



Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe

Imam Bastori*, Moch. Djoko Birmano

Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan, Indonesia 12710

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima:

13 Desember 2017

Diterima dalam bentuk revisi:

20 Maret 2018

Disetujui:

03 April 2018

Kata kunci:

Ketersediaan Uranium

Bahan bakar nuklir

ABSTRAK

KETERSEDIAAN URANIUM DI INDONESIA UNTUK MEMENUHI KEBUTUHAN BAHAN BAKAR PLTN. Bahan bakar nuklir merupakan komponen penting PLTN dalam menghasilkan panas. Besarnya kebutuhan bahan bakar nuklir akan mempengaruhi jumlah penyediaan bijih uranium. Demi menjaga keberlangsungan operasi PLTN, sangat penting untuk menjaga keseimbangan kebutuhan dan pasokan uranium. Oleh karena itu, sebelum PLTN dibangun di Indonesia perlu dilakukan analisis ketersediaan uranium, agar dapat dibuat strategi pasokan uranium yang baik dan berkelanjutan. Tujuan penelitian adalah untuk mengkaji pasokan uranium untuk pengoperasian PLTN di Indonesia dengan menekankan kemampuan pasok uranium dalam negeri yang didasarkan pada data cadangan uranium yang dimiliki oleh Indonesia. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data sekunder cadangan uranium di Indonesia, penyusunan *spread sheet Nuclear Fuel Mass Balance (NFMB) Calculator* untuk menghitung jumlah kebutuhan uranium pada setiap tahap siklus bahan bakar nuklir, selanjutnya membandingkan antara kebutuhan riil uranium PLTN dan cadangan uranium yang dimiliki oleh Indonesia. Hasil analisis memperlihatkan bahwa PLTN jenis PWR dengan kapasitas 1.000 MWe akan menghasilkan energi listrik sebesar 7.884 GWh dalam setahun. Dengan *burn-up* 43 GWd/tonU, bahan bakar nuklir per tahun dibutuhkan sekitar 28,93 ton yang dapat dipenuhi dari uranium alam U_3O_8 (*yellow cake*) sebanyak 244,68 ton atau setara dengan 108.362,2 ton bijih uranium. Dengan cadangan uranium Indonesia sebanyak 70.000 ton dalam bentuk *yellow cake* akan mampu memenuhi kebutuhan bagi 7 unit PLTN dengan kapasitas masing-masing 1.000 MWe yang beroperasi untuk 40 tahun.

ABSTRACT

URANIUM AVAILABILITY IN INDONESIA TO MEET THE NEEDS OF NPP'S FUEL. Nuclear fuel is an important component in generating heat in the nuclear power plant (NPP). The amount of nuclear fuel needs will affect the amount of supply of uranium ore. To maintain the continuity of the NPP's operation, it is very important to maintain the balance of demand and supply of uranium. Therefore, before the NPP is built need to analyze the availability of uranium, so that could be made the good and sustainable uranium supply strategy. The objective of the study is to assess the uranium supply for the NPP's operation in Indonesia by emphasizing the ability of domestic uranium supplies based on Indonesia's uranium reserves data. The methods used include collecting uranium reserve data in Indonesia, then compiling the spread sheet of Nuclear Fuel Mass Balance (NFMB) Calculator to calculate the amount of uranium demand at each stage of the nuclear fuel cycle, then comparing the real uranium needs needs for NPPs and uranium reserves owned by Indonesia. The results of this analysis show that NPP with a capacity of 1,000 MWe will generate electricity of 7,884 GWh in a year. With a burn-up of 43 GWd/tonU, the need for nuclear fuel per year is about 28.93 tonnes, which is obtained from 244.68 tonnes of natural uranium (U_3O_8 (*yellow cake*)) or equivalent to 108,362.2 tonnes of uranium ore. With Indonesia's uranium reserves are 70,000 tons in yellow cake, it will be able to meet the needs for 7 units NPP with each capacity of 1,000 MWe that operating for 40 years.

Keywords: uranium availability, nuclear fuel

© 2017Jurnal Pengembangan Energi Nuklir. All rights reserved

1. PENDAHULUAN

Uranium adalah unsur utama di antara bahan radioaktif alami yang ada di bebatuan terutama batuan beku dan metamorfosa dari batuan sedimen yang bersifat asam, seperti granit, fosfat, dan *black shales* kaya organik, yang terdapat di kerak bumi[1] dan air laut[2]. Ada tiga isotop uranium di alam, yaitu U-234, U-235, U-238, yang mana sekitar

99,3% dari total uranium alami adalah uranium-238[3]. U_3O_8 dan UO_2 adalah senyawa oksida uranium yang paling umum, dan banyak dihasilkan dari bijih untuk menghasilkan *yellow cake* (U_3O_8)[4].

Uranium adalah unsur terpenting dalam bahan bakar nuklir untuk PLTN dalam menghasilkan panas. Banyaknya bahan bakar

*Penulis korespondensi.
E-mail: imbazt@gmail.com

nuklir yang dibutuhkan PLTN akan mempengaruhi jumlah penyediaan bijih uranium. Untuk menjaga keberlangsungan operasi PLTN, sangat penting untuk menjaga keseimbangan antara kebutuhan dan pasokan uranium.

Secara umum besarnya kebutuhan bahan bakar nuklir ditentukan oleh daya reaktor, faktor kapasitas, efisiensi termal, fraksi bakar (*burn-up*), dan lamanya reaktor beroperasi [5]. Jumlah kebutuhan bahan bakar nuklir untuk 1 unit PLTN dapat digunakan untuk memprediksi jumlah kebutuhan bijih uranium yang diperlukan untuk memproduksi bahan bakar nuklir tersebut. Data ini penting untuk memperkirakan jumlah uranium yang dapat disediakan sendiri maupun yang harus dibeli dari pihak lain untuk memenuhi kebutuhan PLTN secara kontinyu. Selain itu, kebutuhan dalam jangka panjang pun dapat dihitung dengan menyusun strategi penyediaan uranium secara berkesinambungan guna operasi PLTN dapat terjaga dengan baik. Data dan informasi ini sangat penting untuk menjadi bahan pertimbangan dalam mengambil keputusan pembangunan PLTN. Berdasarkan alasan tersebut, kajian ketersediaan uranium dalam negeri untuk pemenuhan kebutuhan PLTN menjadi topik penting dan mendesak.

Saat ini, Indonesia sedang berencana untuk membangun PLTN pertama. Menurut studi terakhir yang dilakukan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), PLTN akan mulai beroperasi pada tahun 2027[6], sementara itu studi yang dilakukan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), PLTN baru akan beroperasi masuk jaringan Jawa-Bali pada tahun 2030[7]. Untuk itu, sebelum membangun PLTN perlu dilakukan analisis ketersediaan uranium agar dapat dibuat strategi pasokan uranium yang baik dan berkelanjutan. Pasokan uranium direncanakan berasal dari dalam negeri maupun luar negeri (impor). Hasil pemetaan yang telah dilakukan oleh Pusat Pengembangan Geologi Nuklir (PPGN) – BATAN menunjukkan bahwa Indonesia memiliki cadangan uranium sekitar 70.000 ton dan tersebar di berbagai daerah [8,9]. Cadangan sebesar ini merupakan aset yang berharga bagi negara dalam rangka untuk mengembangkan PLTN di masa depan. Dalam perspektif penyediaan energi, uranium memiliki nilai strategis yang tinggi karena

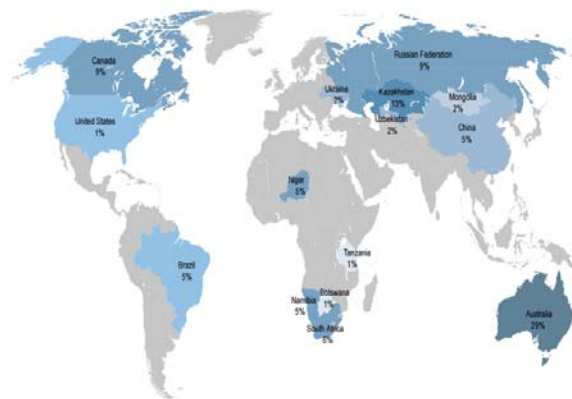
merupakan komponen penting dalam pembangkitan listrik pada PLTN. Berdasarkan hal tersebut, sangat penting untuk menyusun skenario pasokan uranium pada PLTN dengan mempertimbangkan cadangan domestik dalam negeri dan kemungkinan pengadaannya melalui impor luar negeri.

Tujuan penelitian adalah mengkaji pasokan uranium untuk pengoperasian PLTN di Indonesia dengan menekankan kemampuan pasok uranium dalam negeri yang didasarkan pada data cadangan uranium yang dimiliki Indonesia. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan pembangunan PLTN.

2. DASAR TEORI

2.1. Cadangan Uranium Dunia

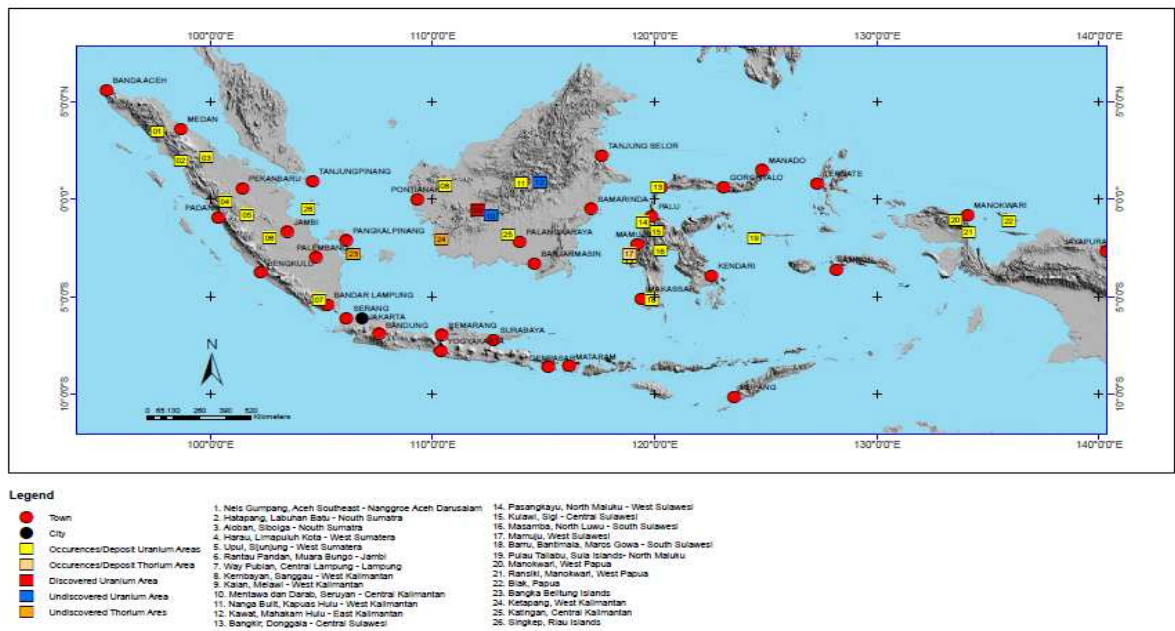
Distribusi cadangan uranium di dunia ditunjukkan pada Gambar 1[10]. Cadangan uranium terbesar berada di negara Australia (29%), dilanjutkan Kazakhstan (13%), Rusia (9%), Kanada (9%), Afrika Selatan (6%), Namibia (5%), Nigeria (5%), Brazil (5%), China (5%), Ukraina (2%), Mongolia (2%), Uzbekistan (2%), USA (1%), Botswana (1%), Tanzania (1%), dan sisanya termasuk Indonesia (5%). Akan tetapi dalam hal produksi uranium, terdapat tiga negara terbesar produsennya, yaitu Kazakhstan, Kanada dan Australia [11].



Gambar 1. Cadangan Uranium di Dunia[10].

2.2. Cadangan Uranium di Indonesia

Hasil pemetaan cadangan uranium yang dilakukan oleh Pusat Pengembangan Geologi Nuklir (PPGN) – BATAN ditunjukkan pada Tabel 1, Indonesia memiliki cadangan uranium



Gambar 2. Peta Persebaran Uranium di Indonesia[30].

sekitar 70.000 ton U_3O_8 (*yellow cake*) [8,9]. Dari 70.000 ton uranium tersebut, 1.608 ton kategori terukur, 6.456 ton kategori terindikasi, 2.648 ton tereka dan sisanya masuk dalam kategori hipotetik.

Tabel 1. Cadangan Uranium di Indonesia[8,9]

Item	Jumlah (ton)
Terukur	1.608
Terindikasi	6.456
Tereka	2.648
Hipotetik	59.288
Total	70.000

Sebagian besar cadangan uranium kebanyakan berada di Kalimantan Barat [4,12,13,14,15,16], sebagian lagi ada di Papua [17], Bangka Belitung [1,18,19] dan Sulawesi Barat. Kajian terakhir dilakukan di Mamuju, Sulawesi Barat, dan deteksi pendahuluan menyebutkan kadar Uranium di lokasi tersebut berkisar antara 100 dan 1.500 ppm (mg/kg). Selain itu daerah lainnya di Indonesia yang berpotensi mengandung cadangan uranium cukup besar adalah Pulau Singkep[20], Tapanuli dan Hatapang Sumatera Utara[21,22], Sumatera Barat[23], Kalimantan Timur[24,25], Mamuju Sulawesi Barat[26,27], Maluku[28], Irian Jaya (Papua)[29] dan lain-lain. Persebaran cadangan uranium di Indonesia baik yang terukur, terindikasi,

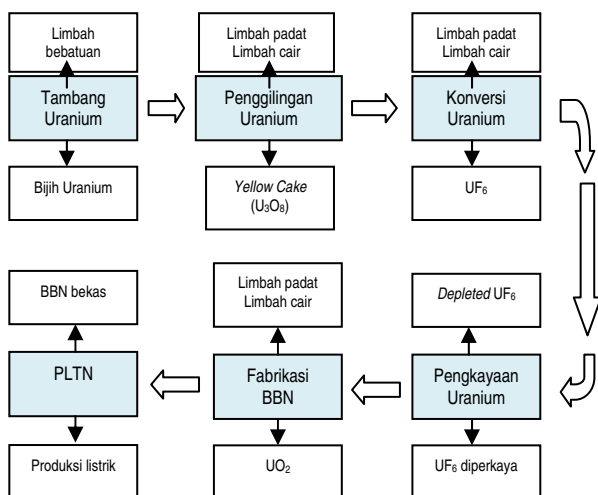
tereka, hipotetik, secara lengkap dapat dilihat pada Gambar 2[30].

2.3. Kesenjangan Material Bahan Bakar Nuklir

Siklus bahan bakar nuklir dimulai dari penambangan batuan uranium yang menghasilkan bijih uranium (*uranium ore*) dan limbah bebatuan. Setelah melalui proses penggilingan (*mill*) akan berubah menjadi U_3O_8 yang biasa disebut sebagai uranium alam. Tahap berikutnya adalah proses konversi dari U_3O_8 menjadi UF_6 [30,31,32]. Untuk meningkatkan kadar U-235 dalam uranium total, maka diperlukan proses pengkayaan (*enrichment*), dan umumnya untuk reaktor nuklir jenis air ringan dibutuhkan pengkayaan sampai dengan 3,6% berat. Selanjutnya dilakukan fabrikasi untuk menghasilkan perangkat bahan bakar nuklir. Siklus bahan bakar nuklir ditunjukkan pada Gambar 3 [33,34].

Dengan konsep keseimbangan material bahan bakar nuklir dalam siklus ini, akan dapat dihitung jumlah bijih uranium, limbah padat, limbah cair, bahan bakar UO_2 dan bahan bakar bekas. Oleh karena itu sangat penting untuk mengetahui jenis dan besarnya parameter proses yang terlibat dalam tiap tahapan siklus. Pada proses penambangan uranium, selain dihasilkan bijih uranium, juga dihasilkan limbah

bebatuan. Besarnya perbandingan limbah bebatuan terhadap bijih uranium berkisar antara 1 dan 5 untuk penambangan di bawah tanah, dan antara 1 dan 60 untuk penambangan di permukaan. Kadar uranium dalam bijih uranium berada pada kisaran 0,026% U (di Rossing, Namibia), lebih dari 1,1% U (di Key Lake, Kanada), sampai dengan 12,7% U (di McArthur River, Kanada). Pada proses penggilingan tidak semua uranium yang terkandung dalam bijih uranium dapat diambil, ada bagian yang hilang, dan besarnya faktor kehilangan selama proses ekstraksi sebesar 4,24% dan ada padatan yang terikut dalam efluen sesuai asumsi US-NRC sebesar 50% berat[35]. Pada tahap konversi ada faktor kehilangan sebesar 0,5%, menghasilkan limbah padat 0,7 ton per ton U dan limbah cair berkisar antara 3m³ - 10m³ per ton uranium. Sedangkan pada proses pengayaan ada parameter *product assay* yang besarnya antara 3,6% - 4,1% berat U-235 untuk PWR, sedangkan untuk BWR antara 3% - 3,2%[35]. Pada tahap ini juga dihasilkan *tail assay* antara 2,5% - 0,3% berat U-235, dan mengkonsumsi listrik secara spesifik 50 kWh/SWU (*Separative Work Unit*). Pada proses fabrikasi ada faktor kehilangan material 1%, menghasilkan limbah padat 0,5 m³ per ton U dan limbah cair 9 m³ per ton U.



Gambar 3. Siklus Bahan Bakar Nuklir[33,34].

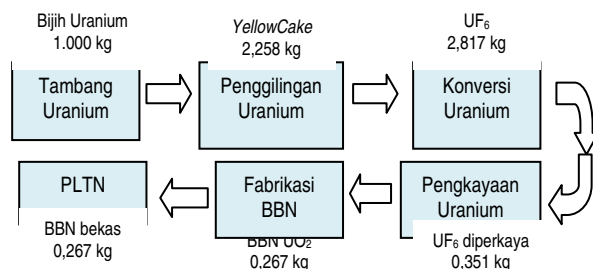
Parameter penting dalam PLTN adalah *burn-up* dan efisiensi pembangkitan listrik. Nilai *burn-up* berkisar antara 40 - 43,4 GWd/ton U untuk PWR, dan antara 33 - 40 GWd/ton U untuk BWR. Sedangkan untuk efisiensi pembangkitan listrik diambil antara

32% - 34,5%. Gambaran secara lengkap parameter proses dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Proses [34]

Deposit Bijih Uranium	Nilai (Asumsi)
• Rasio limbah terhadap bijih uranium	5
• Kadar bijih uranium	0,2% berat U
Penggilingan (Mill)	
• Kehilangan selama proses ekstraksi	4,24%
• Padatan yang terikut pada efluen	50% berat
Konversi	
• Kehilangan	0,5%
• Limbah padat	0,7 ton per ton U
• Limbah cair	6,5 m ³ per ton U
Pengayaan	
• Produk pemurnian (<i>Product assay</i>)	3,6% berat U-235
• Ikutan pemurnian (<i>Tails assay</i>)	0,3% berat U-235 50 kWh/SWU
• Konsumsi listrik spesifik	
Pabrikasi	
• Faktor kehilangan	1%
• Limbah padat	0,5 m ³ per ton U
• Limbah cair	9 m ³ per ton U
PLTN	
• <i>Burn-up</i>	43 GWd/ton U
• Efisiensi	33%

Pada Gambar 4 dijelaskan secara khusus hubungan nilai material antara bahan bakar nuklir siap pakai dengan pasokan bijih uraniumnya. Untuk memproduksi 0,267 kg bahan bakar nuklir siap pakai (UO₂) dibutuhkan 1.000 kg (1 ton) bijih uranium atau jika pasokan dalam bentuk *yellow cake* diperlukan 2,258 kg. Hal ini menunjukkan kandungan uranium dalam bijih uranium hanya sekitar 0,027% sedangkan dalam *yellow cake* sekitar 11,82%.



Gambar 4. Keseimbangan Material Pada Siklus BBN[35,36].

3. METODOLOGI

Metodologi meliputi beberapa tahapan, yaitu:

1. Mengumpulkan data sekunder tentang cadangan uranium di Indonesia
2. Menyusun *spread sheet* untuk menghitung jumlah kebutuhan bahan bakar nuklir.
3. Membandingkan hasil yang diperoleh dari perhitungan *spread sheet* dengan cadangan yang dimiliki oleh Indonesia, dan membuat berbagai skenario pasokan yang mungkin dapat dilakukan untuk keberlanjutan operasi PLTN.

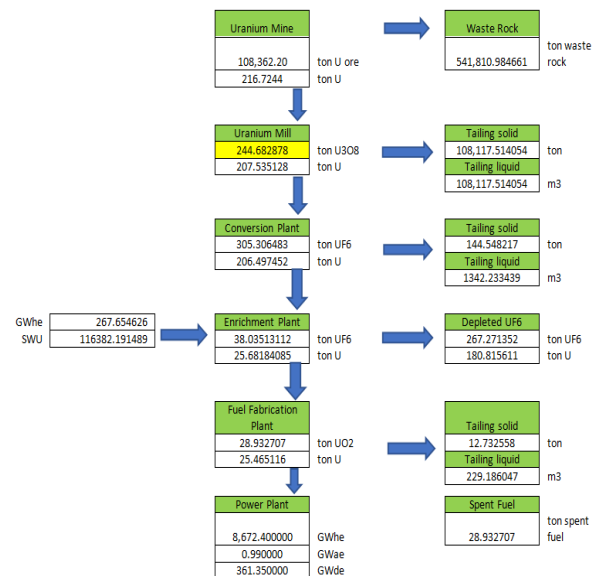
Spread sheet perhitungan kebutuhan bahan bakar nuklir ini merupakan rangkaian perhitungan untuk memperoleh berbagai parameter yang berkaitan dengan pemakaian bahan bakar nuklir dalam teras reaktor nuklir, termasuk kebutuhan pasokan uranium. *Spread sheet* ini didasarkan pada konsep kesetimbangan material bahan bakar nuklir (*Nuclear Fuel Mass Balance (NFMB) Calculator*)[35,36]. *Spread sheet* dibuat secara terstruktur menggunakan aplikasi Microsoft Excel, yang secara umum terdiri dari 4 bagian yaitu input data, *material balance*, *fuel cost*, dan hasil. Bagian input data merupakan *sheet* untuk memasukan data yang diperlukan dalam perhitungan, bagian *material balance* dan *fuel cost* merupakan *sheet* untuk melakukan proses perhitungan, dan bagian hasil merupakan *sheet* untuk menampilkan hasil perhitungan. Penggunaannya cukup mudah karena pemakainya cukup memasukkan data yang diperlukan pada bagian input data, dan hasil perhitungannya dilihat pada *sheet* hasil.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam kajian ini diasumsikan bahwa PLTN menggunakan reaktor tipe PWR berkapasitas 1.000 MWe dengan nilai parameter seperti tercantum pada Tabel 2. Tampilan hasil perhitungan dengan menggunakan *spread sheet NFMB Calculator* disajikan dalam Gambar 5 dan Tabel 3.

Sebuah PLTN tipe PWR berkapasitas 1.000 MWe berisi 200 perangkat bahan bakar nuklir terdiri dari 43.000 batang bahan bakar

dan sekitar 16 juta pelet bahan bakar [6]. Dari Tabel 3 terlihat bahwa PLTN dengan kapasitas 1.000 MWe akan menghasilkan energi listrik sebesar 7.884 GWh dalam setahun. Jika *burn-up* bahan bakar yang digunakan adalah 43 GWd/ton U maka kebutuhan bahan bakar nuklir per tahun sekitar 28,93 ton. Untuk memproduksi bahan bakar nuklir sebesar itu diperlukan uranium alam U_3O_8 (*yellow cake*) sebanyak 244,68 ton atau setara dengan 108.362,2 ton bijih uranium.



Gambar 5. Tampilan Hasil Perhitungan *Spread Sheet*.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Dengan Menggunakan *Spread Sheet NFMB Calculator*

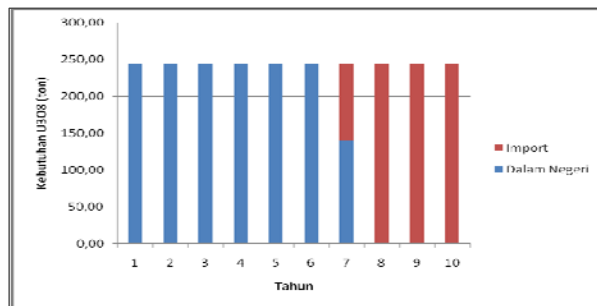
Uraian	Kuantitas
Tipe Reaktor	PWR
Daya Reaktor	1.000 MWe
<i>Burn-up</i>	43 GWd/ton U
Efisiensi	33%
Lama Operasi	365 hari
Produksi Listrik	7.884 GWh/tahun
Kebutuhan Bahan Bakar Nuklir	28,93 ton
Kebutuhan Bijih Uranium	108.362,2 ton
Kebutuhan Uranium Alam U_3O_8 (<i>Yellow Cake</i>)	244,68 ton

Untuk mengoperasikan reaktor selama 10 tahun diperlukan pasokan *yellow cake* sekitar 2.446,8 ton. Jumlah tersebut telah melebihi cadangan terukur yang dimiliki Indonesia, sehingga harus ada upaya untuk menambah cadangan uranium terukur agar dapat mengamankan pasokan untuk kebutuhan PLTN.

Berdasarkan data Tabel 1, cadangan uranium terukur 1.608 ton, cadangan ini yang dapat ditambah untuk memasok secara penuh kebutuhan 1 unit PLTN selama 6 tahun. Jika hanya mengandalkan cadangan terukur maka pada tahun ketujuh harus mulai mengimpor uranium untuk memenuhi kebutuhan operasi reaktor, dan hal ini dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 6.

Tabel 4. Pasokan Uranium untuk PLTN Tipe PWR 1.000 MWe

Tahun ke-	Kebutuhan (ton)	Pasokan (ton)	
		Dalam Negeri	Impor
1	244.68	244.68	0.00
2	244.68	244.68	0.00
3	244.68	244.68	0.00
4	244.68	244.68	0.00
5	244.68	244.68	0.00
6	244.68	244.68	0.00
7	244.68	139.92	104.76
8	244.68	0.00	244.68
9	244.68	0.00	244.68
10	244.68	0.00	244.68



Gambar 6. Pasokan Uranium untuk PLTN Tipe PWR 1.000 MWe.

Diperkirakan PLTN pertama di Indonesia akan beroperasi pada tahun 2027 atau 2030 dengan kapasitas 2x1.000 MWe[6,7]. Cadangan uranium terukur yang dimiliki Indonesia sebanyak 1.608 ton hanya dapat memasok secara penuh kebutuhan bahan bakar PLTN selama 3 tahun. Jika hanya mengandalkan cadangan uranium terukur, maka pada tahun keempat operasi PLTN harus mulai mengimpor uranium untuk memenuhi kebutuhan operasi PLTN.

Untuk menghilangkan kecenderungan mengimpor uranium, maka sejak awal harus dilakukan eksplorasi atau investigasi lanjutan agar cadangan terukur uranium meningkat, minimal mampu untuk memenuhi pasokan satu periode umur reaktor nuklir yang berkisar 40 – 60 tahun. Usaha-usaha yang harus dilakukan antara lain:

- Melakukan investigasi lanjutan untuk mengubah status cadangan terindikasi menjadi cadangan terukur.
- Melakukan investigasi lanjutan untuk mengubah status cadangan teraka menjadi terukur atau minimal terindikasi.
- Melakukan investigasi lanjutan untuk mengubah status cadangan hipotetik menjadi terukur atau minimal terindikasi.

Sebagaimana dijelaskan sebelumnya bahwa cadangan uranium alam U_3O_8 (*yellow cake*) di Indonesia total sekitar 70.000 ton yang tersebar di Kalimantan Barat, Papua, Bangka Belitung, dan Sulawesi Barat. Jika Negara Indonesia mampu untuk menambang seluruh cadangan uranium tersebut, maka pemerintah Indonesia dapat menyediakan pasokan uranium untuk 7 pembangkit dengan daya masing-masing 1.000 MWe yang beroperasi selama 40 tahun umur PLTN. Jika Indonesia gagal mengeksploitasi seluruh cadangan tersebut, maka alternatif pemenuhan kebutuhan uranium dengan cara mengimpor dari negara produsen uranium, seperti Australia, Nigeria dan Afrika Selatan. Mulai tahun 2010, IAEA telah menyediakan *bank* bahan bakar nuklir untuk semua anggota IAEA dengan menggunakan skema *spot price*. *Bank* bahan bakar yang dimiliki dan dikelola oleh IAEA tersebut berfungsi untuk membantu memastikan pasokan uranium sebagai bahan bakar PLTN dan akan menjadi cadangan bahan bakar untuk setiap negara yang ingin membangun PLTN. Apabila suatu negara anggota IAEA mengalami gangguan pasokan bahan bakar nuklir dan tidak dapat dipulihkan melalui pasar komersial, atau melalui mekanisme G to G, atau dengan cara lain sejenisnya, maka negara tersebut dapat meminta bantuan pasokan dari bank bahan bakar IAEA tanpa mengganggu pasar komersial.

5. KESIMPULAN

Indonesia memiliki cadangan uranium sekitar 70.000 ton dalam bentuk *yellow cake* (U_3O_8) yang kebanyakan berada di Kalimantan Barat, Papua, Bangka Belitung dan Sulawesi Barat. PLTN dengan kapasitas 1.000 MWe akan menghasilkan energi listrik sebesar 7.884 GWh dalam setahun. Jika *burn-up* bahan bakar yang digunakan adalah 43 GWd/ton U, maka kebutuhan bahan bakar nuklir per tahun sekitar 28,93 ton. Untuk memproduksi bahan bakar nuklir sebanyak itu diperlukan uranium alam U_3O_8 (*yellow cake*) sebanyak 244,68 ton atau setara dengan 108.362,2 ton bijih uranium. Diperkirakan PLTN pertama di Indonesia akan beroperasi pada tahun 2027 atau 2030 dengan kapasitas 2x1.000 MWe, sehingga, dari cadangan uranium terukur 1.608 ton yang dimiliki Indonesia hanya dapat memasok secara penuh kebutuhan bahan bakar PLTN selama 3 tahun. Jika hanya mengandalkan cadangan terukur, maka pada tahun keempat operasi PLTN harus mulai mengimpor uranium untuk memenuhi kebutuhan operasi PLTN. Jika Indonesia mampu untuk menambang seluruh cadangan uranium 70.000 ton tersebut maka dipastikan dapat menyediakan pasokan uranium untuk 7 unit PLTN dengan daya masing-masing 1.000 MWe yang beroperasi selama 40 tahun umur PLTN. Jika Indonesia gagal mengeksplorasi seluruh cadangan uranium yang ada, maka alternatif pemenuhan kebutuhan hanya dapat diatasi dengan cara impor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Dr. Suparman sebagai Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir yang telah membantu menyelesaikan penyusunan makalah ini.

DAFTAR ACUAN

- [1]. Ngadenin, H. Syaeful, K. S. Widana, M. Nurdin, "Potensi Thorium dan Uranium Di Kabupaten Bangka Barat". Jurnal Eksplorium, Volume 35, No. 2, November 2014, hal. 69-84.
- [2]. S. Suresh, V.M. Joshi, S.K. Jha, R.M. Tripathi, "Distribution of Uranium in Sediment of Creek Ecosystem". Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 313, July 2017, pp 79-83.
- [3]. W. Shin, et al., "Distribution and Potential Health Risk of Groundwater Uranium in Korea". Chemosphere, vol. 163, November 2016, pp. 108-115.
- [4]. Rachmat Saputra, "Identification of Radiometric and Mineragraphy Analysis of Uranium and Sulfide Mineral at BM-179 Kalan-West Kalimantan Uranium Ore". American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS), Vol. 14, No. 2, November 2015, Pages: 311-321.
- [5]. Mochammad Ahied, "Efisiensi Material Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir LWR (Light Water Reactor) dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactor)", Jurnal Pena Sains, Vol. 2, No. 1, April 2015, Hal. 1-6.
- [6]. —, *Indonesia Nuclear Energy Outlook (INEO) 2015: Penyediaan Uranium Untuk PLTN Indonesia*, Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir – Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Jakarta, 2015.
- [7]. —, *Outlook Energi Indonesia (OEI) 2015: Pembangunan Energi Untuk Mendukung Pembangunan Berkelanjutan*, Pusat Teknologi Pengembangan Sumber Daya Energi – Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Jakarta, 2015.
- [8]. Donni Taufiq. "Penciptaan Kondisi Keamanan Dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir: Sebuah Tinjauan Hukum". Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir 2014 – BAPETEN, Jakarta, Indonesia, Juni 2014, Hal. 60-63.
- [9]. Pasca. Nopember 2017. *BATAN Kuasai Teknologi Pengolahan Pemisahan Uranium dan Thorium*. Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- [10]. OECD. "Uranium 2016: Resources, Production and demand". A Joint Report by The NEA and IAEA, OECD 2016 NEA No. 7301, 2016, pp. 17.
- [11]. M. I. Pownceby, C. Johnson, "Geometallurgy of Australian Uranium Deposits". Ore Geology Reviews, Vol. 56, January 2014, Pages 25-44.
- [12]. Adi Gunawan Muhammad dan Bambang Soetopo, "Pemodelan dan Estimasi Sumber Daya Uranium di Sektor Lembah Hitam, Kalan, Kalimantan Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 37, No. 1, Mei 2016, Hal. 1-12.
- [13]. Adi Gunawan Muhammad, "Identifikasi dan Estimasi Kadar Mineralisasi Uranium Secara Kuantitatif Berdasarkan *Log Gross-Count Gamma Ray* Di Sektor Lemajung, Kalimantan Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 35, No. 2, November 2014, Hal. 101 – 116.
- [14]. D. Haryanto, Supriyanto, B. Soetopo, dan A.J. Karunianto, "Interpretasi Deposit Uranium Berdasarkan Data Tahanan Jenis Dan Polarisasi Terinduksi Di Sektor Rabau Hulu". Jurnal Eksplorium, Vol. 36, No. 2, November 2015, Hal 97-108.
- [15]. Sartapa, I.G. Sukadana, "Geologi dan Mineralisasi Uranium di Sektor Sarana Kalan, Kalimantan Barat Berdasarkan Data Pemboran". Jurnal Eksplorium, Vol. 32, No. 2, November 2011, Hal. 91-102.
- [16]. Priyo Sularto, "Korelasi Unsur Antara U Dengan Co, Ni, Ag, Mo Pada Batuan Granit Dan Kuarsit Di Jumbang I, Kalimantan Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 33, No. 1, Mei 2012, Hal. 63-72.

- [17]. Suharji, L. Subiantoro, H. Syaeful, K.S. Widana, H. Prabowo, "Studi Keberadaan Mineralisasi Uranium di Daerah Biak Numfor, Provinsi Papua Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 35, No. 2, November 2014, Hal. 117 – 130.
- [18]. Kurniawan Dwi Saksama dan Ngadenin, "Geologi Daerah Muntok dan Potensi Granit Menumbing Sebagai Sumber Uranium (U) Dan Thorium (Th)". Jurnal Eksplorium, Vol. 34, No. 2, November 2013, Hal. 137 – 149.
- [19]. K. Trinopiawan, R. Prassanti, Sumarni, R. Pudjianto, "Pemisahan Uranium dari Thorium Pada Monasit Dengan Metode Ekstraksi Pelarut Alamine". Jurnal Eksplorium, Vol. 32, No. 155, Mei 2011, Hal. 47 – 52.
- [20]. Ngadenin dan Adhika Junara Karunianto, "Identifikasi Keterdapatan Mineral Radioaktif Pada Granit Muncung Sebagai Tahap Awal Untuk Penilaian Prospek Uranium Dan Thorium Di Pulau Singkep". Jurnal Eksplorium, Vol. 37, No. 2, November 2016, Hal. 63 – 72.
- [21]. I Gde Sukadana dan Heri Syaeful, "Evaluasi Sistem Pengendapan Uranium Pada Batuan Sedimen Formasi Sibolga, Tapanuli Tengah". Jurnal Eksplorium, Vol. 37, No. 2, November 2016, Hal. 125 – 138.
- [22]. Ngadenin, "Geologi dan Potensi Terbentuknya Mineralisasi Uranium Tipe Batupasir Di Daerah Hatapang, Sumatera Utara", Jurnal Eksplorium, Vol. 34, No. 1, Mei 2013, Hal. 1 – 10.
- [23]. Ngadenin, "Geologi dan Potensi Terbentuknya Mineralisasi Uranium di Daerah Harau, Sumatera Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 34, No. 2, November 2013, Hal. 111–120.
- [24]. Ngadenin, I.G. Sukadana, A.G. Muhammad, Suripto, "Inventarisasi Potensi Sumber Daya Uranium Daerah Kawat, Mahakam Hulu, Kalimantan Timur Tahapan Prospeksi Detil". Jurnal Eksplorium, Vol. 32, No. 2, November 2011, Hal. 65–76.
- [25]. I Gde Sukadana, "Geologi dan Mineralisasi Uranium, Sektor Nyaan, Mahakam Hulu, Kalimantan Timur". Jurnal Eksplorium, Vol. 33, No. 2, November 2012, Hal. 129–145.
- [26]. R. Burhani. Nopember 2017. *BATAN akui uranium Mamuju dilirik dua negara*. Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- [27]. I.G. Sukadana, A. Harijoko, dan L.D. Setijadji, "Tataan Tektonika Batuan Gunung Api di Komplek Adang, Kabupaten Mamuju, Provinsi Sulawesi Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 36, No. 1, Mei 2015, Hal. 31–44.
- [28]. Ngadenin, "Kajian Geologi, Radiometri, dan Geokimia Granit Banggai dan Formasi Bobong Untuk Menentukan Daerah Potensial Uranium di Pulau Taliabu, Maluku Utara". Jurnal Eksplorium, Vol. 37, No. 1, Mei 2016, Hal. 13–26.
- [29]. Suharji, L. Subiantoro, H. Syaeful, K.S. Widana, H. Prabowo, "Studi Keberadaan Mineralisasi Uranium di Daerah Biak Numfor, Provinsi Papua Barat". Jurnal Eksplorium, Vol. 35, No. 2, November 2014, Hal. 117–130.
- [30]. A. Sumaryanto, "Synergy of Academic, Business, Government in Order to Accelerate Rare Earth Elements," unpublished.
- [31]. T. Nakamura, V.D.H. Dang, and K. Kotoh, "Study of Plutonium Recycling Scheme with Uranium Multi-Recycling System". Journal of Energy Procedia, Vol. 39, July 2013, Pages: 300 – 310. Ch. Poinssot, S. Bourg, N. Ouvrier, N. Combernoux, C. Rostaing, M. Vargas-Gonzalez, J. Bruno, "Assessment of The Environmental Footprint of Nuclear Energy Systems. Comparison between closed and open fuel cycles". Journal of Energy, Vol. 69, May 2014, pp.199–211. Ivaylo Naydenov dan Kalin Filipov, "LWR Fuel Cycles' Material and Isotopic Balance". BgNS TRANSACTIONS, Vol. 20, No. 1, June 2015, pp. 62–69. ____, "The Economics of the Nuclear Fuel Cycle," OECD-Nuclear Energy Agency, 1994.
- [32]. _____. (2017, August 2). *Nuclear Fuel Energy and CO₂ Balance Calculator-HELP* [Online]. Available: <http://www.wise-uranium.org/nfceh.html>
- [33]. _____. (2017, August 2). *Nuclear Fuel Material Balance Calculator* [Online]. Available: <http://www.wise-uranium.org/nfcm.html>