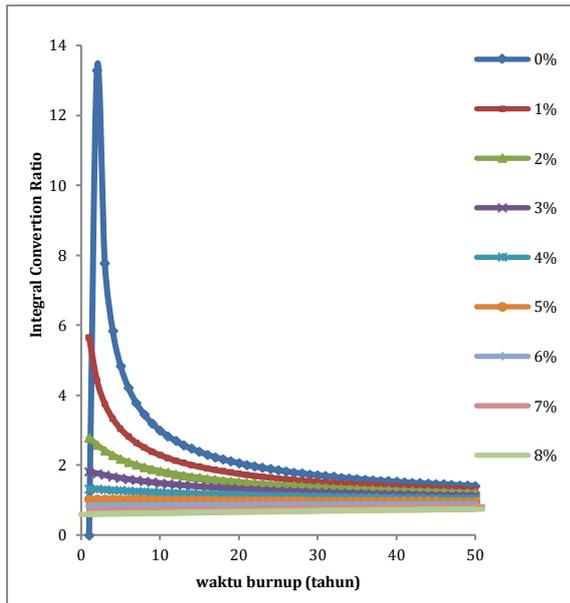
Level *burnup* didefinisikan sebagai total energi yang dilepaskan per unit massa bahan bakar sebagai hasil pembakaran bahan bakar Gambar 6 menunjukkan level *burnup* terhadap variasi pengayaan U-233. Semakin besar pengayaan U-233, semakin kecil level *burnup*. Menurunnya level *burnup* dapat diartikan jumlah bahan bakar yang dibakar untuk menghasilkan daya semakin sedikit. Dengan sedikitnya pembakaran bahan bakar maka dapat menghemat bahan bakar sehingga dapat memperpanjang masa operasi reaktor.



Gambar 6. Level Burnup terhadap variasi pengayaan U-233

4. Integral Conversion Ratio

Integral conversion ratio (Integ. C.R) menunjukkan jumlah perubahan bahan bakar fertile menjadi bahan bakar fisil. Pada penelitian ini, Inte.C.R menunjukkan jumlah perubahan Th-232 menjadi U-233. Besarnya nilai Inte.C.R dapat dilihat pada Gambar 7. Pada bahan bakar thorium alam menunjukkan nilai Integ.C.R. yang naik kemudian turun secara signifikan. Hal ini dikarenakan thorium alam akan berubah menjadi U-233 pada tahun pertama yang akan digunakan dalam pembakaran. Ketika ditambahkan pengayaan U-233, nilai Integ.C.R semakin menurun disebabkan karena persentase bahan fertile Th-232 semakin menurun. Selain itu, penambahan U-233 juga akan membantu pembakaran Th-232 pada tahun pertama. Sehingga produksi U-233 oleh Th-232 akan cenderung stabil selama waktu *burnup*.



Gambar 7. Nilai *Conversion Ratio* terhadap variasi pengayaan U-233

SIMPULAN

Reaktor cepat Gas-Cooled fast Reactor dengan geometri sel bahan bakar berbentuk silinder berbahan bakar thorium nitride telah mencapai keadaan kritis pada pengayaan uranium-233 sebesar 5% dengan nilai *excess reactivity* sebesar 0,044% pada fraksi volume 65% *fuel*, 10% *cladding* dan 25% *coolant* dengan level *burnupnya* $1,93 \times 10^5$ MWd/ton . Bahan bakar thorium nitride ini bisa digunakan sebagai bahan bakar nuklir untuk pembangkit listrik tenaga nuklir dengan waktu *burnup* 50 tahun.

DAFTAR PUSTAKA

1 ESDM. Supply Demand. Kementerian Energi dan Sumber daya Mineral

- Republik Indonesia. 2013.
- 2 LEMHANNAS. 2013. Pengembangan Teknologi Nuklir Guna Pemanfaatan Energi Terbarukan dal Rangka Meningkatkan Ketahanan Energi Nasional. J. Kaji. LEMHANNAS. 11.
 - 3 Ariani M, Su 'ud Z, Monado F. 2013. Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar. J. Ilmu Dasar. **14**(1): 11.
 - 4 IAEA. Thorium Fuel Cycle Potential Benefits and Challenges. International Atomic Energy. 2005.
 - 5 Kamei T, Hakami S. 2011. Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR. J. Prog. Nucl. Energy. 820.
 - 6 Anggoro YD, Dewi D, Yuliyanto AT, Prapatan M. 2013. Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. J. Pengemb. Energi Nukl. **15**(2): 69.
 - 7 Trianti N, Su'ud Z, Riyana ES. 2016. Design Study of Thorium Cycle Based Long Life Modular Boiling Water Reactors. Indones. J. Phys. **22**(4): 133.
 - 8 Okumura KT. 2007. Comprehensive Neutronics Calculation Code System. .
 - 9 Novalianda S, Ramadhan A, Su'ud Z. 2020. Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. J. Penelit. Sains. **22**(2): 50.
 - 10 Novalianda S, Ramadhan A. 2020. Analysis of Enhance Reliability Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) Based on Fuel Uranium Nitride (UN). Int. J. Sci. Eng. Sci. **4**(8): 4.