

ISBN 978-602-71166-1-0

# INDONESIA NUCLEAR ENERGY 2015 OUTLOOK

## PENYEDIAAN URANIUM UNTUK PLTN INDONESIA



batan

PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR  
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL



**INDONESIA NUCLEAR ENERGY OUTLOOK 2015**  
**Penyediaan Pasokan Uranium Untuk PLTN**

2015

*This publication is available on the web at:*  
[www.batan.go.id/pksen](http://www.batan.go.id/pksen)

**PUSAT KAJIAN SISTEM ENERGI NUKLIR**  
**BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**

*This report was prepared by Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional.*

# INDONESIA NUCLEAR ENERGY OUTLOOK 2015

## Penyediaan Pasokan Uranium Untuk PLTN

ISBN 978-602-71166-1-0

Diterbitkan oleh / *Published by*  
**Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir (PKSEN)**  
*Center for Nuclear Energy System*  
**Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)**  
*National Nuclear Energy Agency*  
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta 12710  
Telp : (021) 520 4243  
Fax : (021) 520 4243  
email : [pksen@batan.go.id](mailto:pksen@batan.go.id)

## SAMBUTAN



Dengan mengucap puji syukur ke hadirat Allah SWT, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang didukung oleh berbagai instansi dan organisasi yang kompeten dapat menerbitkan buku Outlook Energi Nuklir Indonesia (Indonesian Nuclear Energy Outlook, INEO) 2015. Secara umum buku INEO 2015 ini mengulas potensi sumber daya radioaktif khususnya uranium dan proyeksi kebutuhan dan pasokan untuk program PLTN dalam kurun 2014-2050. Hal ini penting untuk disampaikan karena banyak pertanyaan mengenai jaminan pasokan bahan bakar nuklir jika kita membangun PLTN.

Buku INEO ini juga menampilkan potensi dan eksplorasi yang sudah dan akan dilakukan oleh BATAN untuk mengetahui dan memetakan daerah mana saja yang punya potensi uranium. Selain itu juga disampaikan kemampuan penguasaan teknologi bahan bakar nuklir yang dipunyai BATAN. Penguasaan teknologi bahan bakar nuklir, dari hulu sampai hilir (eksplorasi sampai pabrikasi), akan meningkatkan kemandirian Indonesia dalam penguasaan energy nuklir.

Buku ini diharapkan dapat menjawab kekhawatiran berbagai pihak terhadap kemampuan dan jaminan pasokan bahan bakar nuklir untuk PLTN Indonesia. Kami berharap juga para pengambil keputusan dapat mempertimbangkan potensi dan kemampuan Indonesia ini sehingga dapat segera diwujudkan dalam kebijakan go nuclear.

Kami menyampaikan terimakasih dan penghargaan kepada tim penyusun serta semua pihak yang telah member dukungan dan bantuan sehingga buku ini bias diterbitkan.

Jakarta, 6 Nopember 2015

Kepala BATAN,

Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto

## FOREWORD



By delivering praises to Allah SWT, National Nuclear Energy Agency (BATAN) supported by various competent agencies and organizations has been able to publish this book, Indonesia's Nuclear Energy Outlook (INEO) 2015. In general, the INEO 2015 is to review the potential of radioactive resources, in particular uranium and its projected supply and demand for nuclear power programs in the period of 2014-2050. It is important to be presented because there are a lot of questions concerning guaranteed supply of nuclear fuel if we build nuclear power plants.

The book of INEO 2015 also describes the existing potential and exploration that have been and will be conducted by BATAN to identify and map potential areas containing uranium reserves. It also delivers the mastery of nuclear fuel technology by BATAN. Mastery of nuclear fuel technology, from upstream to downstream (exploration to manufacturing) will increase the independence of Indonesia in acquiring nuclear energy.

The book is expected to answer any concerns of various parties on the ability and assurance of supply of nuclear fuel for nuclear power plants in Indonesia. We also expect that the decision makers take into account Indonesia's potential and ability so that go-nuclear policy can be made.

We express our thanks and appreciation to the drafting team and all of those who have provided support and assistance so that this book could be published.

Jakarta, 6 November 2015

Head of BATAN,



Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto

## RINGKASAN EKSEKUTIF

Siklus bahan bakar nuklir dimulai dengan penambangan uranium dan berakhir dengan penyimpanan limbah nuklir. Pengolahan uranium untuk bahan bakar reaktor nuklir dilakukan melalui tahap penambangan dan penggilingan, konversi, pengayaan dan fabrikasi bahan bakar. Langkah-langkah ini membentuk ujung depan dari siklus bahan bakar nuklir.

Uranium adalah logam radioaktif lemah yang umumnya terbentuk di lapisan kerak bumi. Kelimpahan uranium sekitar 500 kali lebih besar daripada emas atau hampir sama dengan timah. Uranium ditemukan pada kebanyakan batuan dan tanah serta sedikit di sungai dan air laut. Sebagai contoh uranium ditemukan di granit yang membentuk sekitar 60% dari kerak bumi dengan konsentrasi sekitar 4 ppm (*parts per million*).

Uranium alam tidak dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir, sehingga diperlukan pengolahan tambahan. Hanya 0,7% dari uranium alam yang bersifat fisil atau mampu belah. Bahan fisil adalah bahan dimana inti atom berat dapat menjadi inti atom yang lebih ringan melalui rekasi inti dengan neutron disertai mengeluarkan energi. Agar dapat digunakan dalam PLTN kandungan Uranium perlu ditingkatkan menjadi sekitar 3,5% – 5%.

Sebuah PLTN yang berkapasitas 1.000 MWe berisi 200 perangkat bahan bakar yang tersusun sekitar 43.000 batang bahan bakar dan sekitar 16 juta pelet bahan bakar. PLTN dengan kapasitas 1.000 MWe akan menghasilkan listrik sekitar 7.800 GWh dalam setahun. Jika burn-up bahan bakar yang digunakan adalah 40 GWd/ton maka kebutuhan bahan bakar per tahun sekitar 24 ton. Burn-up bahan bakar nuklir merupakan nilai energi yang dihasilkan per satuan massa yang dinyatakan dalam satuan GWd/ton (giga watt day per ton).

Untuk mendapatkan 1 kg bahan bakar uranium siap pakai, diperlukan 8.9 kg uranium alam ( $U_3O_8$ ). Sedangkan untuk mendapatkan 1 kg uranium alam, dibutuhkan bijih uranium antara 100 sampai 10.000 kg, tergantung pada kadar konsentrasi uranium dalam bijih tersebut. Sebagai ilustrasi kebutuhan uranium untuk operasi tahunan reaktor tenaga nuklir 1.000 MWe dengan burn-up bahan bakar 40 GWd/ton, dibutuhkan sekitar 20.000 sampai 400.000 ton bijih uranium dari pertambangan.

Potensi total uranium teridentifikasi di seluruh dunia pada tahun 2013 sebesar 682.900 ton (untuk biaya <USD 40/kgU). Lima negara yang mempunyai sumber daya uranium teridentifikasi dengan biaya terbesar adalah Australia 29%, Kazahstan 12%, Rusia 9%, Kanada 8%, dan Nigeria

7%. Sumber daya uranium teridentifikasi di Indonesia sebesar 8.000 tU (0,1%). Nilai sumber-daya tersebut masih bisa ditingkatkan dengan melakukan re-evaluasi dan eksplorasi tambahan di semua wilayah Indonesia yang potensial. Selain itu perlu dilakukan studi kelayakan ekonomi terhadap proses penambangan uranium Indonesia.

Kebutuhan uranium terbesar di dunia berada di Amerika Utara dengan kebutuhan 24.865 ton uranium dan setelah itu Uni Eropa dengan kebutuhan 17.235 ton. Wilayah Asia Timur pada tahun 2013 memiliki total kapasitas PLTN 83 GWe dengan kebutuhan uranium sekitar 11.180 ton Uranium.

Sumber-daya uranium dengan kategori biaya <USD 40/ kgU diproyeksikan akan habis pada tahun 2020. Sumber-daya uranium biaya <USD 80/kgU diperkirakan habis tahun 2033, jika tidak ditemukan sumber baru. Sumber-daya uranium biaya <USD 130/ kgU diperkirakan habis pada tahun 2087. Sumber-daya uranium biaya <USD 260/ kgU diperkirakan habis pada tahun 2110.

Pada November 2009, IAEA menyetujui proposal Rusia untuk menciptakan bank bahan bakar LEU. Bank tersebut didirikan satu tahun kemudian dengan 123 ton UF<sub>6</sub> yang diperkaya 2,00% sampai 4,95% <sup>235</sup>U yang tersedia untuk semua anggota IAEA dengan menggunakan skema spot price. . Bank bahan bakar LEU akan menjadi cadangan bahan bakar untuk setiap negara yang ingin mengembangkan energi nuklir. Selain dengan Rusia, Kazahstan juga telah menandatangani pada tahun 2010.

Bank uranium yang dimiliki dan dikelola oleh IAEA berfungsi untuk membantu memastikan pasokan LEU sebagai bahan bakar 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 uranium IAEA tanpa mengganggu pasar komersial. Langkah ini tidak bermaksud untuk mengurangi hak suatu negara untuk mengadakan atau mengembangkan produksi bahan bakar nuklirnya sendiri.

Diproyeksikan PLTN pertama di Indonesia akan beroperasi pada tahun 2027 dengan berkapasitas 2x1.000 MWe, akan dibutuhkan sekitar 44 ton uranium diperkaya. Pada tahun 2050 dimana kapasitas total PLTN hampir mencapai 21 GWe, akan dibutuhkan sekitar 462 ton uranium diperkaya.

Untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar nuklirnya, Indonesia akan mengimpor bahan bakar uranium. Impor dalam bentuk perangkat bahan bakar siap pakai dilakukan selama Indonesia belum memiliki fasilitas fabrikasi. Impor ini akan berlangsung dari tahun 2027 sampai tahun 2040. Impor



dalam bentuk uranium diperkaya ( $UF_6$ ) dimulai pada tahun 2041, ketika fasilitas fabrikasi telah berproduksi.

Indonesia baru akan layak membangun fasilitas fabrikasi pada tahun 2041, ketika kebutuhan bahan bakar mencapai sekitar 220 ton yang setara dengan kapasitas PLTN 8–10 GWe. Pembangunan fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir akan meningkatkan kontribusi partisipasi nasional.

Biaya bahan bakar untuk pembangkitan adalah biaya penyediaan bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kWh. Biaya tersebut dapat dihitung berdasarkan rasio biaya total bahan bakar per tahun terhadap besarnya total energi listrik rata-rata yang dihasilkan pertahun. Nilai biaya bahan bakar untuk pembangkitan pada PLTN sekitar 10% dari biaya pembangkitan total. Biaya bahan bakar untuk pembangkitan PLTN yang pertama pada tahun 2027 sekitar 0,66 sen/kWh untuk skenario sedang atau 0,86 sen/kWh untuk skenario tinggi.

Selain uranium, thorium bisa menjadi bahan baku untuk pembuatan bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) masa depan. Thorium telah digunakan sebagai bahan bakar reaktor riset di India, Jerman, Inggris, Swedia, Norwegia, Swiss dan Amerika Serikat. Negara-negara tersebut sedang mengembangkan thorium agar dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN sebagai pengganti uranium sehingga thorium merupakan bahan yang bernilai sangat strategis.

Di Indonesia thorium terutama dijumpai dalam mineral monasit. Secara geologi daerah prospek monasit di Indonesia dikontrol oleh granit jalur timah yang membentang dari Thailand-Malaysia-Bangka Belitung-Kalimantan Barat. Eksplorasi thorium di Indonesia pada tahap penyelidikan umum telah dilakukan di Bangka Belitung dan Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat pada tahun 2009 sampai dengan 2014. Hasil survey dan kajian lain menyimpulkan bahwa penyebaran thorium juga terdapat di Sulawesi Barat (Mamuju) yang menjadi fokus eksplorasi saat ini, Sumatra, Kalimantan Tengah, Sulawesi Tengah dan Papua Barat. Jumlah total sumberdaya thorium di Indonesia sebesar 130.974 ton terdiri dari kategori terukur sejumlah 4.729 Ton Th dari Bangka Belitung dan sisanya merupakan Sumberdaya kategori Spekulatif.

Eksplorasi bijih Uranium dan Thorium di Indonesia saat ini belum dilaksanakan, karena belum adanya kebutuhan. Aktivitas terkait dengan potensi uranium di Indonesia masih dalam tahap eksplorasi oleh BATAN. Salah satu aktivitas eksplorasi BATAN berada di Kalan, Provinsi Kalimantan Barat. Kegiatan ini menghasilkan informasi bahwa sumber-daya uranium terdapat pada endapan metamorfik di cekungan Kalan, dan endapan plaser monasit di Ketapang. Selain kandungan uranium, monasit juga mengandung thorium dengan kadar yang cukup signifikan. Selain di Kalimantan

Barat juga dilaksanakan di beberapa tempat antara lain Mentawa, Kalimantan Tengah, Mahakam Hulu, Kalimantan Timur, Mamuju, Sulawesi Barat, Biak Numfor, Papua dan Bangka Belitung.

BATAN telah melaksanakan penelitian dan pengembangan (litbang) di bidang siklus bahan bakar nuklir. Salah satu tahap litbang yang pernah dilaksanakan adalah pembuatan  $UO_2$  dari yellowcake uranium. Litbang ini terdiri dari beberapa kegiatan seperti pembuatan serbuk halus  $UO_2$  dengan ukuran submikron yang memenuhi persyaratan kualitas, optimasi proses kompaksi serbuk  $UO_2$  dan sintering suhu rendah dalam pembuatan pelet dan pembuatan pelet  $UO_2$  bentuk annular. Selain itu juga mencakup pembuatan bahan struktur elemen bakar reaktor daya. Bahan struktur ini bersama sama dengan bahan bakar nuklir  $UO_2$  akan menjadi perangkat bahan bakar nuklir yang siap dipakai di reaktor nuklir.

Kegiatan perekayasa terkait litbang pembuatan bahan struktur antara lain perancangan tungku lebur untuk membuat paduan zirkonium (*zircalloy*) dan perancangan peralatan konversi dari ingot leburan Zircalloy menjadi produk bentuk batang/plat. Proses yang dilaksanakan adalah pembuatan bahan ZrC, pelapisan kelongsong Zry dengan ZrC dengan ketebalan dalam orde mikron, karakterisasi sifat mekanik dan mikrostruktur lapisan ZrC, serta pembuatan paduan dan komposit SiC.

Dari penguasaan teknologi, Indonesia telah menguasai dari hulu sampai hilir siklus bahan bakar nuklir, selain proses pengayaan tentunya. Ini menjadikan modal besar dalam pembangunan dan pengoperasian PLTN di Indonesia.

## **EXECUTIVE SUMMARY**

The nuclear fuel cycle starts with the mining of uranium and ends with the disposal of nuclear waste. Uranium processing for nuclear fuel cycle in a nuclear reactor is carried through several steps, i.e. mining and milling, conversion, enrichment, and fuel fabrication. These steps make up the 'front end' of the nuclear fuel cycle.

Uranium is a slightly radioactive metal that occurs throughout the Earth's crust. It is about 500 times more abundant than gold and about as much as tin. It is present in most rocks and soils, and in small amount in many rivers and in sea water. For example, uranium is found in granite, which is about 60% of the Earth's crust, with concentration of about four parts per million (ppm).

Natural uranium oxide cannot be used directly as a nuclear reactor fuel, and then an additional process is required. Only 0.7% of natural uranium is fissile, or capable of undergoing fission. Fissile material is a material in which a heavy nuclide becomes lighter nuclides through a nuclear reaction with neutron and followed by energy production. To be used in a nuclear power plant (NPP), the concentration of the fissile uranium-235 isotope needs to be increased to 3.5% –5%.

An NPP with capacity of 1000 MWe core may contain 200 fuel assemblies composed of over 43,000 fuel rods and about 16 million fuel pellets. This 1000-MWe NPP will generate electricity of about 7,800 GWh per annum. If the fuel burn-up is 40 GWd/ton, then the fuel demand is 24 ton. Nuclear fuel burn-up is the amount of energy produced per unit of mass expressed in GWd/ton (giga watt day per tonne).

To produce 1 kg of ready-to-used enriched uranium, about 8.9 kg of natural uranium ( $U_3O_8$ ) is needed. Meanwhile, to obtain 1 kg of natural uranium, approximately between 100 and 10,000 kg of uranium ore is required, depending on the concentration level of uranium in that ore. As an illustration of the need of uranium for the annual operation of a 1000 MWe nuclear power reactor with burnup 40 GWd/tonne, about 20,000 to 400,000 tonnes of uranium ore from mining is needed.

Total potential uranium identified worldwide in the year 2013 for the cost of < USD 40/kgU amounted to 682,900 tonnes. Five countries with the largest identified uranium resources are Australia 29%, Kazakhstan 12%, Russia 9%, Canada 8%, and Nigeria 7%. Identified uranium resource in Indonesia is amounted to 8,000 tU (0.1%). The figure of these resources can still be improved through a reevaluation and additional exploration in all parts of Indonesia that are potential. In addition, it is necessary to carry out an economic feasibility study of uranium mining in Indonesia.

The largest uranium demand is in North America as much as 24,865 tonnes of

uranium and the European Union needs 17,235 tonnes of uranium. East Asia in 2013 had total capacity of NPP as high as 83 GWe with uranium demand of about 11,180 tonnes

Uranium resource at a cost of <USD 40/kgU will be exhausted in 2020. Uranium resources at a cost of <USD 80/kgU will be exhausted in 2033. Uranium resources at a cost of <USD 130/kgU will be exhausted in the year 2087. Uranium resources at a cost of <USD 260/kgU will be exhausted in the year 2110.

In November 2009, the IAEA Board approved a Russian proposal to create an international fuel bank of LEU. This bank was established a year later and comprised 123 tonnes of LEU as UF<sub>6</sub>, enriched between 2.0% and 4.95% <sup>235</sup>U, available to any IAEA member state based on spot prices. This LEU nuclear fuel bank will be an LEU reserve for any state wishing to develop nuclear energy. In addition to have an agreement with Russia, IAEA also has an agreement with Kazakhstan in 2010.

This uranium bank owned and managed by IAEA serves to assist LEU fuel supply security of NPP. If an IAEA Member State's LEU supply to a nuclear power plant is disrupted, and the supply cannot be restored by the commercial market, government-to-government mechanism, or by any other mechanism, then this member state may call upon the IAEA LEU bank to secure its LEU supply, without distorting the commercial market. This initiative does not diminish in any way States' rights to establish or expand their own nuclear fuel production.

It is projected that the first NPP in Indonesia will be in operation in 2027 with 2 × 1000 MWe capacity. Therefore, about 44 tonnes of enriched uranium will be required. In 2050 when the NPP total capacity reaches almost 21 GWe, about 462 tonnes of enriched uranium will be needed.

In order to fulfill the nuclear fuel demand, Indonesia would import enriched uranium. The ready-to-use fuel assemblies will be imported as long as Indonesia has not had a nuclear fuel fabrication facility. This import will be carried out from 2027 to 2040. Import of enriched uranium (HF6) will be started in 2041 when a fuel fabrication facility will have been in production.

It will be feasible for Indonesia to construct a fuel fabrication facility in 2041 when the nuclear fuel demand reaches 220 tonnes, which is equivalent to NPP capacity of 8 – 10 GWe. The construction of a nuclear fuel fabrication plant will increase the contribution of national participation.

The fuel cost for electricity generation cost is the cost of fuel provision required to produce 1 kWh of electrical energy. Such costs can be calculated based on the ratio of total fuel cost per year to the total amount of average electrical energy produced per year. The fuel cost for electricity generation on NPP is about 10% of the total generation cost. The fuel cost for electricity generation is about 0.66 cents/KWh for moderate scenario or 0.86 cents/KWh for high scenario.

*In addition to uranium, thorium can be used as fuel for future NPP. Thorium has been used for research reactor fuel in India, Germany, England, Sweden, Norway, Switzerland, and United States. These countries have been developing thorium as NPP fuel to substitute uranium. Therefore, thorium has very strategic role.*

*In Indonesia, thorium is mainly found in monazite sand. Geologically, the prospect of monazite in Indonesia is controlled by granite of tin lane stretching from Thailand-Malaysia-Bangka Belitung-West Kalimantan. Thorium exploration in Indonesia is still in general investigation and is carried out in Bangka Belitung and Ketapang Regency, West Kalimantan in 2009 – 2014. The results of some surveys and studies indicate that thorium distribution is also found in West Sulawesi (Mamuju), which currently becomes the focus of exploration, Sumatera, Central Kalimantan, Central Sulawesi, and West Papua. The largest thorium reserve in Indonesia is 130,974 tonnes consisting of 4,729 tonnes thorium estimated in Bangka Belitung and the rest is speculative reserve.*

*Exploitation of uranium and thorium ores in Indonesia has not been performed recently, as there is no demand yet. The uranium potential related activities carried out in Indonesia is exploration by BATAN. BATAN's exploration activities take place in Kalan, West Kalimantan Province. This exploration activity identifies that uranium reserve is located in metamorphic sedimentation in Kalan basin, and monazite placer sedimentation in Ketapang. In addition to uranium reserve, monazite also contains sufficiently significant concentration. In addition to West Kalimantan, exploration is also conducted in other areas, such as Mentawa, Central Kalimantan, Mahakam Hulu, East Kalimantan, Mamuju, West Sulawesi, Biak Numfor, Papua, and Bangka Belitung.*

*BATAN has carried research and development (R&D) in nuclear fuel cycle. One phase of R&D carried out was UO<sub>2</sub> production from uranium yellow cake. This R&D consists of several activities such as UO<sub>2</sub> powder production in sub-micron size that meets quality requirement, optimization of UO<sub>2</sub> powder compaction process, and sintering at low temperature in annular UO<sub>2</sub> pellet production. In addition, the R&D activities also include the manufacture of structural material of power reactor fuel elements. This structural material together with UO<sub>2</sub> nuclear fuel will be assembled to produce nuclear fuel assembly that is ready for use in a nuclear reactor.*

*Engineering activities related to this R&D of material structural manufacture include the design of the melting furnace to make zirconium alloys and the design of conversion equipment of rod/plate products from Zircalloy ingots. The processes that have been undertaken are the manufacture of ZrC, coating of ZrY cladding with ZrC with micron-order thickness, characterization of mechanical properties and microstructure of ZrC layer, and manufacture of SiC alloys and composites.*

*From the technology development point of view, Indonesia has been able to acquire the technology of the upstream to downstream nuclear fuel cycle, with the exception of enrichment process, of course. It becomes significant capital in the development and operation of NPP in Indonesia.*

## **TIM PENYUSUN**

### ***AUTHORS***

#### **PENGARAH / *STEERING COMMITTEE***

Kepala BATAN / *Chairman of BATAN*

Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto

Deputi Bidang Teknologi Energi Nuklir / *Deputy for Nuclear Energy Technology*

Dr. TASWANDA TARYO, M.Sc. Eng.

#### **PENANGGUNGJAWAB / *PERSON IN CHARGE***

Kepala Pusat Kajian Sistem Energi Nuklir / *Head of Center for Nuclear Energy System*

Ir. Yarianto Sugeng Budi Susilo, M.Si.

#### **KOORDINATOR / *COORDINATOR***

Kepala Bidang Kajian Infrastruktur Sistem Energi Nuklir /

*Head of Nuclear Energy System Infrastructure Assessment Division*

Dr. Suparman

#### **TIM PENYUSUN / *AUTHORS***

Wiku Lulus Widodo, M. Eng.

Mochamad Nasrullah, S.E, M.Si.

Citra Candranurani, M.T.

Ir. Sriyana, M.T.

Ir. Edwaren Liun

Arief Tris Yuliyanto, M.T.

Ir. Moch. Djoko Birmano, M.Sc.

Nurlaila, S.T, M. Si.

Nuryanti, M.T.

Elok Satiti Amitayani, M.T.

Dra. Dharu Dewi, M. Si.

Rr. Arum Puni Rijanti S., S.T, M.T.

Drs. Sahala Maruli Lumbanraja

Imam Bastori, S.T.

Ewitha Nurulhuda, A. Md.

Sufiana Solihat, S.T.

Budi Briyatmoko, M. Eng.

Dede Sutarya, M.T.

Adi Gunawan Muhammad, M.T.

Riesna Prassanti, M.T.



**batan**

**NATIONAL NUCLEAR ENERGY AGENCY**



## DAFTAR ISI / TABLE OF CONTENTS

Sambutan	iii
<i>Foreword</i>	iv
Ringkasan Eksekutif	v
Tim Penyusun / <i>Authors</i>	ix
Daftar Isi / <i>Table Of Contents</i>	xi
Pendahuluan / <i>Introduction</i>	1
Siklus Bahan Bakar Nuklir / <i>The Nuclear Fuel Cycle</i>	3
Uranium / <i>Uranium</i>	5
Penambangan Uranium / <i>Uranium Mining</i>	7
Penggilingan Uranium / <i>Uranium Milling</i>	9
Konversi dan Pengkayaan / <i>Conversion and Enrichment</i>	11
Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir / <i>Nuclear Fuel Fabrication</i>	13
Produksi Serbuk UO <sub>2</sub> (Fabrikasi) / <i>UO<sub>2</sub> Powder Production</i>	15
Pembuatan Pelet UO <sub>2</sub> (Fabrikasi) / <i>Manufacture of UO<sub>2</sub> Pellets</i>	17
Perakitan Perangkat Bahan Bakar / <i>Manufacture Of The Fuel Assembly</i>	19
Berbagai Tipe Perangkat Bahan Bakar Nuklir / <i>Several Type Of Nuclear Fuel Assembly</i>	21
Perangkat Bahan Bakar PWR / <i>PWR Fuel Assembly</i>	23
Perangkat Bahan Bakar BWR / <i>BWR Fuel Assembly</i>	25
Perangkat Bahan Bakar PHWR / <i>PHWR Fuel Assembly</i>	27
Bahan Bakar Reaktor Suhu Tinggi / <i>High Temperature Reactor Fuel</i>	29
Burn Up Bahan Bakar Nuklir / <i>Fuel Burn Up</i>	31
Keseimbangan Material di Siklus Bahan Bakar Nuklir / <i>Material Balance in The Nuclear Fuel Cycle</i>	33
Potensi, Produksi dan Konsumsi Uranium Dunia / <i>Resources, Production and World Uranium Consumption</i>	35
Pertumbuhan Potensi Uranium / <i>Changes of Uranium Resources</i>	37
Potensi Uranium Teridentifikasi / <i>Identified Uranium Resources</i>	39
Produksi Uranium / <i>Uranium Production</i>	41

Kapasitas PLTN dan Kebutuhan Uranium Dunia / <i>World NPP Capacity and Uranium Requirements</i>	43
Perkembangan Harga Uranium dan Proyeksi Kemampuan Produksi Uranium Dunia / <i>Historical Uranium Price and The Projection Of World Uranium Capability Production</i>	45
Bank Bahan Bakar LEU / <i>LEU Fuel Bank</i>	47
Jaminan Pasokan Bahan Bakar Nuklir IAEA / <i>Assurance of Supply For IAEA Nuclear Fuel</i>	48
Proyeksi Penyediaan Uranium Untuk PLTN Indonesia Sampai Tahun 2050 / <i>Resources, Production And World Uranium Consumption</i>	49
Proyeksi Total Kapasitas PLTN / <i>Total NPP Capacity Projection</i>	51
Tahap Operasi PLTN / <i>Phase Of NPP Operation</i>	53
Pangsa Kapasitas PLTN / <i>NPP Capacity Share</i>	55
Kebutuhan Uranium / <i>Uranium Demand</i>	57
Kebutuhan Bijih Uranium / <i>Uranium Ore Demand</i>	59
Penyediaan Fasilitas Fabrikasi / <i>Construction of Fabrication Facility</i>	61
Proyeksi Impor Uranium / <i>Uranium Import Projection</i>	63
Proyeksi Biaya Impor Uranium / <i>Uranium Imports Cost Projection</i>	65
Proyeksi Biaya Bahan Bakar Untuk Pembangunan Listrik / <i>Fuel Cost Projection For Electricity Generation</i>	67
Thorium / <i>Thorium</i>	69
Sifat Fisik Thorium / <i>Physical Properties Thorium</i>	71
Reaksi Nuklir & Reaktor Thorium / <i>Reaction of Nuclear &amp; Reactor Thorium</i>	73
Potensi Thorium / <i>Thorium Resources</i>	75
Tingkat Kesiapan Teknologi Reaktor Thorium / <i>Technology Readiness Level of Thorium Reactor</i>	77
Aktivitas Eksplorasi dan Fabrikasi Oleh Batan / <i>Exploration and Fabrication Activities by Batan</i>	79
Kalan-Kalimantan Barat / <i>Kalan-West Kalimantan</i>	81
Mentawa-Kalimantan Tengah / <i>Mentawa-Central Kalimantan</i>	83
Mahakam Hulu-Kalimantan Timur / <i>Up-Stream Mahakam-East Kalimantan</i>	85
Mamuju-Sulawesi Barat / <i>Mamuju-West Sulawesi</i>	87
Biak Numfor-Papua Barat / <i>Biak Numfor-West Papua</i>	89

Bangka-Belitung / <i>Bangka-Belitung</i>	91
Litbang Pembuatan UO <sub>2</sub> dari Yellow Cake / <i>R&amp;D to Make UO<sub>2</sub> From Yellow Cake</i>	93
Litbang Pembuatan Bahan Struktur Elemen Bakar Reaktor Daya / <i>R&amp;D on Structural Material of Power Reactor Fuel Element</i>	95
Litbang Fabrikasi Bahan Bakar Untuk Sistem Energi Nuklir Inovatif / <i>R&amp;D on Fuel Fabrication For Innovative Nuclear Energy System</i>	97
Litbang Pembuatan Bahan Bakar Densitas Tinggi Untuk Reaktor Riset / <i>R&amp;D on Making a High Density Fuel For Research Reactor</i>	98
Litbang Fabrikasi Bahan Bakar Untuk Reaktor Suhu Tinggi / <i>R&amp;D of Fuel Fabrication For High Temperature Reactor</i>	99
Definisi / <i>Definition</i>	100
Daftar Pustaka / <i>References</i>	106





# **PENDAHULUAN**

## *INTRODUCTION*

# SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR THE NUCLEAR FUEL CYCLE



## SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR

Siklus bahan bakar nuklir adalah rangkaian proses industri yang salah satunya adalah membangkitkan energi listrik dari uranium di suatu reaktor nuklir. Uranium adalah unsur alam yang relatif umum ditemukan di seluruh dunia. Uranium ditambang di sejumlah negara dan diproses sebelum dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk reaktor nuklir.

Siklus bahan bakar nuklir dimulai dengan penambangan uranium dan berakhir dengan penyimpanan limbah nuklir. Pengolahan uranium untuk bahan bakar reaktor nuklir dilakukan melalui tahap penambangan dan penggilingan, konversi, pengayaan dan fabrikasi bahan bakar. Langkah-langkah ini membentuk ujung depan dari siklus bahan bakar nuklir.

Bahan bakar yang mengandung uranium ditempatkan dalam reaktor sekitar tiga tahun untuk menghasilkan listrik. Bahan bakar yang telah digunakan disebut bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas tersebut akan menjalani serangkaian pengelolaan lebih lanjut seperti penyimpanan sementara, olah ulang, dan daur ulang limbah sebelum disimpan. Tahap ini disebut ujung belakang dari siklus bahan bakar.

## THE NUCLEAR FUEL CYCLE

*Nuclear fuel cycle is a series of industrial processes, one of which is to generate electricity from uranium in a nuclear power reactor.. Uranium is a relatively common element that is found throughout the world. It is mined in a number of countries and must be processed before it can be used as fuel for a nuclear reactor.*

*The nuclear fuel cycle starts with the mining of uranium and ends with the disposal of nuclear waste. To prepare uranium for use in a nuclear reactor, there are several steps to be carried out, such as mining and milling, conversion, enrichment and fuel fabrication. These steps make up the 'front end' of the nuclear fuel cycle.*

*The fuel containing uranium is burned for about three years in a reactor to produce electricity. The fuel that has been used is called spent fuel. This spent fuel may undergo a further series of steps including temporary storage, reprocessing, and recycling before final disposal. Collectively these steps are known as the 'back end' of the fuel cycle.*

# URANIUM

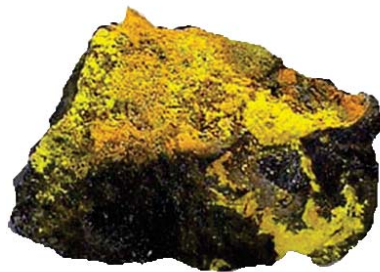
## URANIUM



Uranium, U-238

Titik lebur / *Melting point* : 1132,2 °C

Titik didih / *Boiling point* : 4131 °C



Isotop paling stabil

iso	NA	WAKTU PARO	DM	DE (MeV)	DP
<sup>232</sup> U	syn	68,9 thn	SF		—
			α	5,414	<sup>228</sup> Th
<sup>233</sup> U	syn	159.200 thn	SF	197,93 <sup>[2]</sup>	—
			α	4,909	<sup>229</sup> Th
<sup>234</sup> U	0,0054%	245.500 thn	SF	197,78	—
			α	4,859	<sup>230</sup> Th
<sup>235</sup> U	0,7204%	7.038×10 <sup>8</sup> thn	SF	202,48	—
			α	4,679	<sup>231</sup> Th
<sup>236</sup> U	Kelumit	2,342×10 <sup>7</sup> thn	SF	201,82	—
			α	4,572	<sup>232</sup> Th
<sup>238</sup> U	99,2742%	4,468×10 <sup>9</sup> thn	α	4,270	<sup>234</sup> Th
			SF	205,87	—
			ββ		



## URANIUM

Uranium adalah logam radioaktif lemah yang umumnya terbentuk di lapisan kerak bumi. Kelimpahan uranium sekitar 500 kali lebih besar daripada emas atau hampir sama dengan timah. Uranium ditemukan pada kebanyakan batuan dan tanah serta sedikit di sungai dan air laut. Sebagai contoh uranium ditemukan di granit - yang membentuk sekitar 60% dari kerak bumi - dengan konsentrasi sekitar 4 ppm (*parts per million*).

Di dalam bongkahan, konsentrasi uranium dapat mencapai 400 ppm (0,04%), sedangkan di antara deposit batubara terdapat kandungan uranium dengan konsentrasi lebih dari 100 ppm (0,01%). Sebagian besar radioaktivitas yang ada bersamaan dengan konsentrat uranium di alam sebenarnya berasal dari hasil peluruhan radioaktif mineral lainnya.

Sejumlah wilayah di dunia mengandung uranium dengan konsentrasi tinggi sehingga layak ditambang untuk bahan bakar nuklir. Bongkahan-bongkahan yang mengandung uranium dengan konsentrat tinggi disebut bijih uranium.

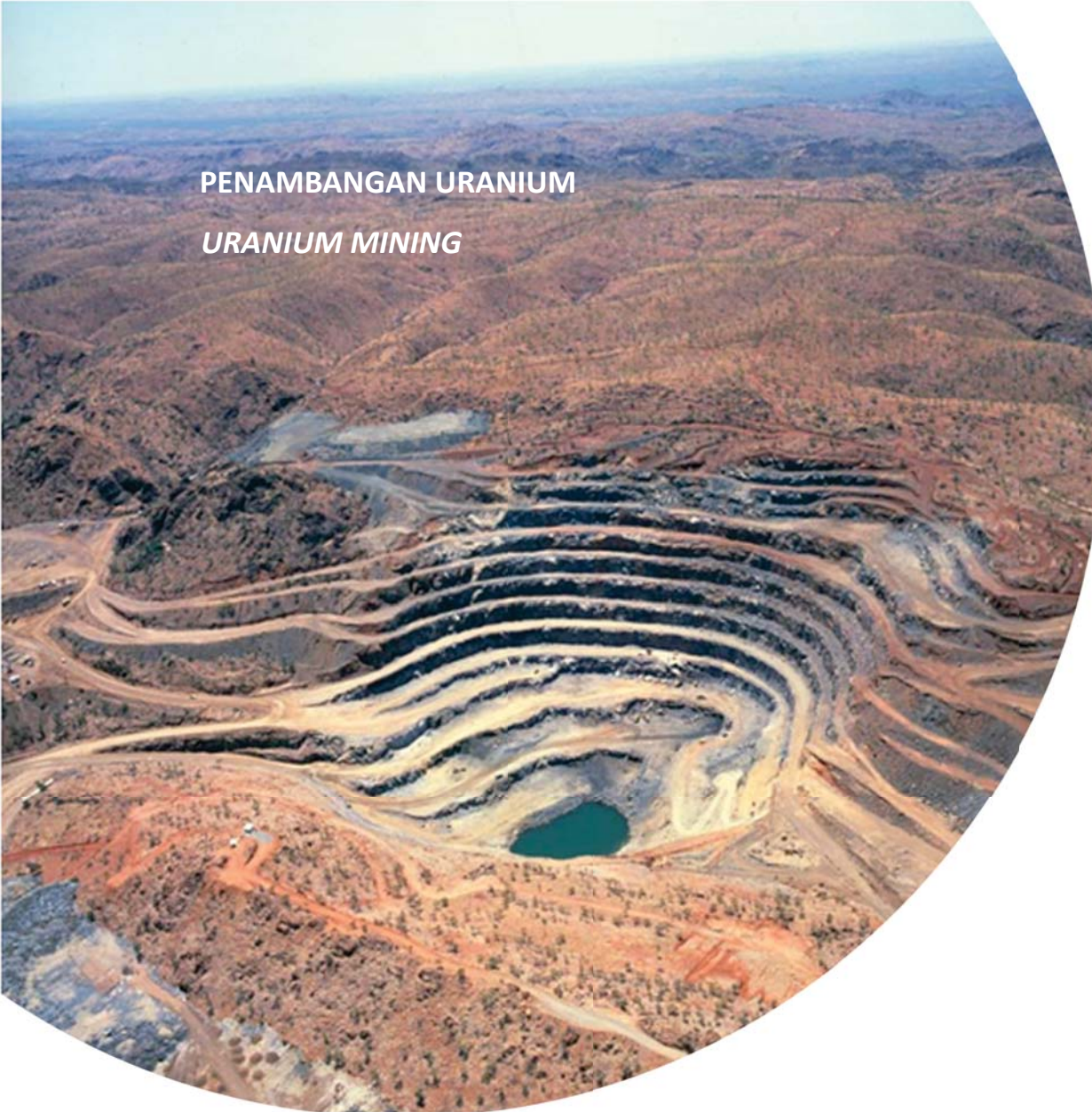
## URANIUM

*Uranium is a slightly radioactive metal that occurs throughout the Earth's crust. It is about 500 times more abundant than gold and about as much as tin. It is present in most rocks and soils as well as in many rivers and in sea water. It is, for example, found in concentrations of about four parts per million (ppm) in granite, which makes up 60% of the Earth's crust.*

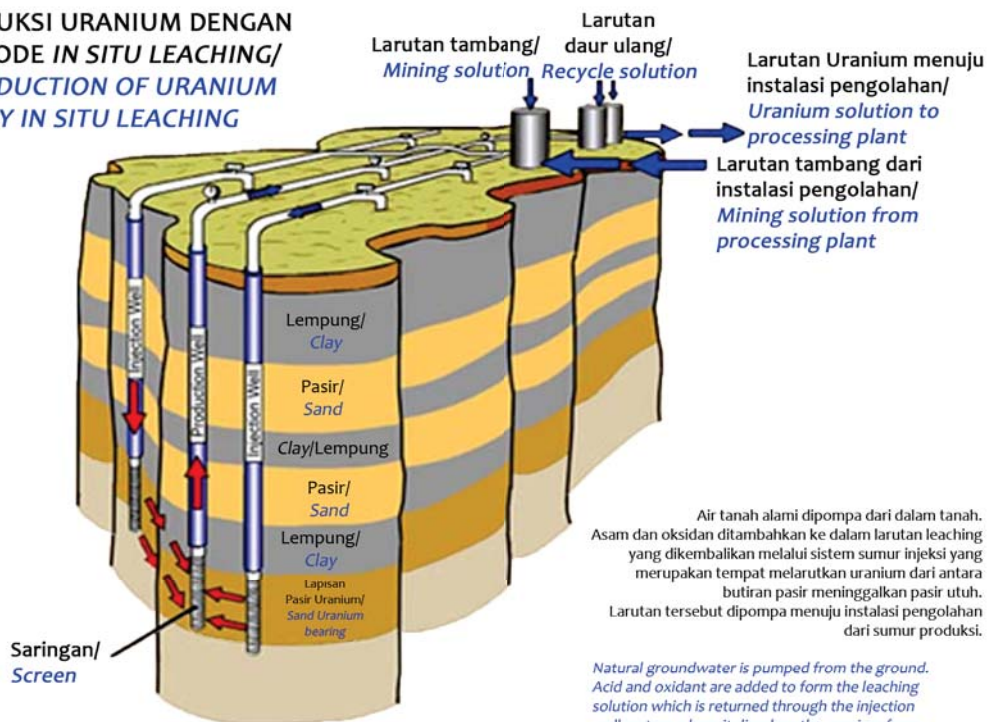
*In bulk, uranium concentration can be as high as 400 ppm (0.04%), and some coal deposits contain uranium at concentrations greater than 100 ppm (0.01%). Most of the radioactivity associated with uranium in nature is in fact originated from radioactive decay of other minerals.*

*There are a number of areas around the world where the concentration of uranium in the ground is so high that extraction of it for use as nuclear fuel is economically feasible. Such bulks which contain high concentration of uranium are called uranium ores.*

**PENAMBANGAN URANIUM**  
**URANIUM MINING**



**PRODUKSI URANIUM DENGAN METODE IN SITU LEACHING/ PRODUCTION OF URANIUM BY IN SITU LEACHING**



Air tanah alami dipompa dari dalam tanah. Asam dan oksidan ditambahkan ke dalam larutan leaching yang dikembalikan melalui sistem sumur injeksi yang merupakan tempat melarutkan uranium dari antara butiran pasir meninggalkan pasir utuh. Larutan tersebut dipompa menuju instalasi pengolahan dari sumur produksi.

Natural groundwater is pumped from the ground. Acid and oxidant are added to form the leaching solution which is returned through the injection well system where it dissolves the uranium from between the sand grains leaving the sand intact. The pregnant solution is pumped to the processing plant from the production wells.

## **PENAMBANGAN URANIUM**

Metode penggalian dan teknik in-situ merupakan metode yang paling banyak digunakan untuk mengambil bijih uranium. Penggalian dimungkinkan pada tambang bawah tanah dan tambang terbuka. Penambangan terbuka dilakukan jika kandungan uranium berada dekat dengan permukaan tanah, sedangkan penambangan bawah tanah dilakukan pada kedalaman lebih dari 120 meter.

Penambangan terbuka memerlukan lubang besar pada permukaan tanah, bahkan jauh lebih besar dari area yang mengandung bijih uranium. Penambangan uranium bawah tanah hanya memerlukan luas permukaan yang kecil dan cukup menyingkirkan material lain untuk mendapatkan bijih uranium.

Sebagian besar metode penambangan uranium di dunia menggunakan metode *in-situ leach* (ISL). Metode ini menggunakan air tanah berkadar oksigen tinggi yang disemurkan ke pori-pori bijih uranium untuk melarutkannya dan membawanya ke permukaan. Keputusan mengenai metode penambangan uranium tergantung pada kondisi bijih uranium, keamanan penambangan, dan pertimbangan ekonomi.

## **URANIUM MINING**

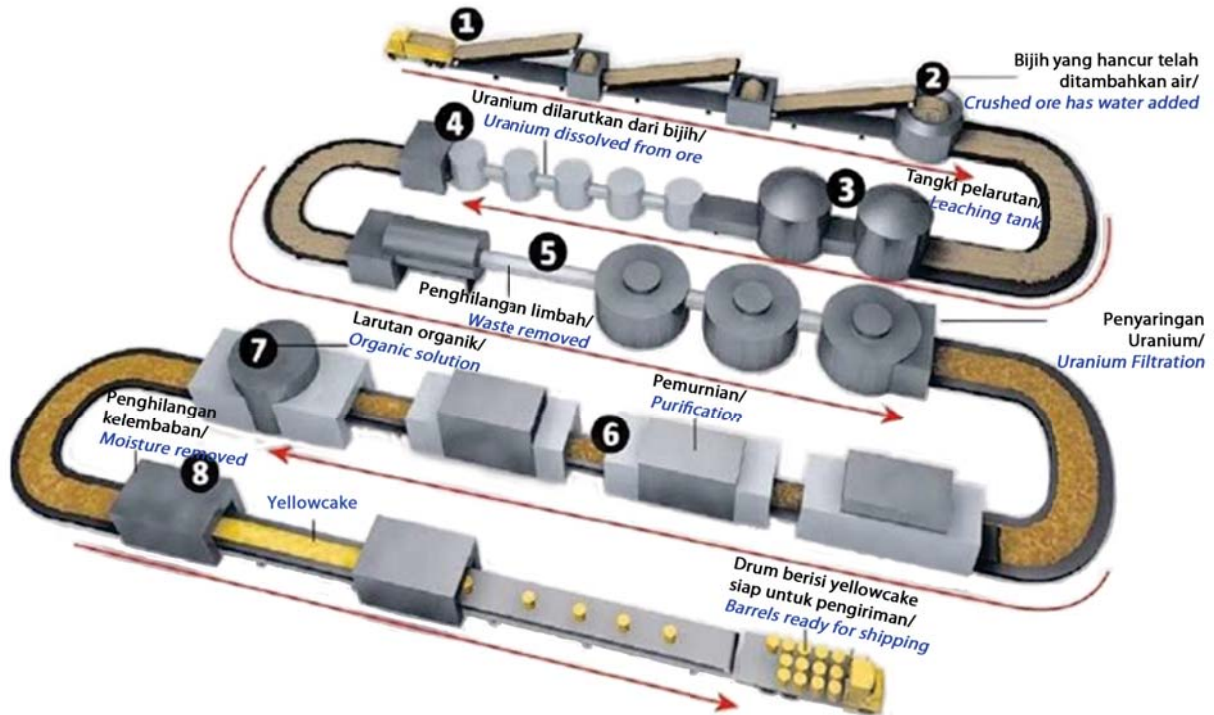
*Both excavation and in situ techniques are mostly used to recover uranium ores. Excavation is possible for underground and open pit mining. Open pit mining is used where deposits are close to the surface, while underground mining is carried out for deep deposits greater than 120 m deep.*

*Open pit mining require large holes on the surface, much larger than the areas containing uranium ores. Underground mining has relatively small areas and removal of some other materials is enough to obtain uranium ores.*

*Most uranium minings in the world employ in-situ leach (ISL) method. This method uses highly oxygenated groundwater ejected to pores of uranium ores to dissolve and bring it to the surface. The decision as to which mining method to be used for a particular deposit is governed by the nature of the ores, safety, and economic consideration.*

## PENGGILINGAN URANIUM

### URANIUM MILLING



1. Bijih Uranium yang dihancurkan / *Mined ore is crushed*
2. Bijih yang hancur dihaluskan menjadi pasir halus / *Crushed ore ground into fine sand*
3. Bubur (*slurry*) dipompa ke tangki pelarutan / *Slurry pumped into leach tanks*
4. Asam melarutkan Uranium / *Acid dissolves Uranium*
5. Uranium disaring dari limbah / *Uranium filtered from waste*
6. Dimurnikan & Dipekatkan / *Purified & Concentrated*
7. Ekstraksi Uranium / *Uranium extraction*
8. Menghilangkan kelembaban / *Moisture Removed*

## **PENGGILINGAN URANIUM**

Proses penggilingan, yang umumnya berada dekat dengan tambang uranium, akan mengekstrak uranium dari bijih. Satu pabrik penggilingan terkadang dapat mengolah bijih uranium dari beberapa lokasi tambang uranium. Proses penggilingan menghasilkan konsentrat uranium oksida  $U_3O_8$  yang lebih dikenal dengan *yellow cake*. Konsentrat *yellow cake* ini mengandung uranium lebih dari 80%.

Bijih uranium dihancurkan dan dihaluskan hingga berbentuk bubuk halus, kemudian dimasukkan dalam larutan asam sulfat (atau kadang-kadang larutan alkali kuat) untuk membersihkan uranium dari batuan sisa. Setelah proses pemisahan, uranium diendapkan dalam bentuk konsentrat oksida uranium ( $U_3O_8$ ). Setelah melalui proses pengeringan dan pemanasan, konsentrat *yellow cake* dikemas dalam drum dengan ukuran 200 liter.

Konsentrat *yellow cake* ( $U_3O_8$ ) adalah produk uranium yang siap dijual. Sekitar 200 ton konsentrat *yellow cake* diperlukan untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan kapasitas 1.000 MWe selama satu tahun. Limbah bijih dari pabrik penggilingan bersifat radioaktif.

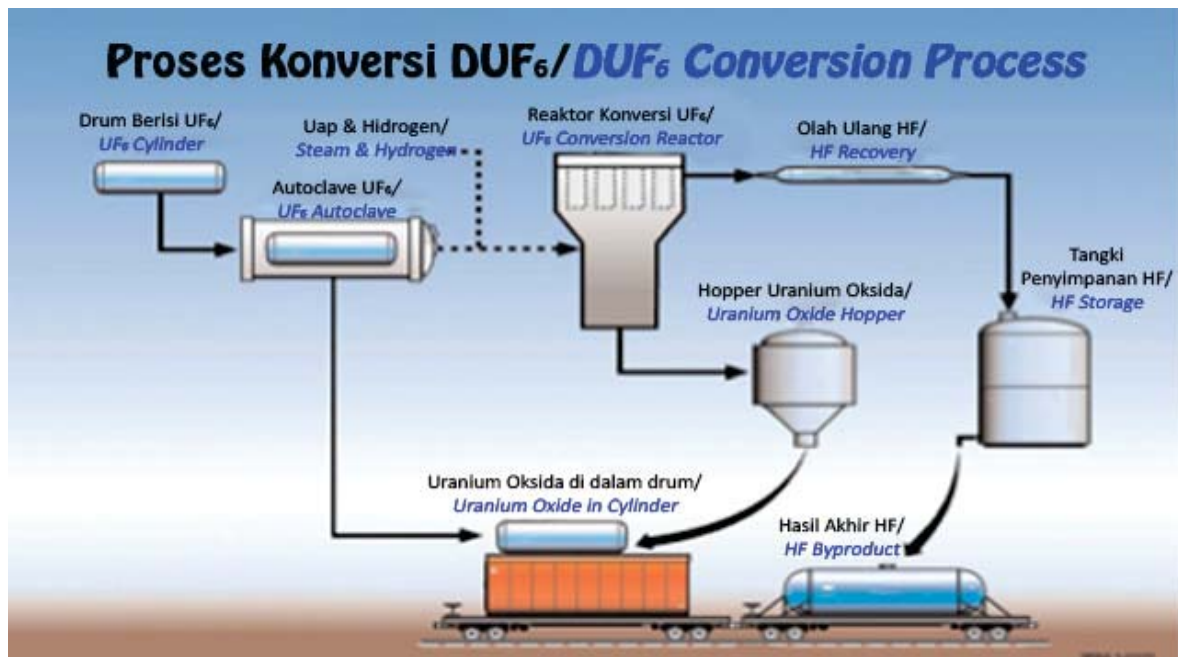
## **URANIUM MILLING**

*Milling, which is generally carried out close to a uranium mine, is applied to extract uranium from the ore. One milling facility may sometimes process the ore from several uranium mines. Milling produces uranium oxide  $U_3O_8$  concentrate, which is called 'yellowcake'. This concentrate generally contains more than 80% uranium.*

*The ore is crushed and ground to a fine slurry, which is then leached in sulfuric acid (or sometimes a strong alkaline solution) to allow the separation of uranium from the residual rock. After this separation process, uranium is precipitated as uranium oxide ( $U_3O_8$ ) concentrate. Following the drying and heating processes, yellow cake concentrate is packed in 200-litre drums.*

*$U_3O_8$  concentrate is a uranium product, which is ready for sale. About 200 tonnes of yellow cake concentrate is required to meet the fuel demand of a 1000-MWe nuclear power plant for one year. The waste generated by the mill is radioactive.*

KONVERSI DAN PENGKAYAAN  
CONVERSION AND ENRICHMENT



Fasilitas Konversi/  
*Konversion Facilities*

Fasilitas Pengkayaan/  
*Enrichment Facilities*



## KONVERSI DAN PENGKAYAAN

Produk uranium oksida tidak dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir, sehingga diperlukan pengolahan tambahan. Hanya 0,7% dari uranium alam yang bersifat fisil atau mampu belah. Bahan fisil adalah bahan dimana inti atom berat dapat menjadi inti atom yang lebih ringan melalui reaksi inti dengan neutron disertai mengeluarkan energi. Uranium yang bersifat fisil adalah isotop uranium-235 ( $^{235}\text{U}$ ). Isotop uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ), yang bersifat fertil, merupakan kandungan terbanyak dalam *yellow cake*.

Pada fasilitas konversi, uranium oksida pertama kali diperbaiki kualitasnya menjadi uranium dioksida agar dapat digunakan untuk jenis reaktor nuklir yang tidak memerlukan uranium diperkaya. Sebagian besar uranium dioksida kemudian diubah menjadi uranium hexafluorida ( $\text{UF}_6$ ) yang siap diperkaya.

Pada sebagian besar reaktor nuklir, konsentrasi isotop uranium-235 perlu ditingkatkan, dari sekitar 0,7% menjadi sekitar 3,5% – 5%. Pemisahan isotop adalah proses fisik untuk memperkaya kandungan isotop uranium-235. Proses pengayaan membutuhkan uranium dalam bentuk gas. Oleh karena itu konsentrat uranium oksida dikonversi ke uranium hexafluorida, yang berupa gas pada suhu relatif rendah.

## CONVERSION AND ENRICHMENT

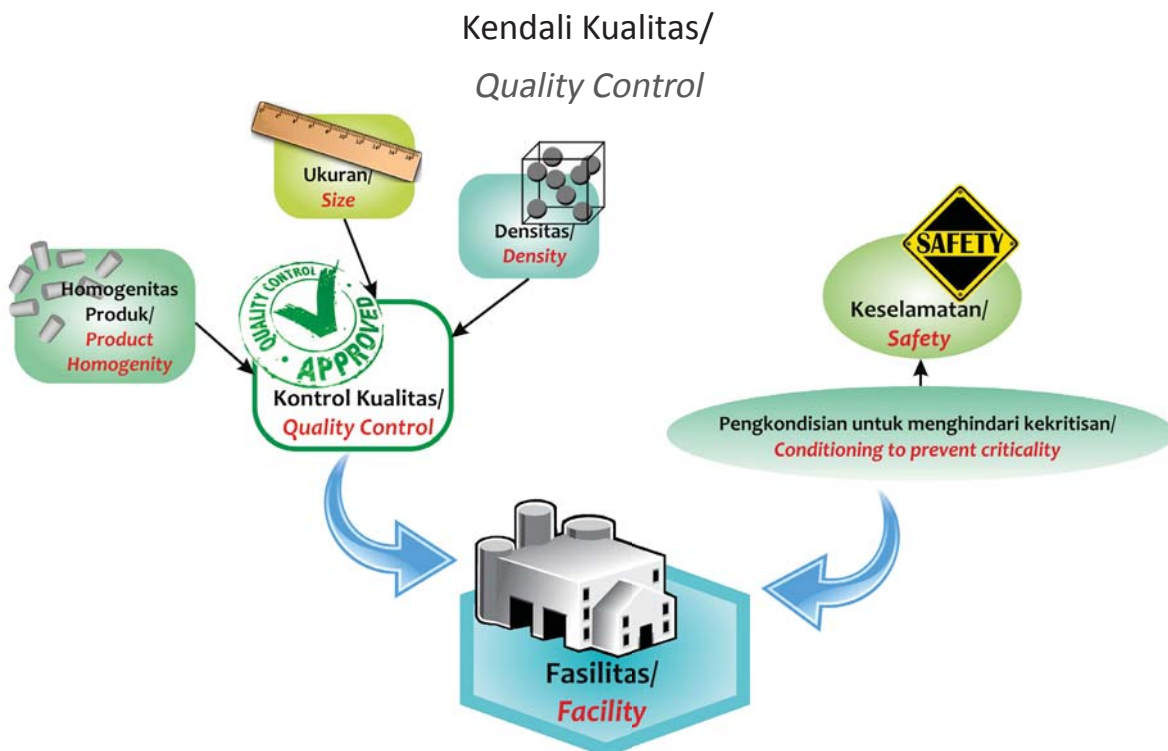
*The uranium oxide, produced from a uranium mill, cannot be used directly as a fuel for a nuclear reactor and an additional process is required. Only 0.7% of natural uranium is fissile, or capable of undergoing fission, a process by which a heavy nuclide becomes lighter nuclides by producing energy. Uranium isotope that is fissile is uranium-235 ( $^{235}\text{U}$ ). Uranium-238 ( $^{238}\text{U}$ ) isotope, which is fertile, is major isotope in yellow cake.*

*At a conversion facility, the uranium oxide is first refined to uranium dioxide, which can be used as the fuel for those types of reactors that do not require enriched uranium. Most uranium dioxide is then converted into uranium hexafluoride ( $\text{UF}_6$ ), which is ready for enrichment.*

*For most nuclear reactors, the concentration of the fissile uranium-235 isotope needs to be increased, from about 0.7% to between 3.5% and 5%. Isotope separation is a physical process to enrich uranium-235 concentration. The enrichment process requires the uranium to be in a gaseous form. The uranium oxide concentrate is therefore converted to uranium hexafluoride, which is gaseous at relatively low temperatures.*

# FABRIKASI BAHAN BAKAR NUKLIR

## NUCLEAR FUEL FABRICATION





## FABRIKASI BAHAN BAKAR NUKLIR

Fabrikasi bahan bakar adalah tahap terakhir dari ujung depan siklus bahan bakar nuklir. Terdapat tiga tahap utama dalam pembuatan perangkat bahan bakar nuklir yang digunakan dalam LWR (Light Water Reactors) dan PHWR (Pressurized Heavy Water Reactors) yaitu :

1. Memproduksi uranium dioksida murni ( $UO_2$ ) dari gas  $UF_6$  atau bahan  $UO_3$ .
2. Memproduksi pelet  $UO_2$  berbentuk keramik dengan kepadatan tinggi dan akurat.
3. Memproduksi perangkat bahan bakar berbahan dasar paduan zirkonium (*zirconium-alloy*); memuat bahan bakar pelet ke dalam batang bahan bakar dan merakit batang ke dalam perangkat bahan bakar nuklir.

Uranium diperkaya yang sedang di proses pada fasilitas fabrikasi dikondisikan pada lingkungan tertentu dengan kadar uranium tertentu untuk menjaga agar tidak mencapai kekritisasi (reaksi fisi nuklir yang berkelanjutan). Walaupun probabilitas kekritisasi sangat kecil, pengaturan kondisi uranium merupakan pertimbangan penting pada fasilitas fabrikasi uranium.

## NUCLEAR FUEL FABRICATION

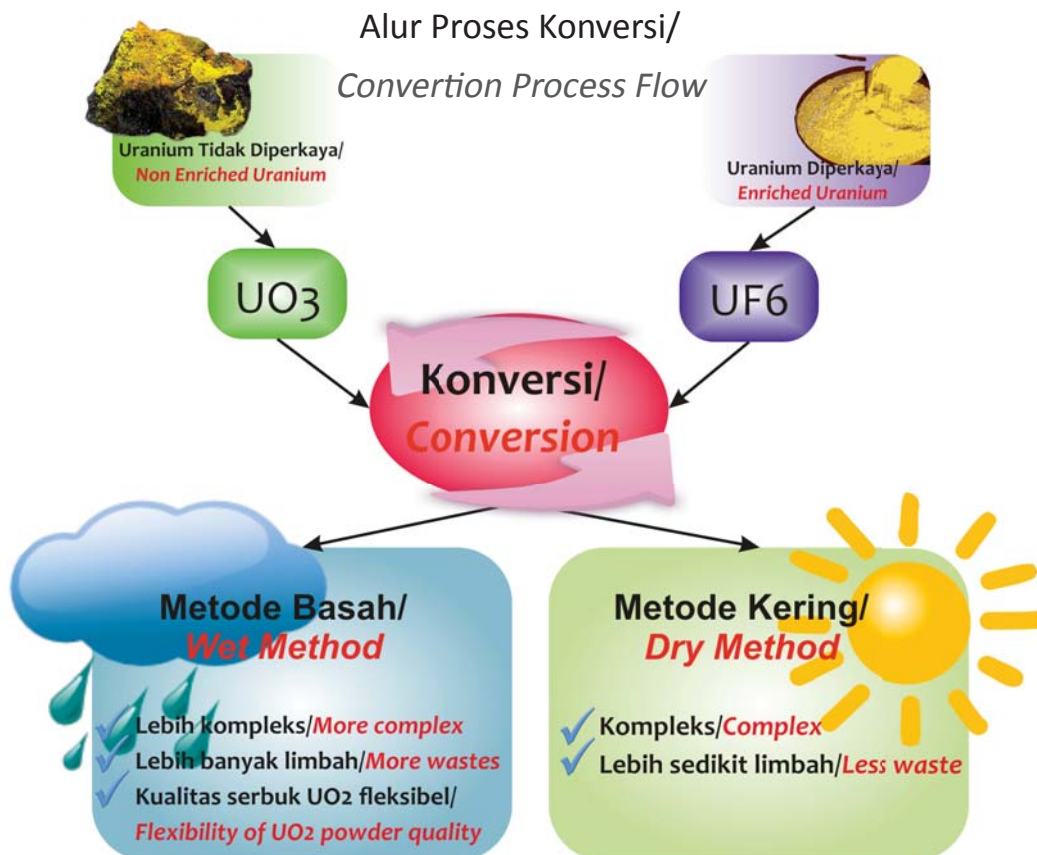
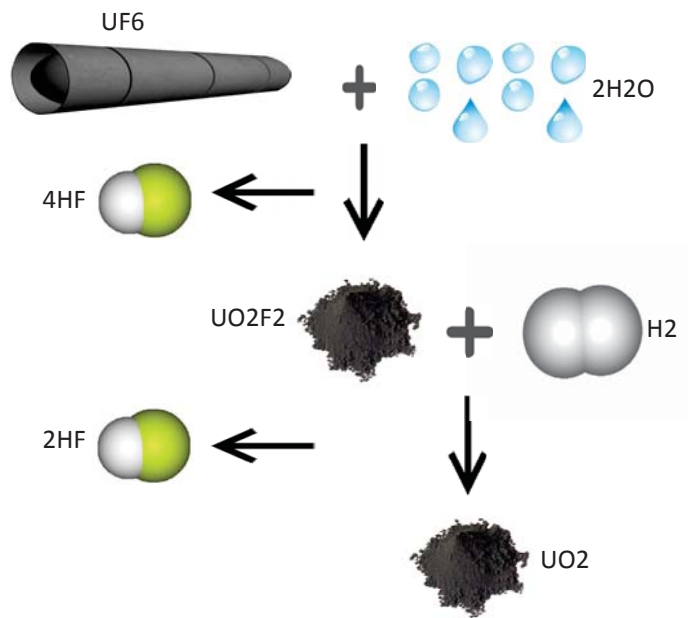
*Nuclear fuel fabrication is the final step in front-end nuclear fuel cycle. There are three main stages in the fabrication of the nuclear fuel assembly used in LWRs and PHWRs:*

1. *Production of pure uranium dioxide ( $UO_2$ ) from incoming  $UF_6$  or  $UO_3$ .*
2. *Production of high-density, accurately shaped ceramic  $UO_2$  pellets.*
3. *Production of zirconium-alloy based fuel element; and loading the fuel pellets into the fuel rods, sealing them and assembling the rods into the final fuel assembly structure.*

*Enriched uranium, which is being processed in the fabrication facility, is conditioned on a certain environment with a specific amount of uranium levels to prevent criticality (sustained nuclear fission reaction) from occurring. Although the possibility of criticality is very small, the conditioning of uranium is an important consideration in the uranium fabrication facility.*

# PRODUKSI SERBUK UO<sub>2</sub>

## UO<sub>2</sub> POWDER PRODUCTION



## PRODUKSI SERBUK $UO_2$

Uranium yang sampai di pabrik bahan bakar berupa uranium hexafluoride ( $UF_6$ ) atau uranium trioksida ( $UO_3$ ), tergantung apakah uranium telah diperkaya atau tidak. Uranium ini perlu dikonversi ke uranium dioksida ( $UO_2$ ) sebelum dibuat pelet.

Konversi ke  $UO_2$  dapat dilakukan dengan menggunakan proses 'kering' atau 'basah'. Dalam metode kering,  $UF_6$  dipanaskan dengan uap dan diproses agar menjadi serbuk, lalu direaksikan dengan gas hidrogen untuk menghilangkan kandungan fluorida. Uranium yang telah dibersihkan dari fluorida akan beroksidasi menjadi  $UO_2$ .

Metode basah dilakukan dengan cara melarutkan  $UF_6$  ke dalam air untuk membentuk partikulat  $UO_2F_2$ . Proses berikutnya adalah membersihkan fluorida dari partikulat dengan gas hidrogen sehingga terbentuk  $UO_2$ . Metode basah sedikit lebih kompleks dan menghasilkan lebih banyak limbah dari pada metode kering, namun memiliki keuntungan dalam hal fleksibilitas kualitas serbuk  $UO_2$ . Dewasa ini, metode basah merupakan metode yang paling banyak digunakan oleh fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir di dunia.

## $UO_2$ POWDER PRODUCTION

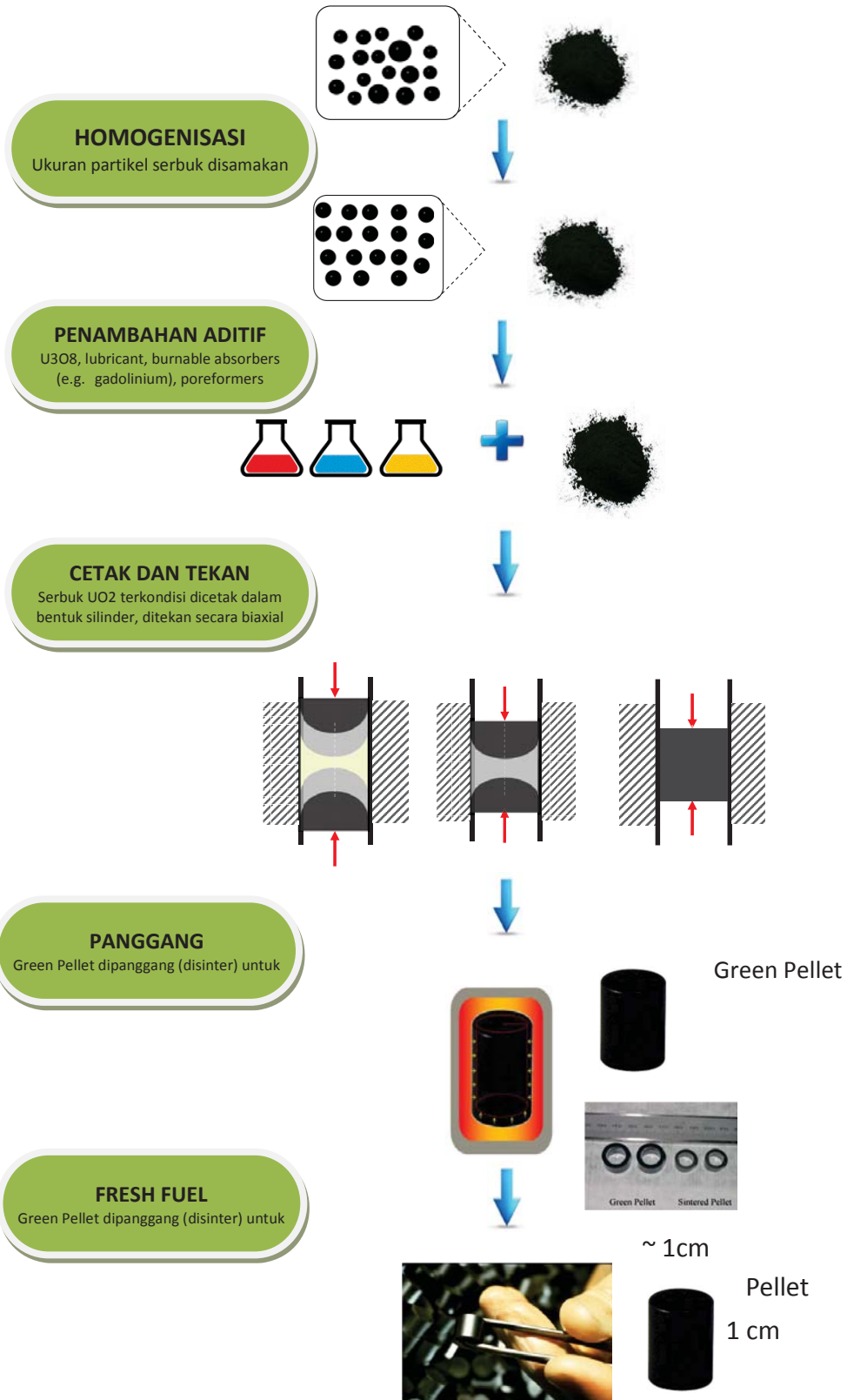
*Uranium entering a fuel manufacturing plant is in form of uranium hexafluoride ( $UF_6$ ) or uranium trioxide ( $UO_3$ ), depending on whether it has been enriched or not. It needs to be converted to uranium dioxide ( $UO_2$ ) prior to pellet production.*

*Conversion to  $UO_2$  can be done using 'dry' or 'wet' processes. In the dry method,  $UF_6$  is heated by a vapour and processed to become powder, and then reacted with hydrogen gas to remove fluoride content. Fluoride-free uranium will be oxidated to be  $UO_2$ .*

*Wet method is carried out by dissolving  $UF_6$  into water to form a  $UO_2F_2$  particulate slurry. The next process is removing particulates from fluoride using hydrogen gas to form  $UO_2$ . Wet method is slightly more complex and generates more wastes than dry method, but it has advantages in term of flexibility of  $UO_2$  powder quality. Nowadays, wet method is mostly used by nuclear fuel fabrication facilities in the world.*

# PEMBUATAN PELET $UO_2$ (FABRIKASI)

## MANUFACTURE OF $UO_2$ PELLETS



## PEMBUATAN PELET UO<sub>2</sub>

Sebelum dibentuk menjadi pellet, serbuk UO<sub>2</sub> perlu menjalani proses homogenisasi untuk membentuk keseragaman partikelnya. Beberapa bahan lain ditambahkan untuk meningkatkan densitas atau menurunkan poripori pelet.

Serbuk UO<sub>2</sub> dicetak menjadi pelet yang berbentuk silindris dengan tekanan beberapa ratus MPa di dalam tungku bersuhu 1.750 °C. Proses ini akan sedikit mengurangi volume pelet. Dengan kontrol kualitas yang ketat, ukuran pelet yang sesuai dengan spesifikasi akan dihasilkan.

Ukuran pelet yang digunakan di reaktor pada umumnya berdiameter kurang dari satu sentimeter dan panjang satu sentimeter lebih sedikit. Sebuah pelet bahan bakar nuklir seberat 10 gram akan menghasilkan energi setara dengan satu ton batubara.

Pelet yang diproduksi untuk reaktor air ringan (*Pressurized Water Reactor* dan *Boiling Water Reactor*) pada umumnya memiliki ukuran panjang sekitar 1 cm dan diameter hampir 1 cm. Pelet ini disusun memanjang dengan menggunakan kelongsong bahan bakar dan dinamakan batang bahan bakar (*fuel rod*). Batang bahan bakar dirakit menjadi perangkat bahan bakar.

## PRODUCTION OF UO<sub>2</sub> PELLETS

*Before formed into a pellet, UO<sub>2</sub> powder may experience homogenization process to homogenize its particles. Some other substances are added to increase the density or lower porosity of pellets.*

*UO<sub>2</sub> powder is compacted to produce cylindrical pellets using hundreds MPa of pressure in a furnace with temperature of 1,750 °C. This process will slightly reduce the volume of a pellet. By strict quality control, pellet's precise dimension that meets the specification can be achieved.*

*The dimension of pellet used in the reactor is generally <1 centimeter in diameter and >1 centimeter in length. A 10-gram nuclear fuel pellet can generate some amount of energy equivalent to that generated by one ton of coal.*

*The pellet produced for light water reactors (*Pressurized Water Reactors* and *Boiling Water Reactors*) generally has dimension of 1 cm long and diameter of about 1 cm. The pellets are arranged and put in a fuel cladding, which is called fuel rod. A number of fuel rods are then assembled to produce a fuel assembly.*

# PERAKITAN PERANGKAT BAHAN BAKAR MANUFACTURE OF THE FUEL ASSEMBLY



## **PERAKITAN (FABRIKASI) PERANGKAT BAHAN BAKAR**

Pelet  $UO_2$  disusun dalam batang bahan bakar, yang kemudian dirakit menjadi perangkat bahan bakar. Struktur fisik perangkat bahan bakar harus tahan terhadap korosi kimia, suhu tinggi, beban statis besar, getaran konstan, dampak zat alir dan mekanik. Untuk tujuan itu, perangkat bahan bakar nuklir dibuat dari baja dan zircalloy serta didesain agar air pendingin dapat mengalir di sekitar batang bahan bakar. Struktur ini juga dirancang untuk meminimalkan risiko getaran akibat abrasi pada tabung kelongsong bahan bakar.

Bahan utama paduan zircalloy adalah zirkonium, timah, niobium, besi, kromium dan nikel untuk memberikan kekuatan yang diperlukan dan ketahanan korosi. Hafnium merupakan bentukan deposit zirkonium yang harus dihilangkan karena bersifat menyerap neutron secara kuat.

Pabrik perakitan bahan bakar nuklir pada umumnya hanya melayani satu jenis desain pelet bahan bakar nuklir dan beberapa desain perangkat bahan bakar dalam rangka untuk mengoptimasi biaya produksi. Kapasitas produksi pabrik perakitan bahan bakar nuklir dunia bervariasi mulai dari 48 ton sampai 1.500 ton  $UO_2$ /tahun.

## **MANUFACTURE OF THE FUEL ASSEMBLY**

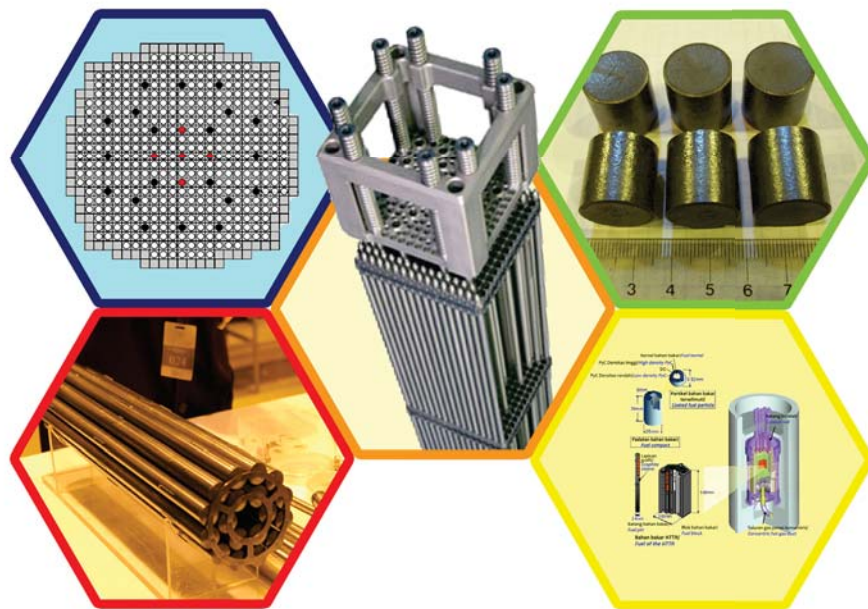
*$UO_2$  pellets are inserted to fuel rods, which are then assembled to manufacture a fuel assembly. The physical structures of the fuel rods should withstand to chemical corrosion, high temperatures, large static loads, constant vibration, fluid and mechanical impacts. For these reasons, the fuel assembly structures are made of steel and zircalloy and are designed to make cooling water flow around the fuel rod. The fuel assembly structures are designed to minimize the risk of vibration, which is induced by abrasion on the fuel cladding.*

*The main materials contained in zircalloy are zirconium, tin, niobium, iron, chromium, and nickel to provide necessary strength and corrosion resistance. Hafnium, which typically occurs naturally with zirconium deposits, needs to be removed because of its high neutron absorption cross-section.*

*Nuclear fuel fabrication factory generally serves for only one type of fuel pellet and several types of fuel assembly in order to optimize production cost. Production capacity of nuclear fuel assembly in the world varies from 48 to 1,500 tonnes of  $UO_2$ /year.*







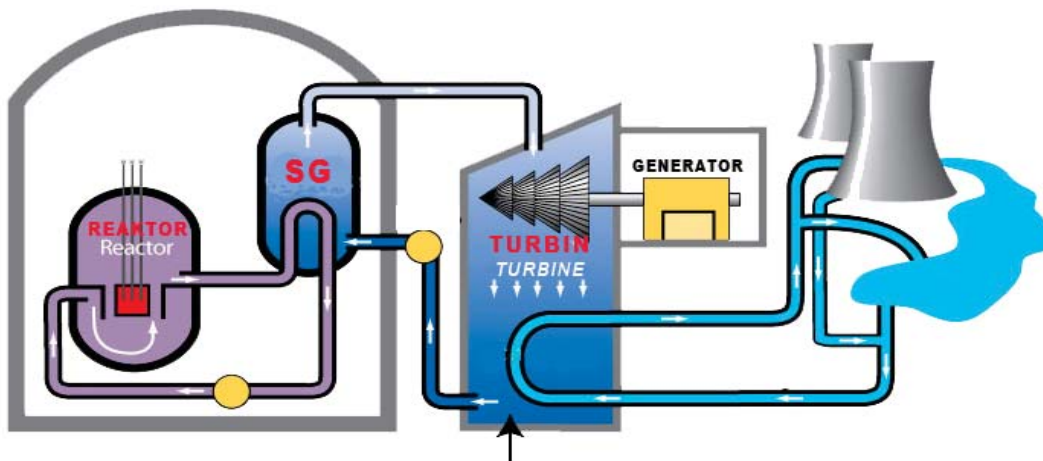
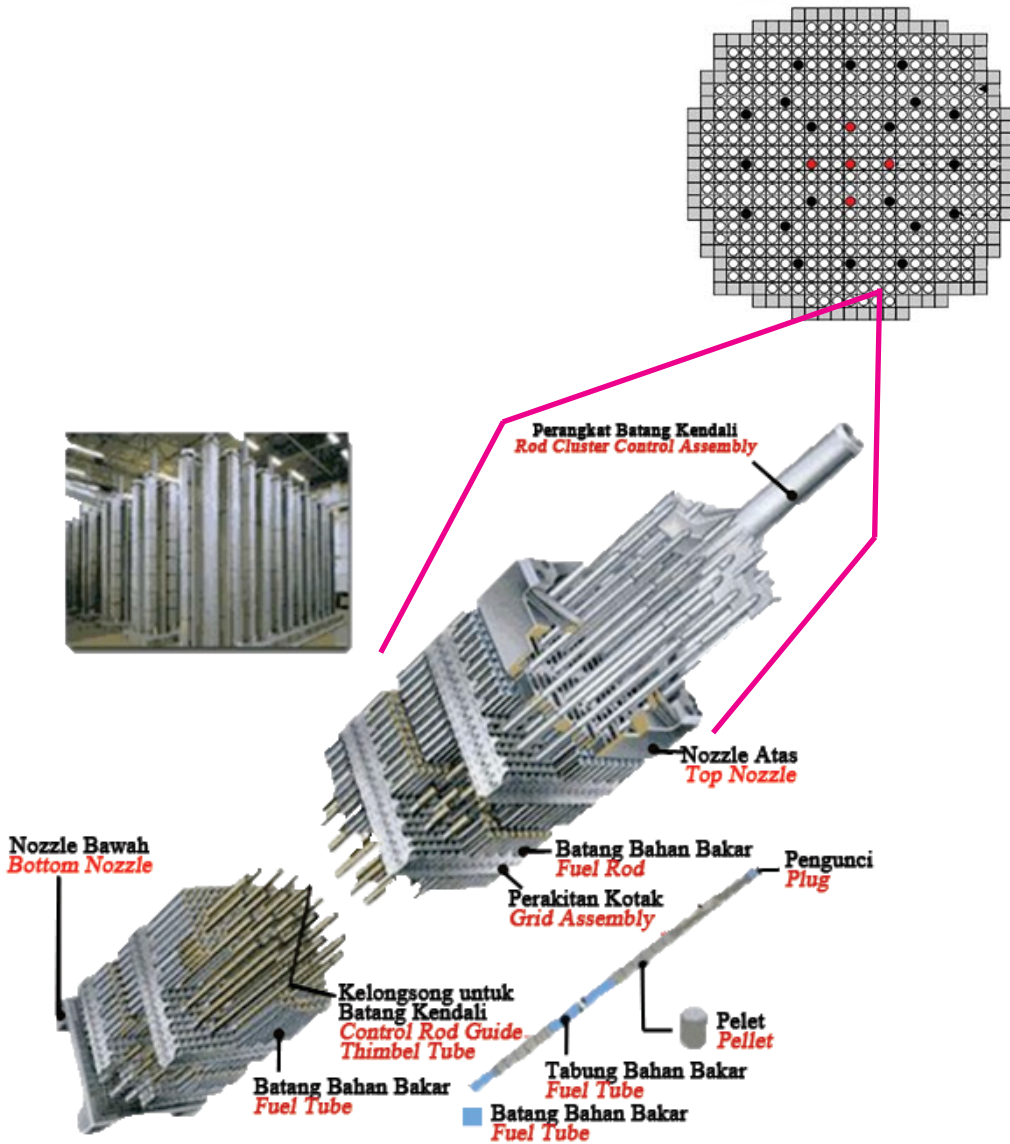
# PERANGKAT BAHAN BAKAR NUKLIR

*NUCLEAR FUEL ASSEMBLY*

# PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR

## PWR FUEL ASSEMBLY

SUSUNAN PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR/  
PWR FUEL ASSEMBLY ARRAY



Skema PLTN PWR/ PWR NPP

## **PERANGKAT BAHAN BAKAR PWR**

Reaktor air tekan (*Pressurized Water Reactors/PWR*) adalah jenis reaktor nuklir yang paling banyak digunakan. Sekitar dua pertiga dari kapasitas terpasang pembangkit nuklir di dunia saat ini berupa tipe PWR. PWR menggunakan air biasa sebagai moderator dan pendingin primer. Air ini dikondisikan pada tekanan yang cukup besar (sekitar 10 MPa) untuk mencegah agar tidak mendidih pada titik didih normalnya, karena temperatur air akan naik menjadi sekitar 330°C setelah mengambil panas dari bahan bakar.

Bahan bakar untuk PWR pada umumnya didesain dengan bentuk persegi dengan susunan perangkat bahan bakar berjumlah 17×17. Tinggi perangkat bahan bakar PWR berkisar antara empat sampai lima meter, dengan panjang sisi sekitar 20 cm dan berat sekitar setengah ton. Perangkat ini memiliki tempat kosong untuk diisi dengan batang kendali, instrumen pengukur, atau sumber neutron.

Sebuah reaktor PWR yang berkapasitas 1.000 MWe berisi sekitar 193 perangkat bahan bakar yang tersusun sekitar 50.000 batang bahan bakar dan sekitar 18 juta pelet bahan bakar. Masa siklus pengisian bahan bakar adalah 12 sampai 18 bulan.

## **PWR FUEL ASSEMBLY**

*Pressurised water reactors (PWRs) are the most common type of nuclear reactor. About two-thirds of current installed nuclear reactors in the world nowadays is PWR. PWR utilizes normal water as both moderator and primary coolant. Water is conditioned at a considerable pressure (about 10 MPa) to prevent it from boiling at its normal temperature, because water temperature will rise to about 330 °C after taking heat from the fuel.*

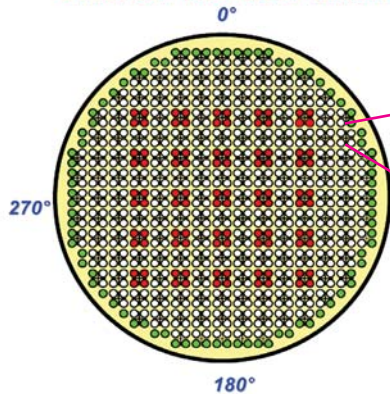
*The fuel assembly for PWRs is designed in a square lattice arrangement of 17×17. A PWR fuel assembly stands between four and five meters high, is about 20 cm across, and weighs about half a tonne. The assembly has spaces left for control rods, specific measuring instrumentation, or neutron sources.*

*A 1,000 MWe PWR core may contain 193 fuel assemblies composed of over 50,000 fuel rods and about 18 million fuel pellets. The refueling cycle is 12 to 18 months.*

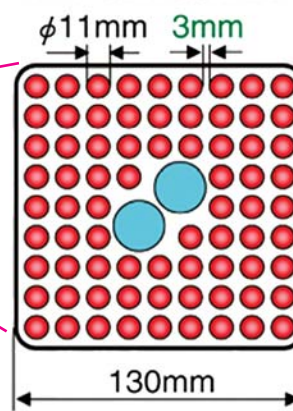
# PERANGKAT BAHAN BAKAR BWR

## BWR FUEL ASSEMBLY

SUSUNAN PERANGKAT BAHAN BAKAR BWR/  
BWR FUEL ASSEMBLY ARRAY



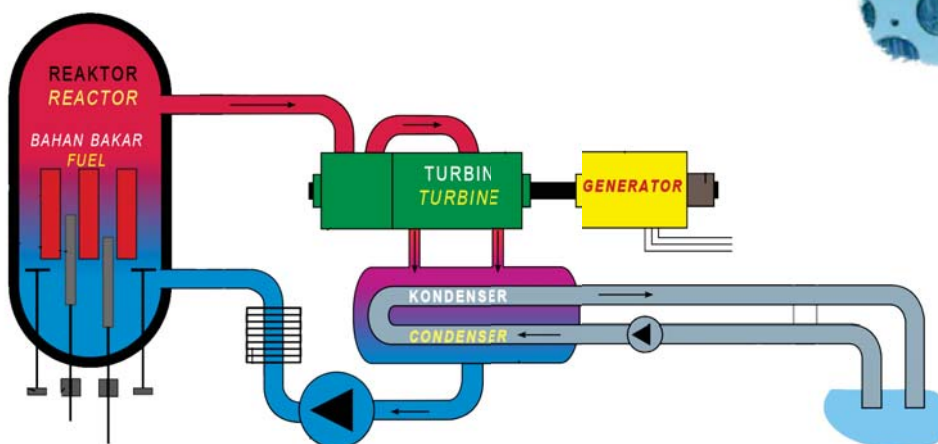
PERANGKAT BAHAN BAKAR BWR/  
BWR FUEL ASSEMBLY



BWR/6 PERANGKAT BAHAN BAKAR & MODUL BATANG KENDALI

BWR/6 FUEL ASSEMBLIES & CONTROL ROD MODULE

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. PENGARAH BAHAN BAKAR ATAS           | 1. TOP FUEL GUIDE       |
| 2. PENGIKAT KELONGSONG KELONGSONG ATAS | 2. CHANNEL FASTENER     |
| 3. PLAT PENGIKAT ATAS                  | 3. UPPER TIE PLATE      |
| 4. PEGAS EKSPANSI                      | 4. EXPANSION SPRING     |
| 5. TAB PENGUNCI                        | 5. LOCKING TAB          |
| 6. SALURAN KELONGSONG                  | 6. CHANNEL              |
| 7. BATANG KENDALI                      | 7. CONTROL ROD          |
| 8. BATANG BAHAN BAKAR                  | 8. FUEL ROD             |
| 9. PENGUNCI                            | 9. SPACER               |
| 10. RAKITAN PLAT INTI                  | 10. CORE PLATE ASSEMBLY |
| 11. PLAT PENGIKAT BAWAH                | 11. LOWER TIE PLATE     |
| 12. PENYOKONG BAHAN BAKAR              | 12. FUEL SUPPORT PIECE  |
| 13. PELET BAHAN BAKAR                  | 13. FUEL PELLETS        |
| 14. PENGUNCI AKHIR                     | 14. END PLUG            |
| 15. PENGUNCI KELONGSONG                | 15. CHANNEL SPACER      |
| 16. PEGAS PLENUM                       | 16. PLENUM SPRING       |



Skema PLTN BWR/ BWR NPP

## **PERANGKAT BAHAN BAKAR BWR**

Reaktor air didih (*Boiling Water Reactors/ BWR*) adalah jenis reaktor nuklir terbanyak kedua dengan total hampir seperempat dari kapasitas PLTN terpasang. Air pendingin akan mendidih pada temperatur sekitar 290 °C dan tekanan 7 MPa dan akan menghasilkan uap air untuk menggerakkan turbin.

BWR menggunakan perangkat bahan bakar yang terdiri dari pelet uranium oksida berkelongsong zirkonium. Susunan perangkat bahan bakar berbentuk persegi dengan ukuran geometri bervariasi dari 6x6 sampai 10x10. Tinggi perangkat bahan bakar BWR sekitar empat meter, dengan panjang sisi sekitar 14 cm dan berat sekitar seperempat ton. Perangkat ini memiliki tempat kosong untuk diisi batang kendali, instrumen pengukur, atau sumber neutron.

Sebuah reaktor BWR yang berkapasitas 1.000 MWe dapat berisi 200 perangkat bahan bakar yang tersusun sekitar 43.000 batang bahan bakar dan sekitar 16 juta pelet bahan bakar. Siklus dan pengelolaan dalam pengisian ulang bahan bakar BWR serupa siklus dan pengelolaan dalam PWR.

## **BWR FUEL ASSEMBLY**

*Boiling water reactors (BWRs) are the second most common nuclear reactor type accounting for almost one-quarter of installed nuclear power plants generating capacity. The cooling water boils at about 290°C and pressure of 7 MPa and produces steam to drive a turbine.*

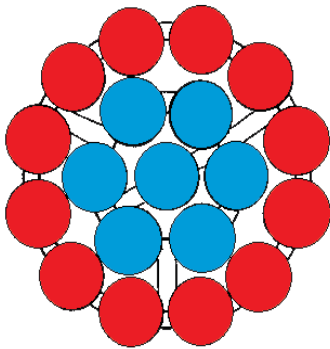
*BWRs use fuel rods comprising zirconium-clad uranium oxide ceramic pellets. Their arrangement into assemblies is again based on a square lattice, with pin geometries ranging from 6x6 to 10x10. A BWR fuel assembly stands between four and five meters high, is about 14 cm across, and weighs about a quarter tonne. The assembly has spaces left for control rods, specific measuring instrumentation, or neutron sources.*

*A 1,000 MWe BWR core may contain 200 fuel assemblies composed of over 43,000 fuel rods and about 16 million fuel pellets. The refueling cycle is similar to that of PWR.*

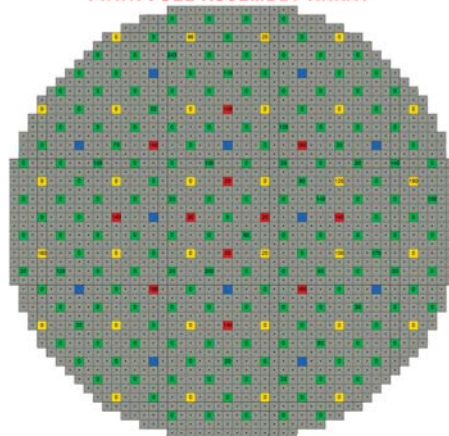
# PERANGKAT BAHAN BAKAR PHWR

## PHWR FUEL ASSEMBLY

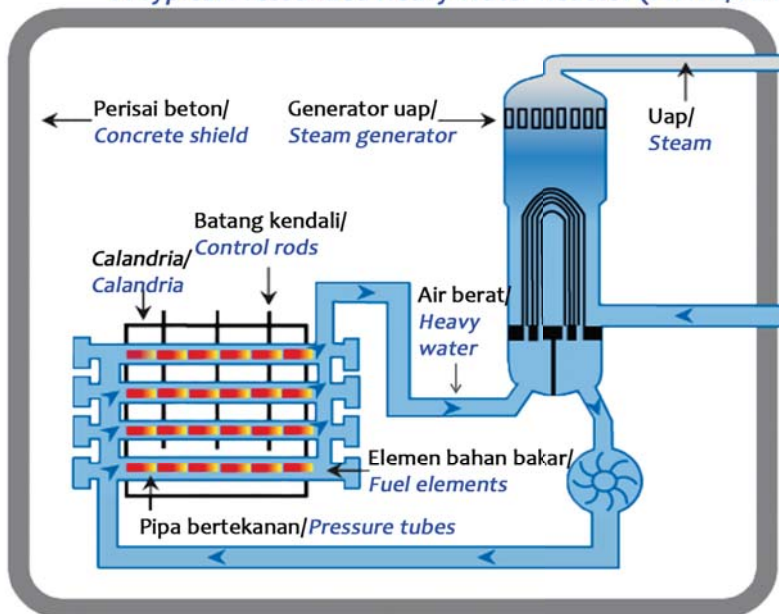
PERANGKAT BAHAN BAKAR PHWR/  
PHWR FUEL ASSEMBLY



SUSUNAN PERANGKAT BAHAN BAKAR PHWR/  
PHWR FUEL ASSEMBLY ARRAY



Tipe Reaktor Air Berat Bertekanan/  
A Typical Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR/Candu)



## PERANGKAT BAHAN BAKAR PHWR

Reaktor Air Berat bertekanan (*Pressurized Heavy Water Reactors/PHWR*) pada awalnya merupakan desain Kanada (*CANDU*) dengan kapasitas terpasang sekitar ~6% dari kapasitas PLTN dunia. PHWR menggunakan pipa-pipa tekan, yang didalamnya terdapat air berat yang memoderasi dan mendinginkan bahan bakar. Bahan bakar berupa uranium alam (natural uranium) dengan bentuk pelet uranium oksida yang dilapisi dengan paduan zirkonium.

Panjang batang bahan bakar PHWR sekitar 50 cm dan dirakit menjadi ikatan (*bundle*) berdiameter sekitar 10 cm. Satu ikat bahan bakar terdiri 28, 37 atau 43 batang bahan bakar. Bahan bakar PHWR tidak mempunyai derajat bakar (*burn-up*) tinggi, sehingga siklus pengisian ulang bahan bakar tidak lama, berbeda dengan pengisian ulang pada PWR dan BWR.

Ikatan bahan bakar dimuatkan ke saluran pipa bertekanan horizontal yang menembus bejana tekan reaktor (disebut *calandria*). Pengisian ulang bahan bakar bisa dilakukan dalam kondisi reaktor beroperasi penuh. Reaktor *CANDU* 790 MWe yang berisi 480 saluran bahan bakar terdiri dari 5.760 ikatan bahan bakar yang mengandung lebih dari 5 juta pelet bahan bakar.

## PHWR FUEL ASSEMBLY

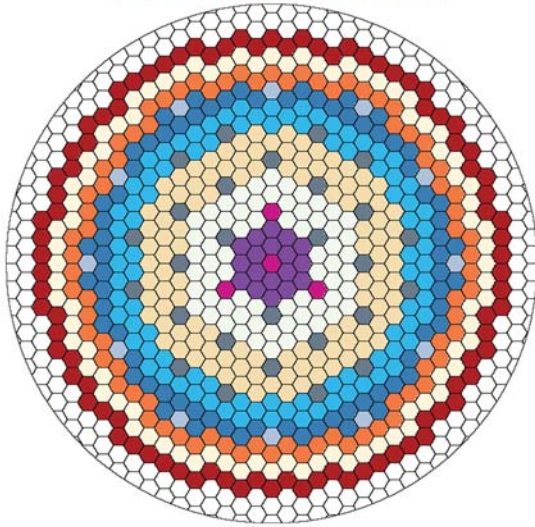
*Pressurised Heavy Water Reactors (PHWRs) are originally a Canadian design (also called "CANDU") accounting for 6% of the world installed nuclear generating capacity. PHWRs use pressure tubes, in which heavy water moderates and cools the fuel. The fuel contains natural uranium in form of UO<sub>2</sub> pellets, clad with zirconium alloy.*

*PHWR fuel rods are about 50 cm long and are assembled into 'bundles' approximately 10 cm in diameter. A fuel bundle comprises 28, 37 or 43 fuel elements. PHWR fuel does not attain high burn-up, so that the refueling cycle is not long, different from that of PWR and BWR.*

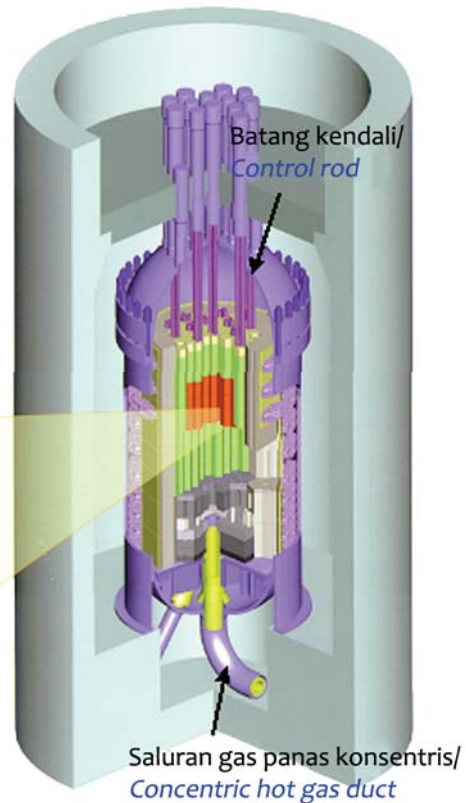
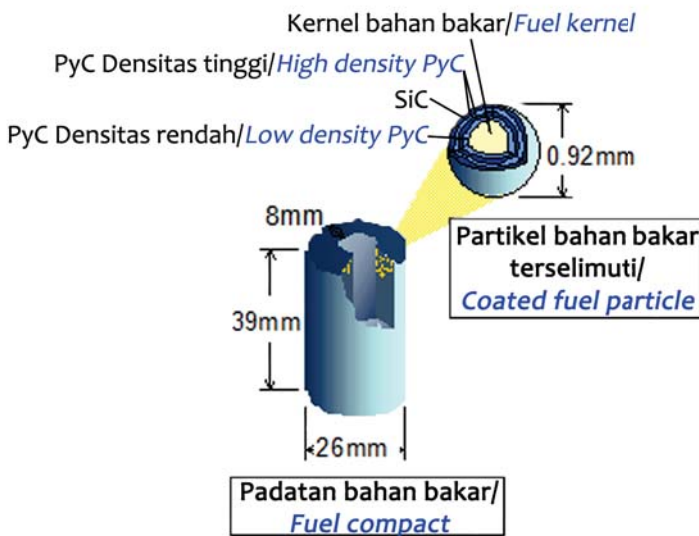
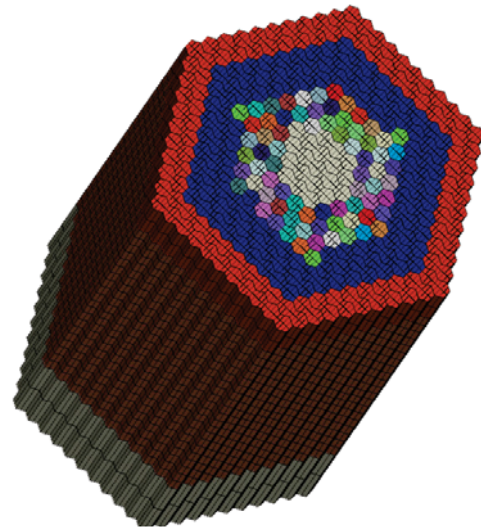
*The fuel bundles are loaded into horizontal channels or pressure tubes which penetrate the length of the reactor vessel (known as the calandria). Refueling can be done while the reactor is operating at full power. A CANDU reactor with capacity of 790 MWe contains 480 fuel channels composed of 5,760 fuel bundles containing over 5 million fuel pellets.*

# BAHAN BAKAR REAKTOR SUHU TINGGI HIGH TEMPERATURE REACTOR FUEL

SUSUNAN PERANGKAT BAHAN BAKAR HTGR/  
HTGR FUEL ASSEMBLY ARRAY



PERANGKAT BAHAN BAKAR HTGR/  
HTGR FUEL ASSEMBLY





## **BAHAN BAKAR REAKTOR SUHU TINGGI**

Reaktor Suhu Tinggi beroperasi pada 750-950 °C, dan biasanya berpendingin gas helium. Bahan bakar untuk reaktor tipe ini berbentuk TRISO (*tristructural-isotropic*) dengan diameter kurang dari satu milimeter. Masing-masing berisi kernel (0,5 mm) yang mengandung uranium dioksida, dengan tingkat pengayaan sampai 20%. Bahan bakar tersebut dilapisi karbon dan silikon karbida, yang mengungkung produk fisi yang tetap stabil pada suhu yang sangat tinggi. Hasil uji coba di dua laboratorium di Amerika menunjukkan bahwa sebagian besar produk fisi akan tetap aman di partikel TRISO sampai sekitar 1.800 °C.

Terdapat dua bentuk konfigurasi bahan bakar yaitu prismatic dan bola (*pebble bed*) yang terbungkus silikon karbida, masing-masing dengan sekitar 15.000 partikel bahan bakar dengan 9 gram uranium per partikel. Reaktor suhu tinggi dapat menggunakan bahan bakar berbasis thorium dengan campuran uranium dengan tingkat pengayaan tinggi atau rendah. Dengan demikian thorium dapat digunakan baik dalam reaktor berpendingin air maupun reaktor suhu tinggi berpendingin gas.

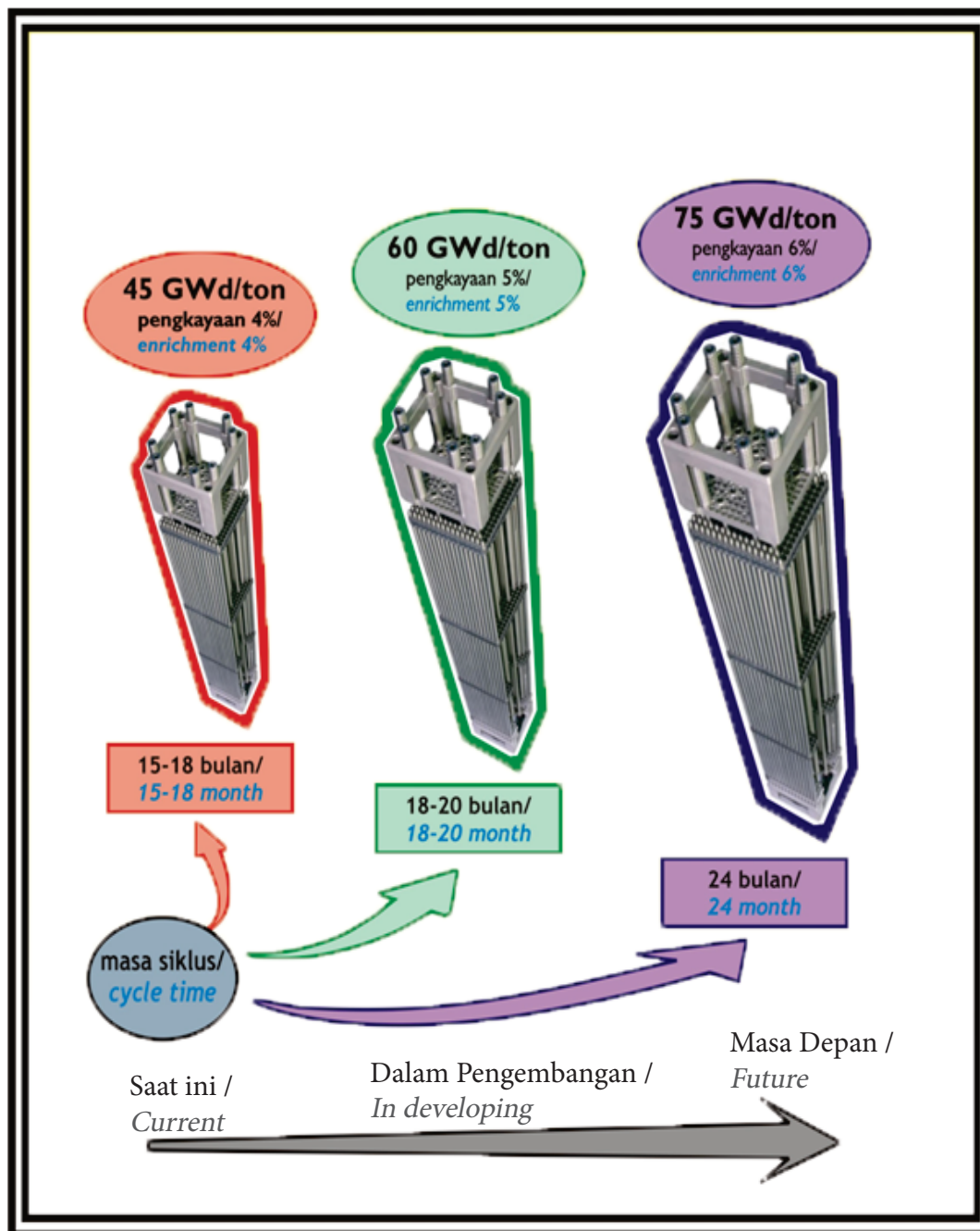
## **HIGH TEMPERATURE REACTOR FUEL**

*High temperature reactors operate at 750 to 950 °C, and are normally helium-cooled. The fuel for this type of reactor is in the form of TRISO (tristructural-isotropic) particles less than a millimetre in diameter. It has a kernel (ca. 0.5 mm) of uranium dioxide, with the enrichment level up to 20%. The fuel is surrounded by layers of carbon and silicon carbide, giving a containment for fission products which is stable to very high temperatures. Recent trials at two US laboratories confirmed that most fission products remain securely in TRISO particles up to about 1,800 °C.*

*There are two different fuel configurations, i.e. prismatic and pebble bed encased in silicon carbide, each with about 15,000 fuel particles and 9 g uranium per particle. HTRs can potentially use thorium-based fuels, such as high-enriched or low-enriched uranium. Therefore, thorium can be used in water-cooled reactors and high temperature gas-cooled reactors.*

# BURN-UP BAHAN BAKAR NUKLIR

## FUEL BURN-UP



## **BURN-UP BAHAN BAKAR NUKLIR**

*Burn-up* bahan bakar nuklir merupakan nilai energi yang dihasilkan per satuan massa yang dinyatakan dalam satuan GWd/ton (giga watt day per ton).

Nilai *burn-up* akan menentukan masa pakai dan jumlah bahan bakar nuklir dalam reaktor. Potensi *burn-up* sebanding dengan tingkat pengayaan. Saat ini PLTN Generasi III dan III+ menggunakan bahan bakar dengan *burn-up* 45 GWd/ton dengan tingkat pengayaan hanya sekitar 4%. Fasilitas pengayaan yang semakin membaik memungkinkan produksi bahan bakar nuklir dengan *burn-up* antara 55 sampai 60 GWd/ton dengan tingkat pengayaan 5% atau bahkan *burn-up* mencapai 70 GWd/ton dengan pengayaan 6%. Keuntungan adanya peningkatan *burn-up* ini adalah siklus operasi reaktor bisa lebih lama, yaitu sekitar 24 bulan.

PLTN dengan kapasitas 1.000 megawatt (MWe) yang beroperasi dengan faktor kapasitas 90% akan menghasilkan listrik sekitar 7.800 GWh dalam setahun.

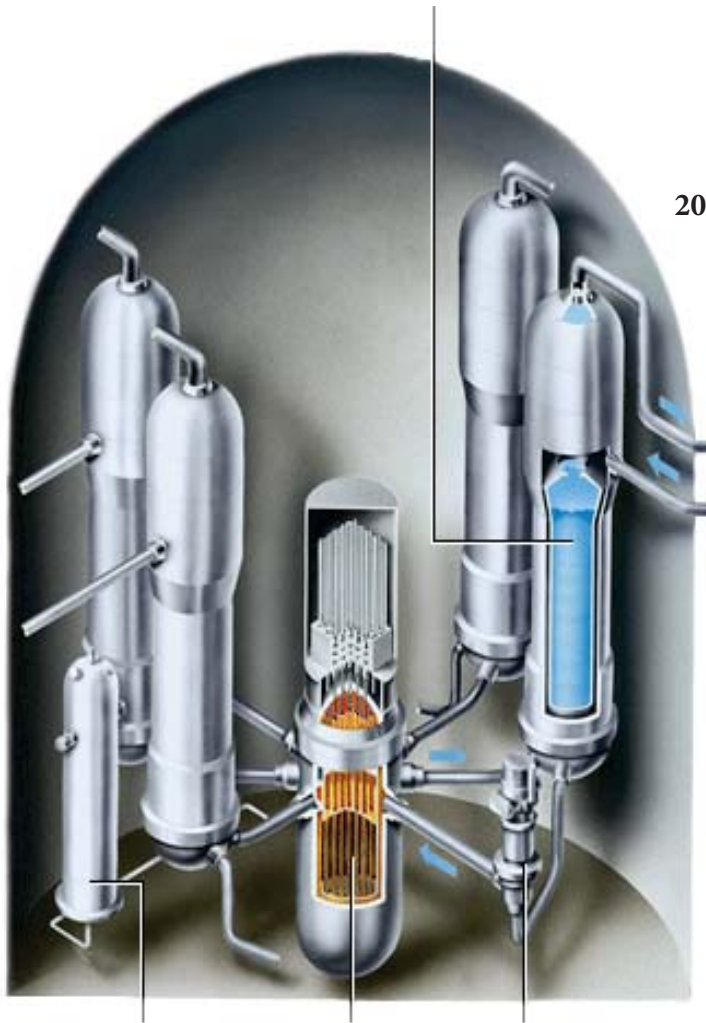
Jika *burn-up* bahan bakar yang digunakan adalah 40 GWd/ton dan efisiensi termal sebesar 33%, maka kebutuhan bahan bakar per tahun menjadi sekitar 24 ton.

## **FUEL BURN-UP**

*Nuclear fuel burn-up is an amount of energy generated per unit mass expressed in GWd/tonne (giga watt day per tonne).*

*Fuel burn-up determines the life time and the amount of nuclear fuel in a reactor. Fuel burn-up is proportional to the enrichment level. Nowadays, nuclear power plants of Generation III and III+ use fuel with burn-up 45 GWD ton with a level of enrichment is only about 4%. Better fuel enrichment facility makes the production of nuclear fuel with burn-up between 55 and 60 GWd/tonne and 5% enrichment or even 70 GWd/tonne with 6% enrichment possible. The benefit of the increased burn-up is that the operation cycles can be longer, around 24 months.*

## KESETIMBANGAN MATERIAL DI SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR MATERIAL BALANCE IN THE NUCLEAR FUEL CYCLE



20 s/d 400 kilo ton bijih uranium /tahun



195 Ton Uranium Alam/tahun



24 Ton Uranium diperkaya/tahun

- PLTN 1000 MWe
- Operation Time 90%
- Efisiensi Thermal 33%
- Burn Up 40 GWd

## **KESETIMBANGAN MATERIAL DI SIKLUS BAHAN BAKAR NUKLIR**

Untuk mendapatkan 1 kg bahan bakar uranium siap pakai, diperlukan 8.9 kg uranium alam ( $U_3O_8$ ). Sedangkan untuk mendapatkan 1 kg uranium alam, dibutuhkan bijih uranium antara 100 sampai 10.000 kg, tergantung pada kadar konsentrasi uranium dalam bijih tersebut.

Sebagai ilustrasi kebutuhan uranium untuk operasi tahunan reaktor tenaga nuklir 1.000 MWe dengan *burn-up* bahan bakar 40 GWd/ton, dibutuhkan sekitar 20.000 sampai 400.000 ton bijih uranium dari pertambangan, 230 ton konsentrat uranium oksida (berisi 195 ton uranium) setelah penggilingan, 288 ton uranium hexafluorida  $UF_6$  (dengan 195 tU) pada proses konversi, 35 ton diperkaya  $UF_6$  (mengandung 24 ton uranium diperkaya) setelah pengayaan, 27 ton  $UO_2$  (dengan 24 ton uranium diperkaya) setelah fabrikasi bahan bakar. Bahan bakar bekas sekitar 27 ton yang mengandung 240 kg transuranik (terutama plutonium), 23 ton uranium (0,8% U-235), 1.100 kg produk fisi.

Perhitungan untuk *burn-up* berbeda, misalkan 45 GWd/ton atau 65 GWd/ ton menghasilkan nilai berbeda untuk setiap langkah (tambang, penggilingan, konversi, pengayaan dan fabrikasi).

## **MATERIAL BALANCE IN THE NUCLEAR FUEL CYCLE**

*To produce 1 kg of enriched uranium, about 8.9 kg of natural uranium ( $U_3O_8$ ) is needed. Meanwhile, to obtain 1 kg of natural uranium approximately between 100 and 10,000 kg of uranium ore is required, depending on the concentration level of uranium in that ore.*

*As an illustration of the need of uranium for the annual operation of a 1000 MWe nuclear power reactor with burnup 40 GWd/tonne, About 20,000 to 400,000 tonnes of uranium ore from mining, 230 tonnes of uranium oxide concentrate (containing 195 tonnes of uranium) after milling, 288 tonnes uranium hexafluoride,  $UF_6$  (with 195 tU) on conversion process, 35 tonnes enriched  $UF_6$  (containing 24 t enriched-U) after enrichment 27 tonnes  $UO_2$  (with 24 t enriched-U) after fuel fabrication. The spent fuel will be approximately 27 tonnes containing 240 kg transuranics (mainly plutonium), 23 tonnes of uranium (0.8%  $^{235}U$ ), and 1,100 kg of fission products.*

*Calculation for different fuel burnup, for example 45 GWd/tonne or 65 GWd/tonne will result in different figures for each step (mining, milling, conversion, enrichment, and fabrication).*

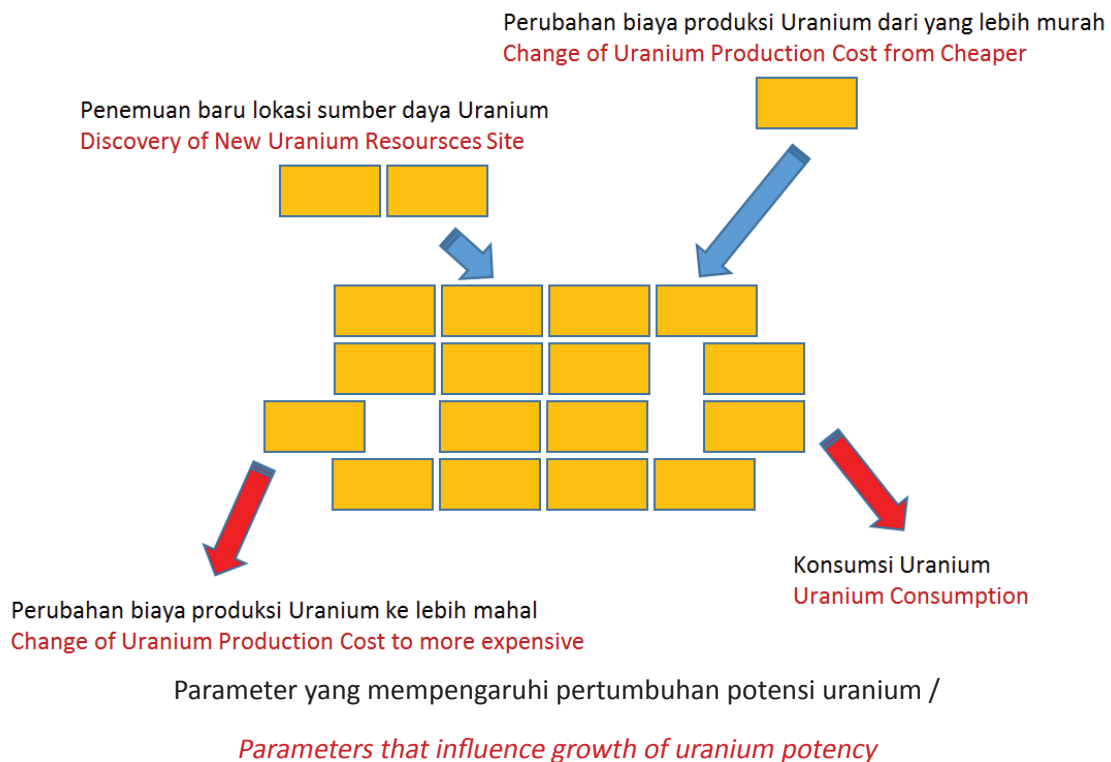
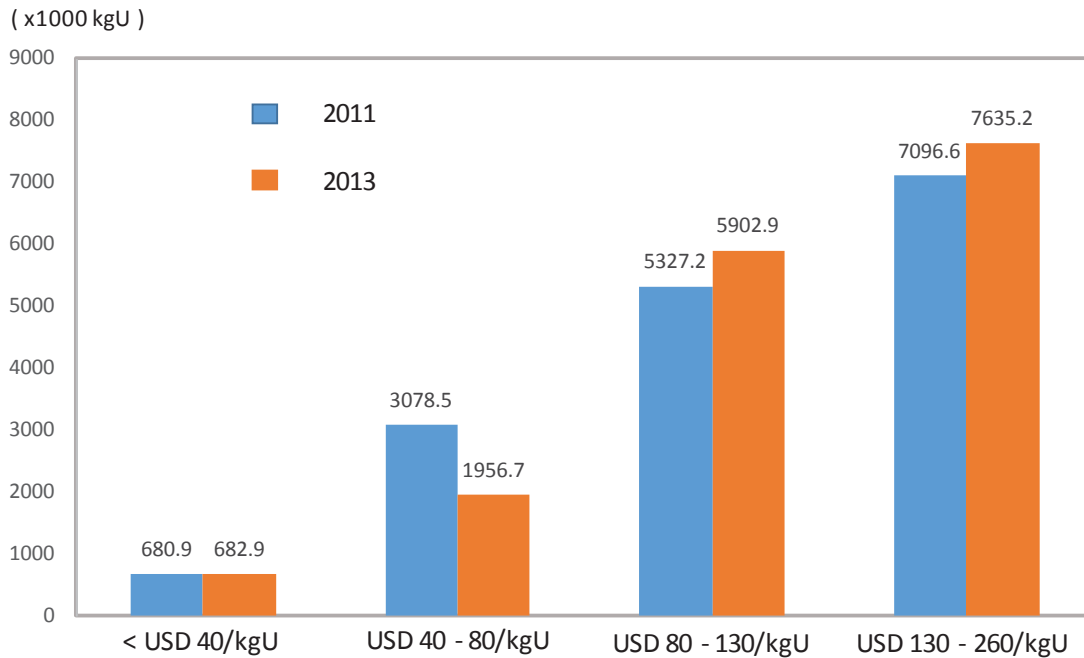




# **POTENSI, PRODUKSI DAN KONSUMSI URANIUM DUNIA**

*WORLD POTENTIALS, PRODUCTION AND  
CONSUMPTION OF URANIUM*

## PERTUMBUHAN POTENSI URANIUM CHANGES OF URANIUM RESOURCES





## **PERTUMBUHAN POTENSI URANIUM**

Klasifikasi potensi sumber daya alam terbagi menjadi tiga yaitu terukur, terindikasi dan terduga. Klasifikasi tersebut berdasarkan tingkat kepastian besarnya potensi. Kepastian terukur paling tinggi, sedangkan klasifikasi terduga paling rendah.

Klasifikasi sumber daya uranium teridentifikasi terdiri dari *reasonably assured resources* (RAR) dan *inferred resources* (IR) dengan biaya produksi kurang dari USD 260/kgU. RAR adalah sumber daya uranium yang telah diketahui jumlah, letak, kualitas, dan aspek penting lainnya, sehingga ia dapat langsung ditambang. Sementara itu, IR adalah sumber daya uranium yang diperkirakan melalui suatu penelitian dan eksplorasi, tetapi data yang dibutuhkan belum lengkap. Tahun 2013, jumlah sumber daya uranium teridentifikasi (biaya <USD 260/kg U) meningkat, karena adanya *re-evaluasi* deposit uranium yang ada, peningkatan eksplorasi, dan penambahan kapasitas produksi tambang.

Sumber daya uranium teridentifikasi (biaya <USD 130/kgU) meningkat 10,8%. Peningkatan ini terjadi karena adanya pergeseran biaya penambangan uranium dari rendah menjadi lebih mahal.

## **GROWTH OF URANIUM RESOURCES**

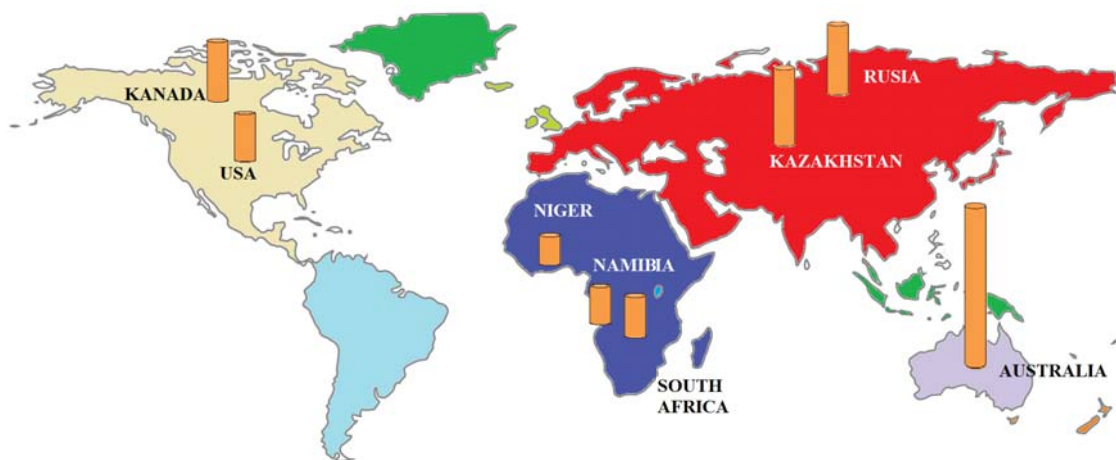
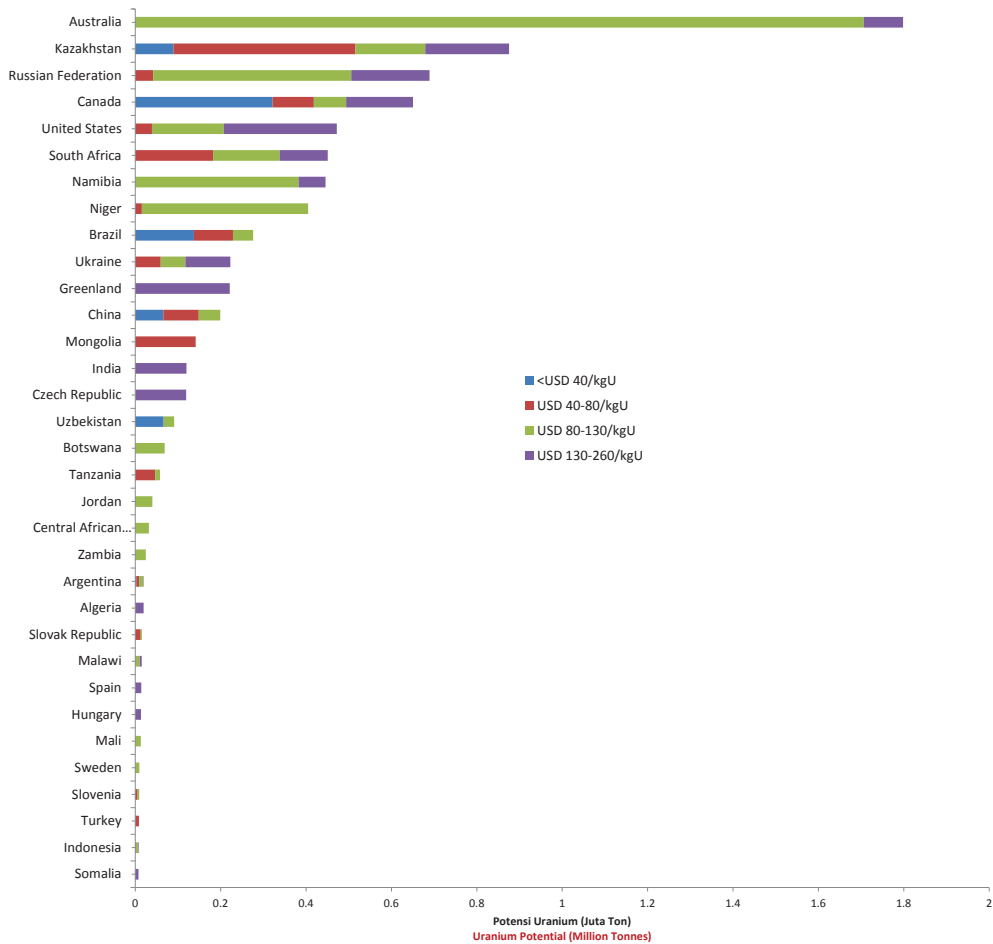
*There are three classifications of resources: measured, indicated and inferred. Those classifications are based on certainty figure of resources. Measured is the most certain, while inferred is the least certain.*

*Classification of identified uranium resources consists of a reasonably assured resources (RAR) and inferred resources (IR) at a cost of less than USD 260/kgU (USD 100/ lb U3O8 ) . RAR is uranium resources whose amount, location, quality, and other important aspects have been known, so that they can be directly mined through research and exploration, but the required data are not yet complete. In 2013, the uranium resources identified at a cost of < USD 260/kgU increased due to the reevaluation of the existing uranium deposits, increased exploration, and production capacity expansion of the existing mines .*

*Identified uranium resources at a cost of < USD 130 / kg U increased 10.8%. This increase occurred due to a shift in the cost of uranium mining from low cost mining to more expensive mining.*

# POTENSI URANIUM TERIDENTIFIKASI

## IDENTIFIED URANIUM RESOURCES



Negara-negara yang memiliki potensi terbesar uranium /

*Countries with majority uranium resource*

## POTENSI URANIUM TERIDENTIFIKASI

Potensi total uranium teridentifikasi di seluruh dunia pada tahun 2013 untuk biaya <USD 40/kgU sebesar 682.900 ton, untuk biaya <USD 80/kgU sebesar 1.956.700 ton, untuk biaya <USD 130/kgU sebesar 5.902.900 ton, dan untuk biaya <USD 260/kgU sebesar 7.635.200 ton.

Lima negara yang mempunyai sumber daya uranium teridentifikasi dengan biaya terbesar adalah Australia 29%, Kazakhstan 12%, Rusia 9%, Kanada 8%, dan Nigeria 7%. Potensi uranium yang murah (<USD 40/ kgU) banyak terdapat di negara Argentina, Brazil, Kanada, China, Kazakhstan, dan Uzbekistan.

Sumber daya uranium teridentifikasi di Indonesia sebesar 8.000 tU (0,1%). Nilai sumber-daya tersebut masih bisa ditingkatkan dengan melakukan re-evaluasi dan eksplorasi tambahan di semua wilayah Indonesia yang potensial. Selain itu perlu dilakukan studi kelayakan ekonomi terhadap proses penambangan uranium Indonesia. Dengan adanya studi tersebut, dapat dilakukan langkah selanjutnya, yaitu apakah Indonesia akan menambang uranium sendiri atau impor dari negara lain.

## IDENTIFIED URANIUM RESOURCES

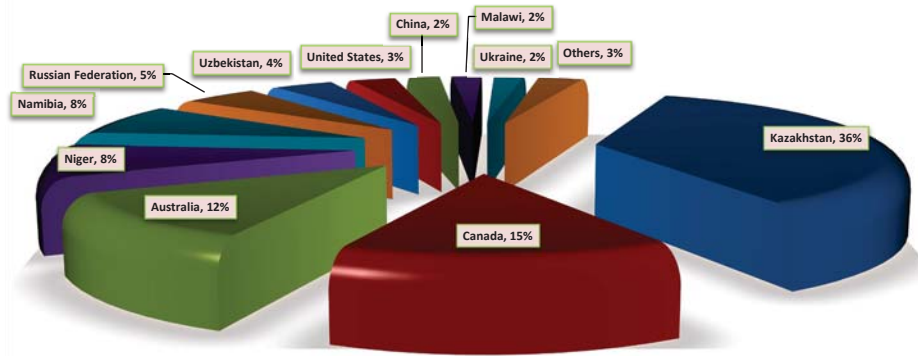
*Total potential uranium identified worldwide in the year 2013 for the cost of < USD 40 / kgU amounted to 682,900 tonnes, for a cost of < USD 80 / kgU amounted to 1.9567 million tonnes, for a cost of < USD 130 / kgU amounted to 5.9029 million tonnes, and for a fee < USD 260 / kgU of 7,635,200 tonnes .*

*Five countries with the largest identified uranium resources are Australia 29%, Kazakhstan 12%, Russia 9 % , Canada 8 % , and Nigeria 7% . Cheap uranium potential (< USD 40 / kgU) is widely available in countries of Argentina, Brazil, Canada, China, Kazakhstan, and Uzbekistan.*

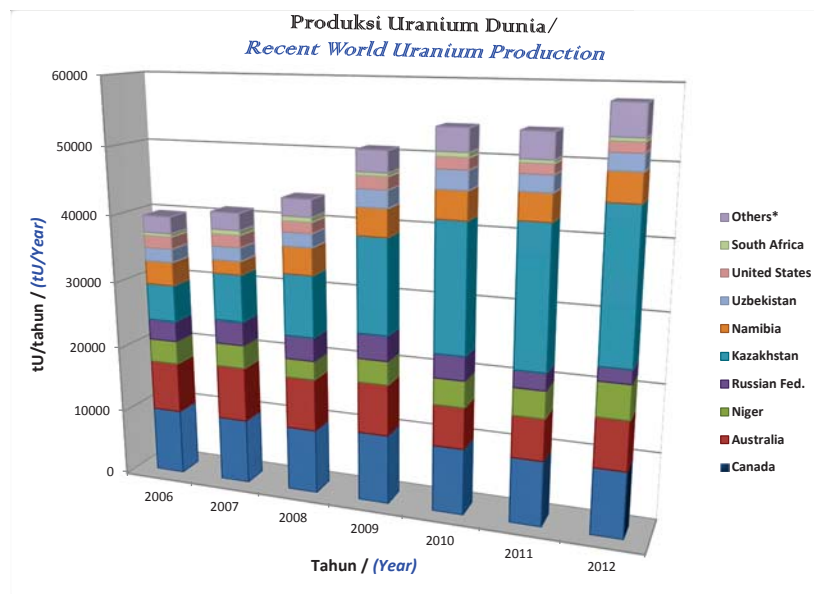
*Identified uranium resource in Indonesia is amounted to 8,000 tU (0.1%). The figure of these resources can still be improved through a reevaluation and additional exploration in all parts of Indonesia that are potential. In addition, it is necessary to study the economic feasibility of the process of uranium mining in Indonesia. By this study, the next step can be carried out, whether Indonesia mines uranium itself or import uranium from other countries.*

# PRODUKSI URANIUM

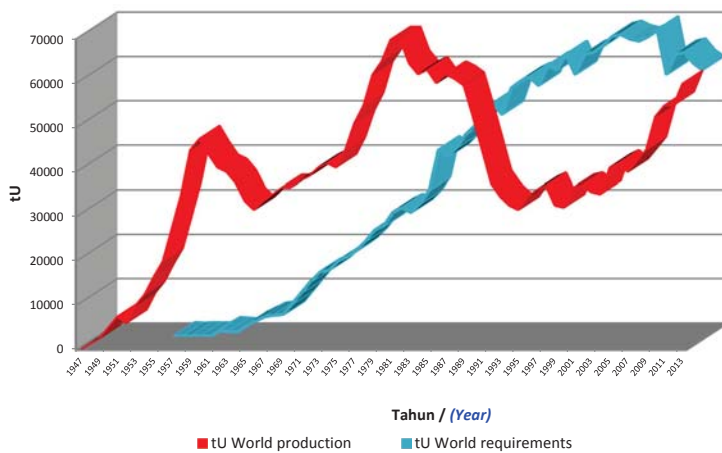
## URANIUM PRODUCTION



**Produksi Uranium pada Tahun 2012: 58816 tU/  
Uranium Production in 2012: 58816 tU**



**Produksi dan Kebutuhan Uranium Tahunan\* /  
Annual Uranium Production and Requirements\*  
(1947-2013)**



## **PRODUKSI URANIUM**

Produksi uranium dunia pada tahun 2012 sebesar 58.816 tU dengan 5 negara terbesar produsen uranium adalah Kazakhstan 36%, Kanada 15%, Australia 12%, Nigeria 8%, dan Namibia 8%. Negara yang mempunyai sumberdaya uranium teridentifikasi terbesar belum tentu akan menjadi produsen yang terbesar. Produksi uranium sebuah negara dipengaruhi oleh kebijakan dan kondisi ekonomi negara tersebut: Apakah uranium menjadi komoditi utama dalam neraca perdagangan negara tersebut atau tidak akan berpengaruh terhadap jumlah produksi uraniumnya.

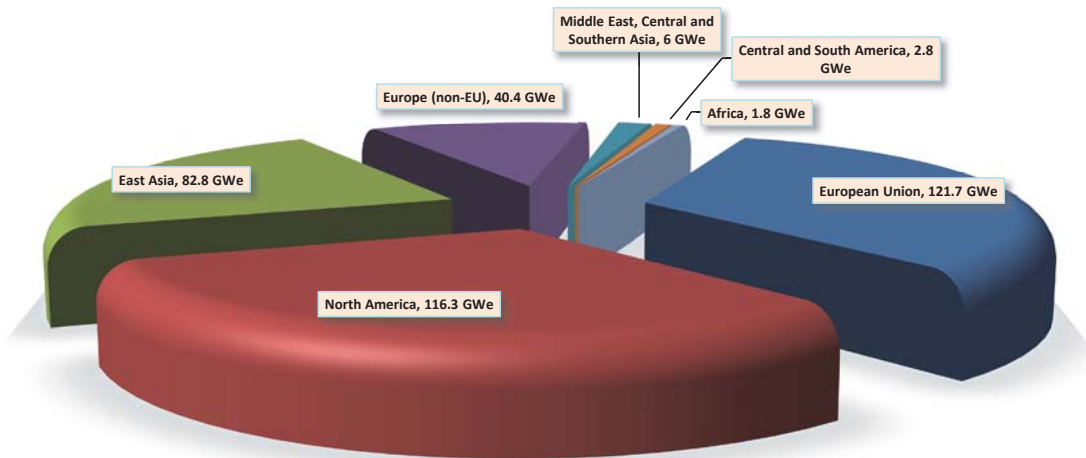
Tahun 2011, 2012, dan 2013, uranium diproduksi oleh 21 negara berbeda. Jerman, Hungaria dan Perancis memproduksi dalam jumlah kecil, karena remediasi tambang uranium. Produksi uranium Kazakhstan meningkat, walaupun dengan tingkat pertumbuhan yang sedikit melambat dari tahun ke tahun. Meskipun demikian, Kazakhstan tetap menjadi produsen terbesar di dunia. Pada tahun 2012 produksi Kazakhstan lebih besar dari produksi gabungan Kanada dan Australia, karena mereka merupakan produsen terbesar kedua dan ketiga.

## **URANIUM PRODUCTION**

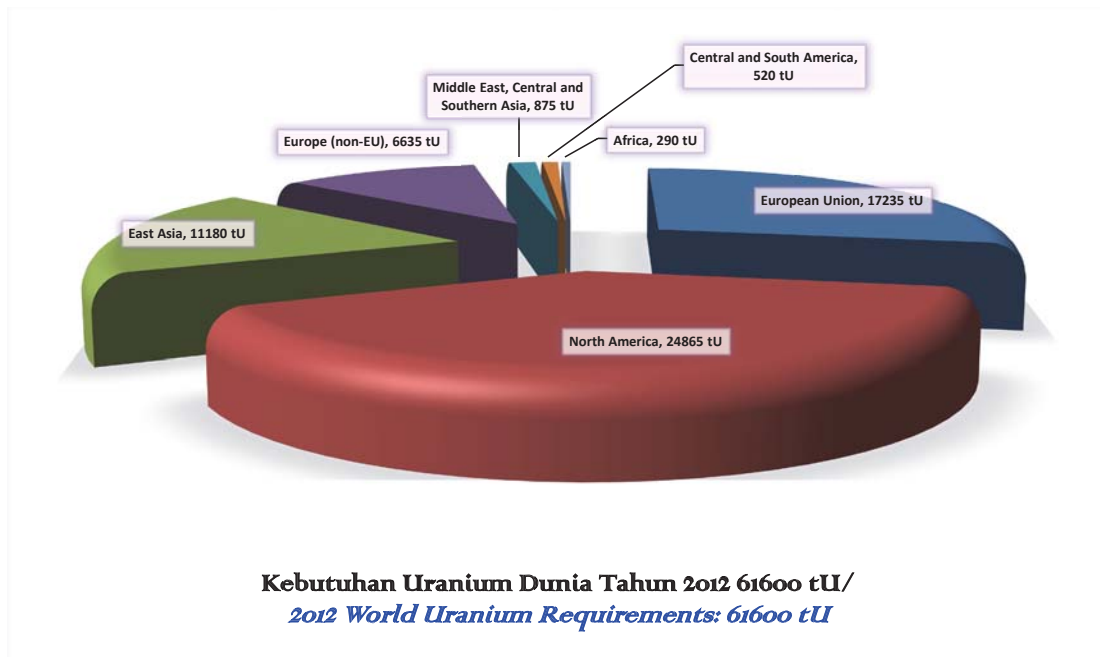
*The world uranium production in 2012 reached 58,816 tU and the 5 largest uranium producer countries are Kazakhstan 36%, Canada 15%, Australia 12%, Nigeria 8% and Namibia 8%. A country that has the largest identified uranium resource will not necessarily be the biggest producer. Uranium production of a country is influenced by its policy and economic conditions: Whether uranium becomes the main commodity in its trade balance or not will affect the amount of its uranium production.*

*In 2011, 2012 and 2013, uranium was produced in 21 different countries. Germany, Hungary and France produced small amounts of uranium because of uranium mine remediation activities. Kazakhstan's growth in uranium production continued, albeit at a slower pace. It remained the world's largest in uranium production. In 2012, uranium production in Kazakhstan amounted to more than the combined production of Canada and Australia, respectively the second and third largest producer.*

## KAPASITAS PLTN DAN KEBUTUHAN URANIUM DUNIA WORLD NPP CAPACITY AND URANIUM REQUIREMENTS



**Kapasitas Nuklir Terpasang di Dunia: 371.8 GWe net/  
World Installed Nuclear Capacity: 371.8 GWe net**  
(pada 1 Januari 2013) / (as of 1 January 2013)



**Kebutuhan Uranium Dunia Tahun 2012 61600 tU/  
2012 World Uranium Requirements: 61600 tU**

## KAPASITAS PLTN DAN KEBUTUHAN URANIUM DUNIA

Uni Eropa memiliki total kapasitas PLTN terbesar di dunia (121.7 Gwe) dan Amerika Utara berada di posisi kedua dengan 116.3 Gwe. Sedangkan untuk kebutuhan uranium, kebutuhan uranium terbesar di dunia berada di Amerika Utara dengan kebutuhan 24.865 ton uranium dan setelah itu Uni Eropa dengan kebutuhan 17.235 ton.

Walaupun total kapasitas PLTN terbesar berada di Uni Eropa, tetapi kebutuhan terbesar berada di Amerika Utara. Hal tersebut disebabkan oleh, setelah kecelakaan Fukushima (tahun 2011), berhentinya operasi beberapa PLTN di Uni Eropa khususnya di Jerman, yang mengakibatkan berkurangnya konsumsi uranium.

Wilayah Asia Timur pada tahun 2013 memiliki total kapasitas PLTN 83 GWe dengan kebutuhan uranium sekitar 11.180 ton Uranium. Indonesia dikategorikan masuk dalam wilayah Asia Timur. Untuk proyeksi pembangunan PLTN di Indonesia, jika diasumsikan menggunakan jenis uranium dengan *burn-up* 45 GWd/ton, maka setiap penambahan 1.000 MWe akan menambah kebutuhan uranium sekitar 200 ton/ tahun.

## WORLD NPP CAPACITY AND URANIUM REQUIREMENTS

*The European Union has the largest total capacity of nuclear power plants in the world (121.7 GWe) and North America came in the second place with 116.3 GWe. Meanwhile, the largest uranium demand is in North America as much as 24,865 tonnes of uranium and the European Union needs 17, 235 tonnes of uranium.*

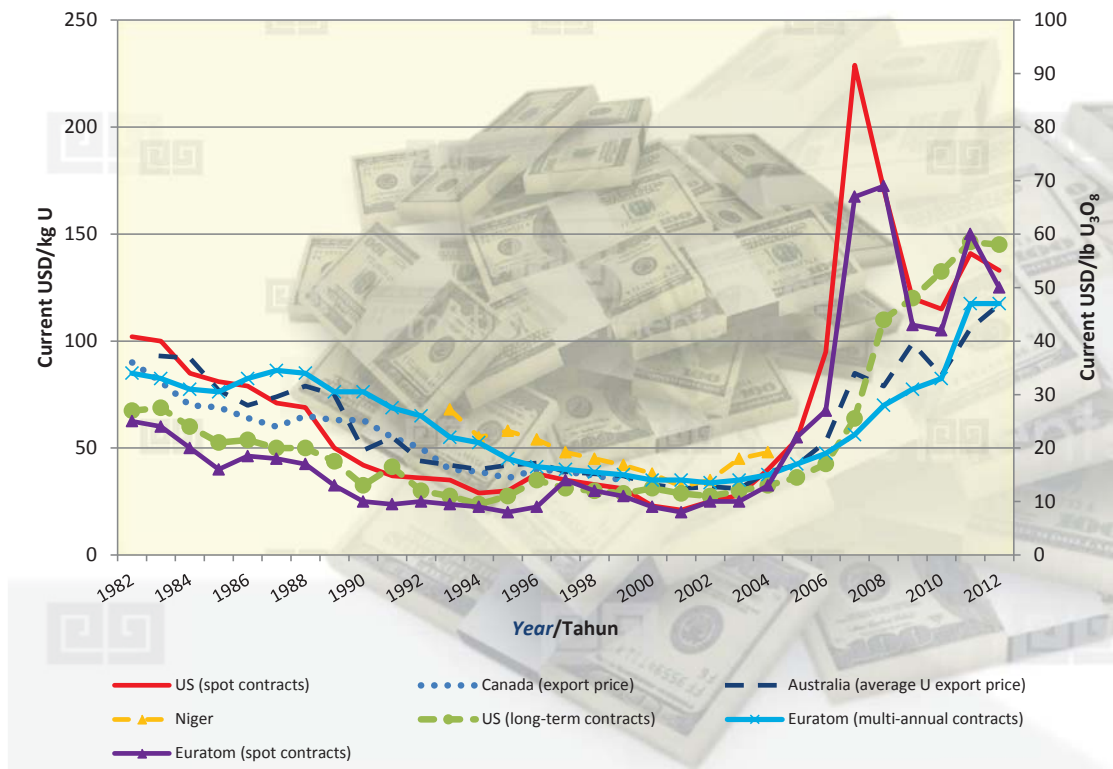
*Although the total capacity of nuclear power plants is the largest in the EU, the greatest need is in North America. It was caused by, after the Fukushima accident (in 2011), the discontinued operations of several nuclear power plants in the EU, especially in Germany, resulting in the reduction of uranium consumption.*

*East Asia in 2013 had total capacity of NPP as high as 83 GWe with uranium demand about 11,180 tonnes. Indonesia was grouped in East Asia for this case. To make the projection of NPP development in Indonesia, if uranium with burn-up of 45 GWd/tonne was assumed, then each additional 1,000 MWe would raise the uranium demand 200 tonnes/year.*

# PERKEMBANGAN HARGA URANIUM DAN PROYEKSI KEMAMPUAN PRODUKSI URANIUM DUNIA

## HISTORICAL URANIUM PRICE AND THE PROJECTION OF WORLD URANIUM CAPABILITY PRODUCTION

Harga Uranium: 1982-2012/  
Uranium Prices: 1982-2012



Country	2013		2015		2020		2025		2030		2035	
	A-II	B-II	A-II	B-II	A-II	B-II	A-II	B-II	A-II	B-II	A-II	B-II
Argentina	120	120*	150	150*	150	250	300*	300*	300*	300*	300*	300*
Australia	9 700	9 700	9 700	10 200	10 100	20 800	10 100	28 400	9 800	28 100	9 800	28 100
Brazil	340	340	340	340	1 600	2 000	1 600	2 000	2000*	2000*	2000*	2000*
Canada	16 430	16 430	17 730	17 730	17 730	19 000	17 730	19 000	17 730	19 000	17 730	19 000
China*	1 500	1 600	1 800	2 000	1 800	2 000	1 800	2 000	1 800	2 000	1 800	2 000
Czech Republic	500	500	500	500	50	50	50	50	50	50	30	30
Finland**	0	0	0	350	0	350	0	350	0	350	0	350
India*	610	610	740	740	1 080	1 200	1 200	1 600	1 200	2 000	1 200	2 000
Iran, Islamic Rep. of	70	70	90	90	90	120	100*	100*	100*	100*	100*	100*
Jordan*	0	0	0	0	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000	2 000
Kazakhstan	22 000	22 000	24 000	25 000	24 000	25 000	14 000	15 000	11 000	12 000	5 000	6 000
Malawi*	1 200	1 200	1 400	1 460	1 400	1 460	0	0	0	0	0	0
Mongolia*	0	0	0	500	150	1 000	150	1 000	150	1 000	150	1 000
Namibia*	6 000	6 000	10 000	10 000	15 700	15 700	16 100	16 100	16 100	16 100	12 000	12 000
Niger*	5 400	5 400	5 400	10 500	10 500	10 500	10 500	10 500	7 500	7 500	7 500	7 500
Pakistan**	70	70	70	110	140	150	140	150	140	650	140	650
Romania**	230	230	230	230	350	475	350	475	350	630	350	630
Russian Federation	3 135	3 135	3 920	3 970	4 140	4 180	5 520	7 250	5 180	10 830	4 900	9 900
South Africa*	540	540	1 100	1 380	1 540	3 180	1 360	3 000	1 185	2 830	890	2 530
Tanzania*	0	0	0	0	3 000	3 000	2 000	2 000	1 000	1 000	0	0
Ukraine	1 075	1 075	1 075	3 230	810	5 500	250	5 800	170	6 400	0*	6 400*
United States <sup>(1)</sup>	2 040	2 040	3 400	6 100	3 800	6 600	3 700	6 500	3 100	5 600	3 100	5 600
Uzbekistan	3 350	3 350	4 150	4 150	4 500	4 500	5 000	5 000	5 000*	5 000*	5 000*	5 000*
Zambia*	0	0	0	0	0	650	0	650	0	650	0	650
<b>Total</b>	<b>74 310</b>	<b>74 410</b>	<b>85 795</b>	<b>98 730</b>	<b>104 630</b>	<b>129 665</b>	<b>93 950</b>	<b>129 225</b>	<b>85 855</b>	<b>126 090</b>	<b>73 990</b>	<b>113 740</b>



## **PERKEMBANGAN HARGA URANIUM DAN PROYEKSI KEMAMPUAN PRODUKSI URANIUM DUNIA**

Harga uranium skema *spot contracts* mengalami perubahan besar, karena harga dibiarkan bebas. Sementara itu, untuk *multi annual contracts*, perubahan harganya lebih stabil, karena ada perjanjian untuk menstabilkan harga. Negara dengan sumber uranium akan memilih skema *spot price*, sedangkan negara tanpa sumber uranium memilih *multi annual contracts*.

Proyeksi kemampuan produksi uranium menggunakan 2 skenario: All dan BII. Skenario All menggunakan asumsi penambahan kapasitas produksi uranium yang telah direncanakan. Sementara itu, skenario BII menggunakan asumsi penambahan kapasitas produksi uranium, yaitu penambahan *committed* dan penambahan fasilitas potensial.

Sumber-daya uranium biaya <USD 40/kgU diproyeksikan akan habis pada tahun 2020. Sumber-daya uranium biaya <USD 80/kgU diperkirakan habis tahun 2033, jika tidak ditemukan sumber baru. Sumber-daya uranium biaya <USD 130/ kgU diperkirakan habis pada tahun 2087. Sumber-daya uranium biaya <USD 260/ kgU diperkirakan habis pada tahun 2110.

## **HISTORICAL URANIUM PRICE AND THE PROJECTION OF WORLD URANIUM CAPABILITY PRODUCTION**

*Uranium price for spot contract scheme has large changes, because the price is left free. Meanwhile, the price for multi-annual contracts of is more stable because there are agreements to stabilize prices. The countries that have uranium resources will choose spot price scheme while the state without a source of uranium will choose a multi- annual contracts.*

*The projection of uranium capability production was done by using two scenarios: All and BII. All scenario uses the assumption the addition of uranium production capacity as planned. Meanwhile BII scenario uses the assumption of the addition of uranium production capacity and potential facility as committed.*

*Uranium resource at a cost of <USD 40 /kgU will be exhausted in 2020. Uranium resources at a cost of < USD 80 / kgU will be exhausted in 2033. Uranium resources at a cost of < USD 130 / kgU will be exhausted in the year 2087. Uranium resources at a cost of < USD 260 / kgU will be exhausted in the year 2110.*

## **BANK BAHAN BAKAR URANIUM DIPERKAYA RENDAH (*LOW ENRICHED URANIUM/LEU*)**

Kazakhstan menandatangani perjanjian dengan IAEA untuk menjadi bank bahan bakar LEU (Low Enriched Uranium) Internasional pada tahun 2010. Penentuan lokasi bank tersebut memperhatikan faktor seperti: bahan bakar bank harus terletak di negara tanpa senjata nuklir dan sepenuhnya terbuka untuk inspektur IAEA. Bank bahan bakar LEU akan menjadi cadangan bahan bakar untuk setiap negara yang ingin mengembangkan energi nuklir. Selain dengan Kazakhstan, IAEA juga melakukan perjanjian dengan Rusia tentang proses transit LEU.

LEU IAEA didefinisikan sebagai LEU yang dimiliki oleh IAEA dalam bentuk uranium heksafluorida ( $UF_6$ ) dengan pengayaan nominal  $^{235}U$  4,95%. Bank LEU IAEA berarti cadangan fisik LEU IAEA dengan volume maksimal hingga 60 kontainer penuh jenis 30B. 30B mengacu pada 30-inch (75 cm) diameter setiap kontainer.

Pada November 2009, IAEA menyetujui proposal Rusia untuk menciptakan bank bahan bakar LEU. Bank tersebut didirikan satu tahun kemudian dengan 123 ton  $UF_6$  yang diperkaya 2,00% sampai 4,95%  $^{235}U$  yang tersedia untuk semua anggota IAEA dengan menggunakan skema spot price.

## ***LOW ENRICHED URANIUM (LEU) FUEL BANK***

*Kazakhstan signed an agreement with IAEA to put itself forward to host an international low enriched uranium (LEU) depository in 2010. The depository location is based on some particular factors such as that the country has no nuclear weapons and be fully open to IAEA inspectors. The 'fuel bank' will be an LEU reserve for any state wishing to develop nuclear energy. In addition to have an agreement with Kazakhstan, IAEA also has agreement with Russia for transit of LEU.*

*LEU of IAEA is defined as LEU owned by the IAEA in the form of uranium hexafluoride ( $UF_6$ ) with a nominal enrichment of  $^{235}U$  to 4.95%. IAEA LEU Bank means a physical reserve of IAEA LEU stored as a maximum volume of up to 60 full containers of the 30B type. 30B refers to the 30-inch (75 cm) diameter of each container.*

*In November 2009, the IAEA Board approved a Russian proposal to create an international fuel bank of LEU. This bank was established a year later and comprised 123 tonnes of LEU as  $UF_6$ , enriched between 2.0% and 4.95% U-235, available to any IAEA member state based on spot prices.*

## **JAMINAN PASOKAN BAHAN BAKAR NUKLIR IAEA**

Pada 3 Desember 2010, Dewan Gubernur IAEA memberi kewenangan pada Direktur Jenderal IAEA untuk mendirikan cadangan uranium atau bank uranium diperkaya rendah (bank uranium) IAEA. Bank uranium yang dimiliki dan dikelola oleh IAEA berfungsi untuk membantu memastikan pasokan LEU sebagai bahan bakar 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 uranium IAEA tanpa mengganggu pasar komersial. Langkah ini tidak bermaksud untuk mengurangi hak suatu negara untuk mengadakan atau mengembangkan produksi bahan bakar nuklirnya sendiri.

Sampai saat ini baru Kazakhstan yang secara resmi menyatakan minatnya. Untuk mematangkan keputusan dalam pemilihan lokasi, IAEA dan Pemerintah Kazakhstan merundingkan hal-hal teknis yang terkait dengan kelayakan dan keamanan bank uranium tersebut, seperti ditunjukkan pada <https://www.iaea.org/>

## **ASSURANCE OF SUPPLY FOR IAEA NUCLEAR FUEL**

*On 3 December 2010, the IAEA Board of Governors authorized the IAEA Director General to establish a reserve of low enriched uranium (LEU), or an IAEA LEU bank. Owned and managed by the IAEA, the IAEA LEU bank will help to assure a supply of LEU for nuclear power plant fuel.*

*Should an IAEA Member State's LEU supply to a nuclear power plant be disrupted, and the supply cannot be restored by the commercial market, State- to-State arrangements, or by any other such means, then it may call upon the IAEA LEU bank to secure LEU supplies, without distorting the commercial market. This initiative does not diminish in any way States' rights to establish or expand their own nuclear fuel production.*

*So far, Kazakhstan is the only Member State that has formally expressed its interest. To finalize the decision on selecting the site, the IAEA and the Government of Kazakhstan are discussing the relevant technical matters related with security and feasibility as indicated in <https://www.iaea.org/>*



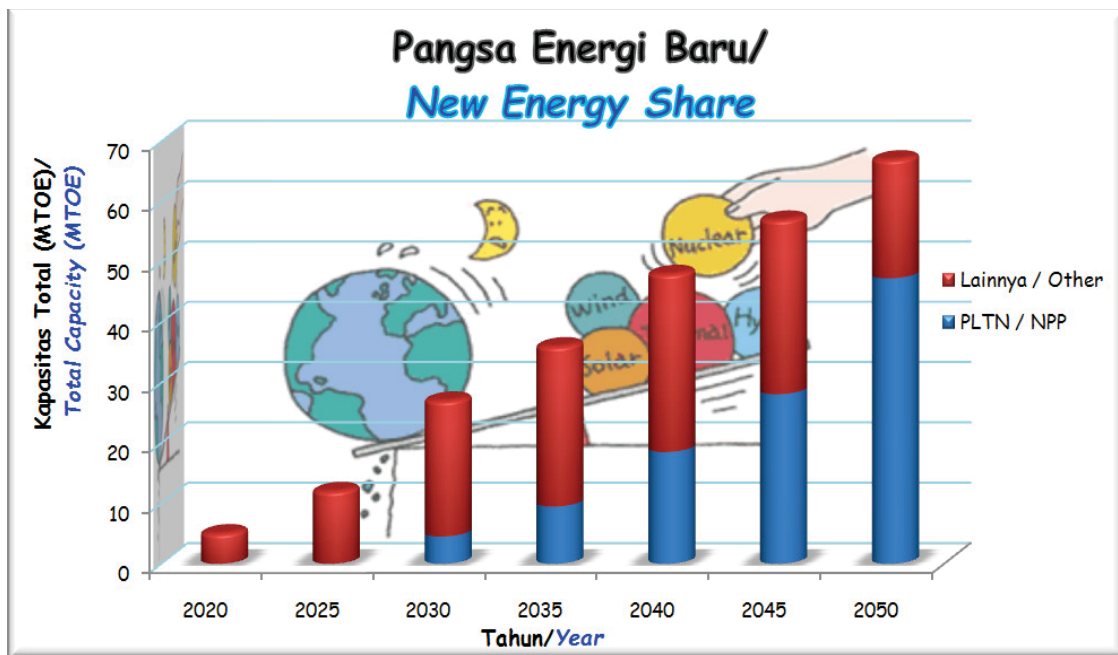
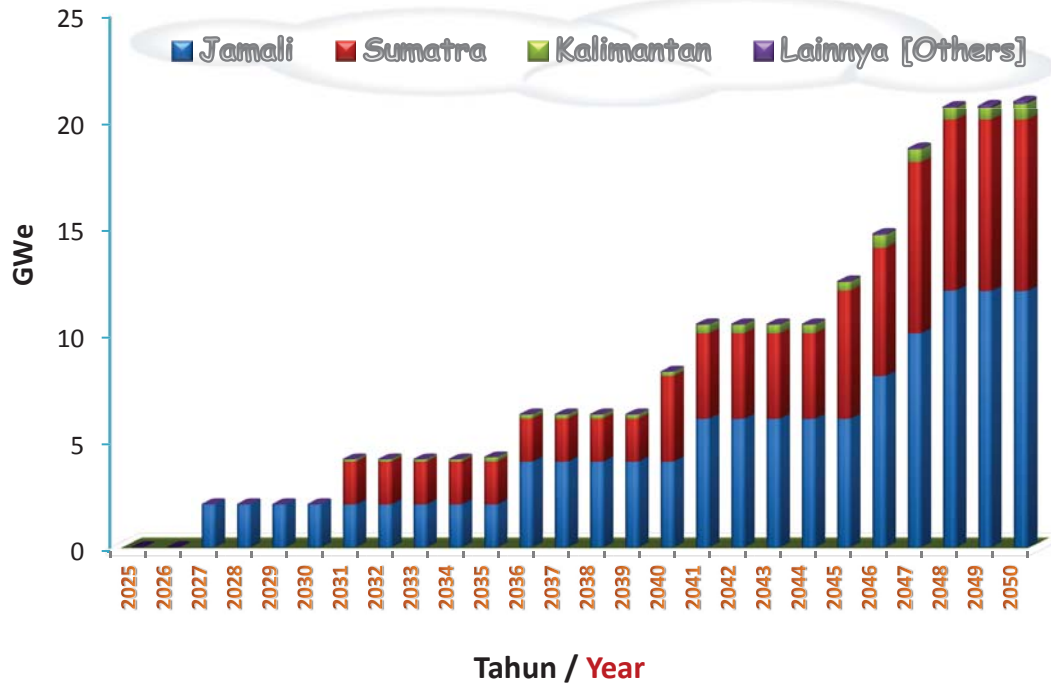


# PENYEDIAAN URANIUM UNTUK PLTN INDONESIA SAMPAI TAHUN 2050

*URANIUM SUPPLY FOR INDONESIA NPP*

*UP TO 2050*

**PROYEKSI TOTAL KAPASITAS PLTN**  
**TOTAL NPP CAPACITY PROJECTIONS**



## PROYEKSI TOTAL KAPASITAS PLTN

Outlook Energi Nuklir Indonesia berisi keseluruhan proyeksi pembangunan PLTN serta sarana dan prasarana pendukung yang terkait sampai tahun 2050. Sarana dan prasarana pendukung tersebut meliputi fasilitas penyedia bahan bakar nuklir.

Pertimbangan utama dalam penyusunan outlook ini adalah kebijakan bauran energi, kebijakan energi nasional, keinginan dalam menekan emisi karbon, jumlah tapak potensial PLTN dan target pangsa energi baru. Operasi PLTN diproyeksikan dimulai pada tahun 2027 dengan kapasitas 2x1.000 MWe, dimana dua unit tersebut berada dalam satu lokasi. Kapasitas PLTN diperkirakan akan mencapai 4,1 GWe pada tahun 2035 dan sekitar 21 GWe pada tahun 2050.

Energi baru berdasarkan PP No. 79 tahun 2014 mencakup energi nuklir fisi, CBM, hidrogen dan energi nuklir fusi. Proyeksi PLTN ini akan menyumbang pangsa energi baru yang diproyeksikan membutuhkan energi primer sebesar 5 MTOE pada tahun 2020 dan meningkat mencapai 67 MTOE pada tahun 2050. Energi nuklir diproyeksikan akan mendominasi pangsa energi baru pada tahun 2050.

## TOTAL NPP CAPACITY PROJECTIONS

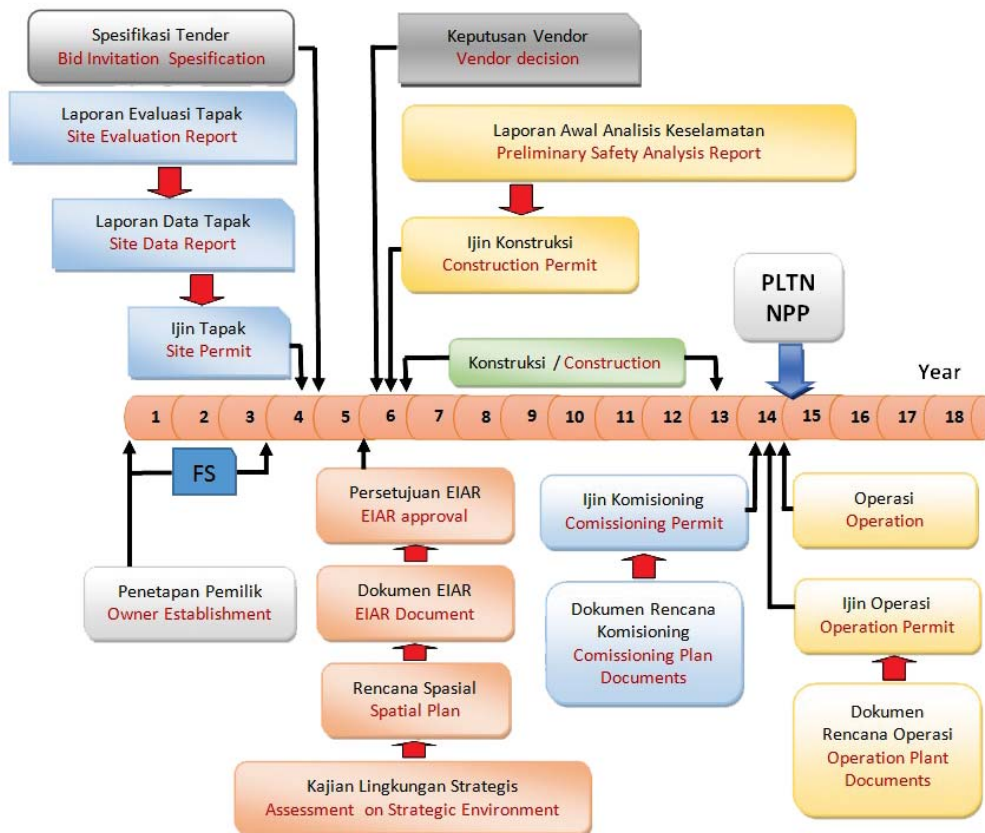
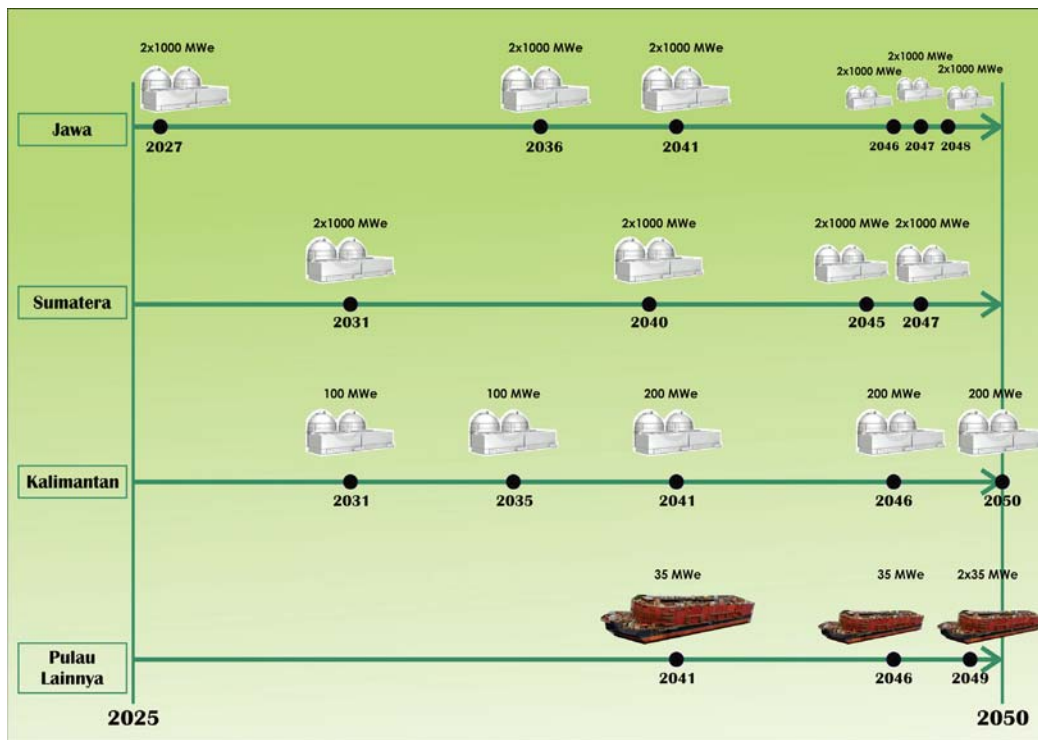
*Indonesian Nuclear Energy Outlook (INEO) contains the entire projected construction of a nuclear power plant and supporting infrastructure facilities until 2050. The supporting infrastructure includes a nuclear fuel supply facility.*

*The main consideration in establishing this outlook is the policy of the energy mix, national energy policy, the desire to reduce carbon emissions, the number of potential site of nuclear power plants and nuclear share target. The operation of NPP is projected to start in 2027 with a capacity of 2x1,000 MWe, two units located at the same site. The NPP generating capacity is estimated to reach 4.1 GWe in 2035 and about 21 GWe in 2050.*

*The new energy pursuant to the Government Regulation No. 79 Year 2014 includes fission nuclear energy, CBM, hydrogen and fusion nuclear energy. This projected NPP will contribute new energy share that is projected to require primary energy as high as 5 MTOE in 2020 and reach to 67 MTOE in 2050. It is projected that nuclear energy will predominate new energy share in 2050.*

# TAHAP OPERASI PLTN

## PHASE OF NPP OPERATIONS



Jadwal proyek PLTN /  
Project schedule of NPP



## **TAHAP OPERASI PLTN**

PLTN kapasitas besar (1.000 MWe) dipersiapkan untuk wilayah Jawa dan Sumatra, karena adanya kebutuhan listrik yang cukup besar dan jaringan transmisi yang memadai. PLTN kapasitas besar untuk Jawa diproyeksikan akan beroperasi pada tahun 2027, 2036, 2041, 2046, 2047, dan 2048. PLTN untuk Sumatra diproyeksikan beroperasi pada tahun 2031, 2040, 2045, dan 2047. PLTN ukuran mini (*Small Medium Reactor/SMR*) untuk Kalimantan diproyeksikan pada tahun 2031, 2035, 2041, 2046, dan 2050. PLTN mini dengan ukuran 35 MWe untuk pulau lainnya diproyeksikan pada tahun 2041, 2046, dan 2049.

Indonesia, yang merupakan negara kepulauan, memiliki banyak daerah yang belum menerima aliran listrik, terutama pada daerah yang belum terkoneksi jaringan listrik. PLTN mini dimungkinkan beroperasi untuk area terisolasi tersebut. PLTN mini dapat diimplementasikan untuk tujuan komersil maupun militer. PLTN mini dapat digunakan di militer, seperti untuk memenuhi kebutuhan listrik barak untuk tentara, radar, dan landasan udara untuk pesawat.

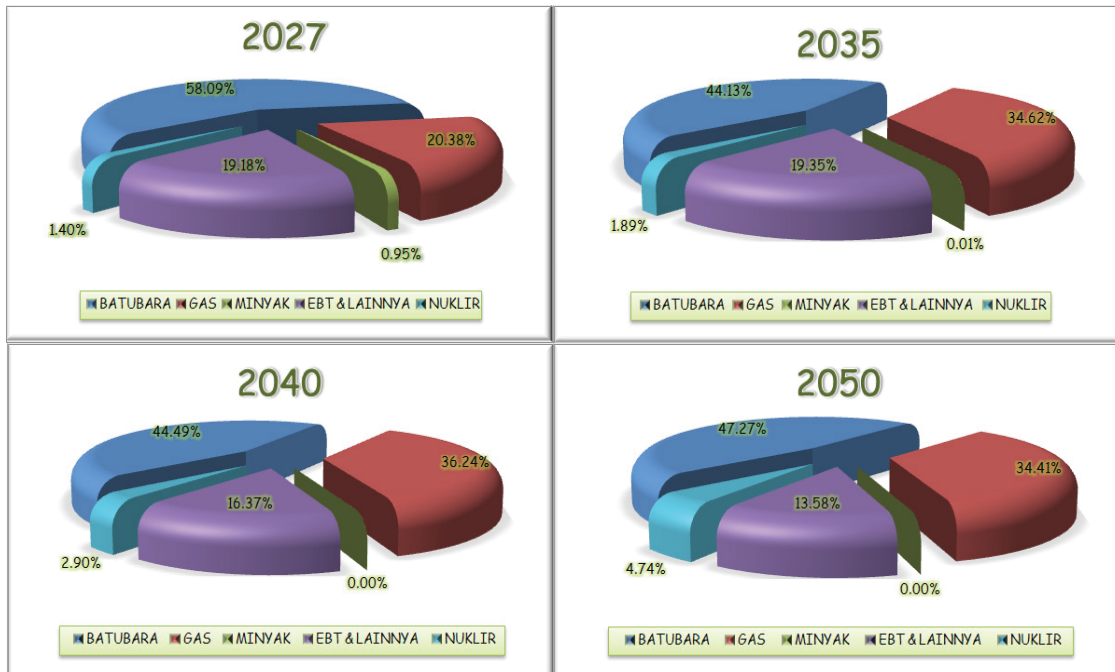
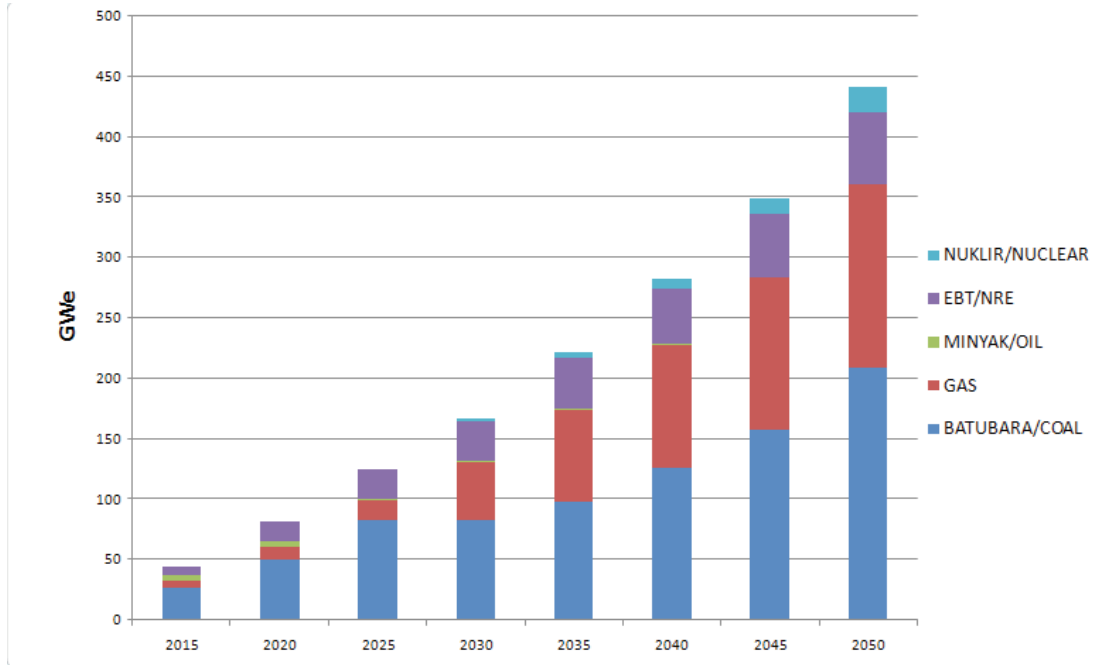
## **PHASE OF NPP OPERATIONS**

*A large NPP capacity (1,000 MWe) is prepared for Java and Sumatra because electricity demand is quite large and the capable transmission network is already available. Large capacity NPP for Java is projected to operate in 2007, 2036, 2041, 2046, 2047 and 2048. The NPP for Sumatera is projected to operate in 2031, 2040, 2045 and 2047. Small and Medium Reactors (SMRs) for Borneo are projected in 2031, 2035, 2041, 2046 and 2050. Very small NPP with capacity of 35 MWe for other islands are projected in 2041, 2046 and 2049.*

*Indonesia, which is an archipelago country, has many areas, especially those not connected to transmission network, that have not been electrified. Very small NPP is possible to operate in those isolated areas. Very small NPP can be deployed for either commercial or military purposes. Very small NPP can be used in military, such as to meet electricity demand in military barrack, radar, and aircraft runway.*

# PANGSA KAPASITAS PLTN

## NPP CAPACITY SHARE



Proyeksi pangsa PLTN terhadap pembangkit lain /

*Projection of NPP share among other power plant*

## **PANGSA KAPASITAS PLTN**

Kapasitas total pembangkit listrik baik PLN maupun non-PLN pada tahun 2025 diproyeksikan akan mencapai sekitar 120 GW dan pada tahun 2050 mencapai sekitar 480 GWe. Secara keseluruhan, akan terjadi peningkatan kapasitas pembangkitan listrik nasional hingga 9,9 kali pada tahun 2050 dibandingkan dengan kapasitas pada tahun 2015. Pertumbuhan kapasitas pembangkit terjadi dengan laju rata-rata 7,5% per tahun dari tahun 2015 sampai tahun 2050. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa pembangkit berbahan bakar batubara tetap mendominasi sampai tahun 2050 dengan total kapasitas sebesar 198 GW.

PLTN akan mulai memberikan pangsa pada kapasitas total pembangkit listrik mulai tahun 2027 sebesar 1,4%. Pangsa PLTN mengalami kenaikan pada tahun 2035 menjadi 1.89% dan akan mencapai 4,7% pada tahun 2050. Nilai pangsa pada tahun 2050 tersebut setara dengan 21 GWe dengan memanfaatkan seluruh tapak potensial yang ada. PLTN pertama diperkirakan beroperasi tahun 2027 dan memberikan pangsa sekitar 1,4%.

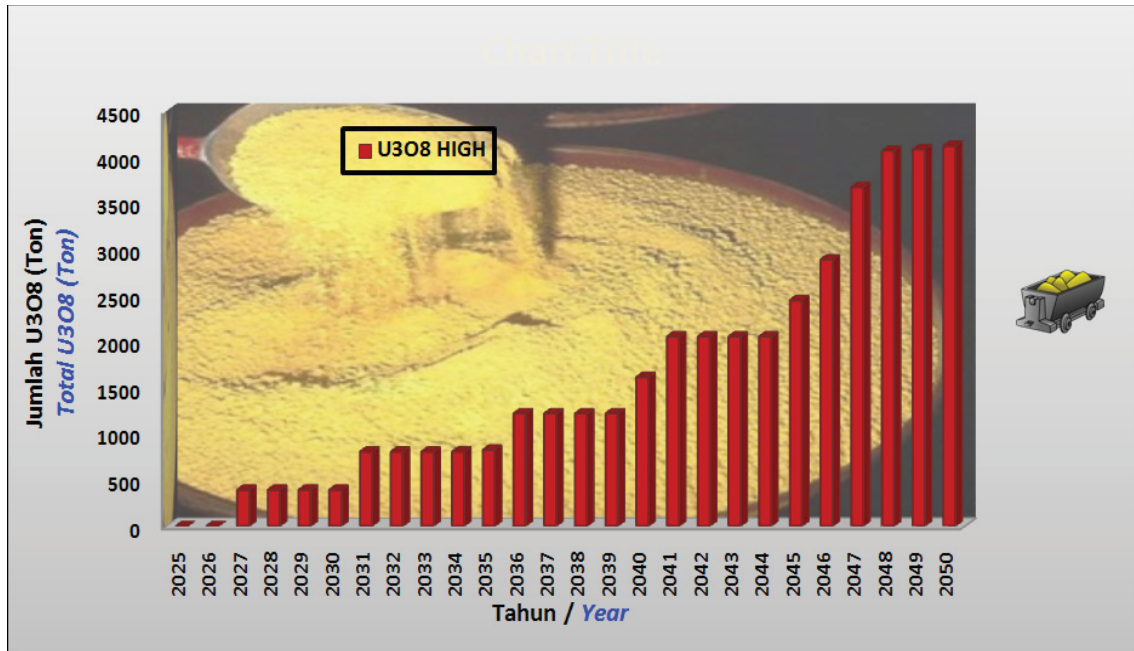
## **NPP CAPACITY SHARE**

*The total generating capacity both State-owned Electricity Company (PLN) and non PLN is projected to reach 120 GWe in 2025 and 480 GWe in 2050. Overall, there will be an increase in national generating capacity up to 9.9 times of the capacity in 2015. The growth of generating capacity occurs at a rate of 7.5% in average per year from 2015 to 2050. The results of projection indicate that coal power plant will still be predominant until 2050 with total capacity of 198 GW.*

*NPP will start to contribute a share to total generating capacity of about 1.4% in 2027. NPP share will increase in 2035 to 1.89% and reach 4.7% in 2050. This figure in 2050 is equivalent to 21 GWe by using all existing potential sites. The first NPP is estimated to operate in 2027 and contribute a share of about 1.4%.*

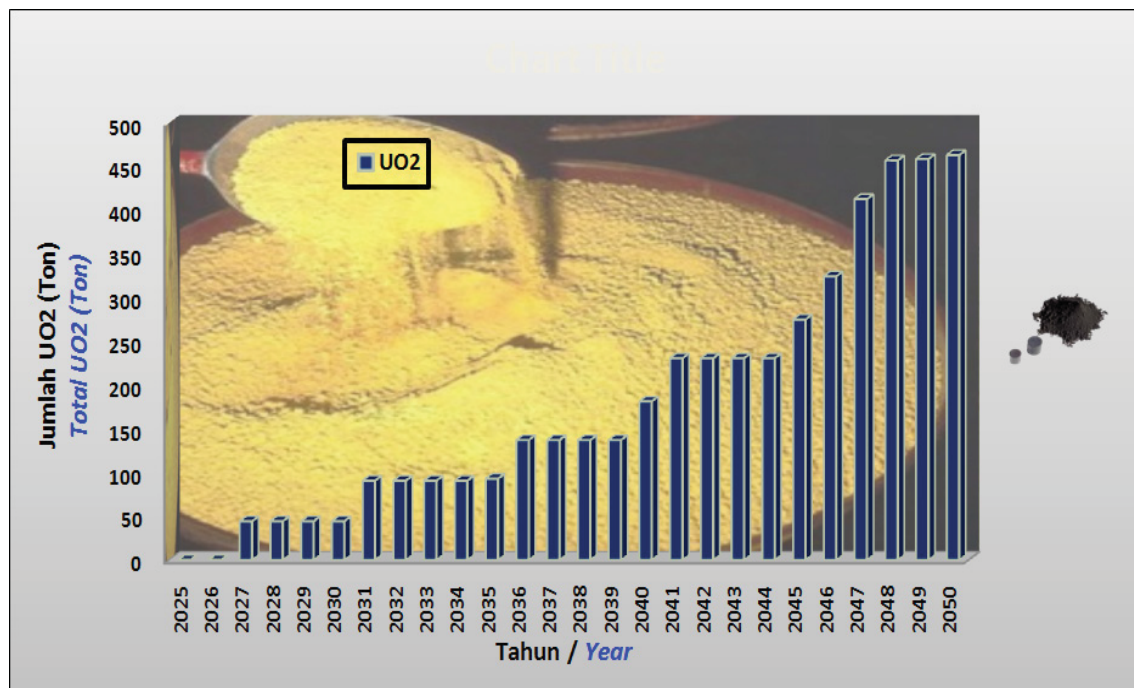
## KEBUTUHAN URANIUM

### URANIUM DEMAND



Kebutuhan uranium alam/

*Demand of natural uranium*



Kebutuhan uranium diperkaya /

*Demand of enriched uranium*

## KEBUTUHAN URANIUM

Pengoperasian 1 unit PLTN LWR kapasitas 1.000 MWe dengan waktu operasi rata-rata 90% dan *burn-up* bahan bakar sebesar 45 GWd/ton akan membutuhkan bahan bakar uranium diperkaya sekitar 22 ton setiap tahunnya. Dengan demikian, untuk PLTN pertama yang beroperasi pada tahun 2027 yang berkapasitas 2x1.000 MWe, akan dibutuhkan sekitar 44 ton uranium diperkaya. Pada tahun 2050 dimana kapasitas total PLTN hampir mencapai 21 GWe, akan dibutuhkan sekitar 462 ton uranium diperkaya.

Kebutuhan uranium alam dalam bentuk yellow cake ( $U_3O_8$ ) berbanding lurus dengan kebutuhan uranium diperkaya. Satu unit PLTN 1000 MWe membutuhkan sekitar 198 ton uranium alam dalam bentuk yellow cake. Kebutuhan yellow cake untuk tahun 2027 dengan kapasitas PLTN 2x1.000 MWe diproyeksikan sekitar 398 ton. Kebutuhan uranium dalam bentuk yellow cake diproyeksikan akan meningkat sampai sekitar 4.200 ton pada tahun 2050, ketika kapasitas terpasang mencapai sekitar 21 GWe.

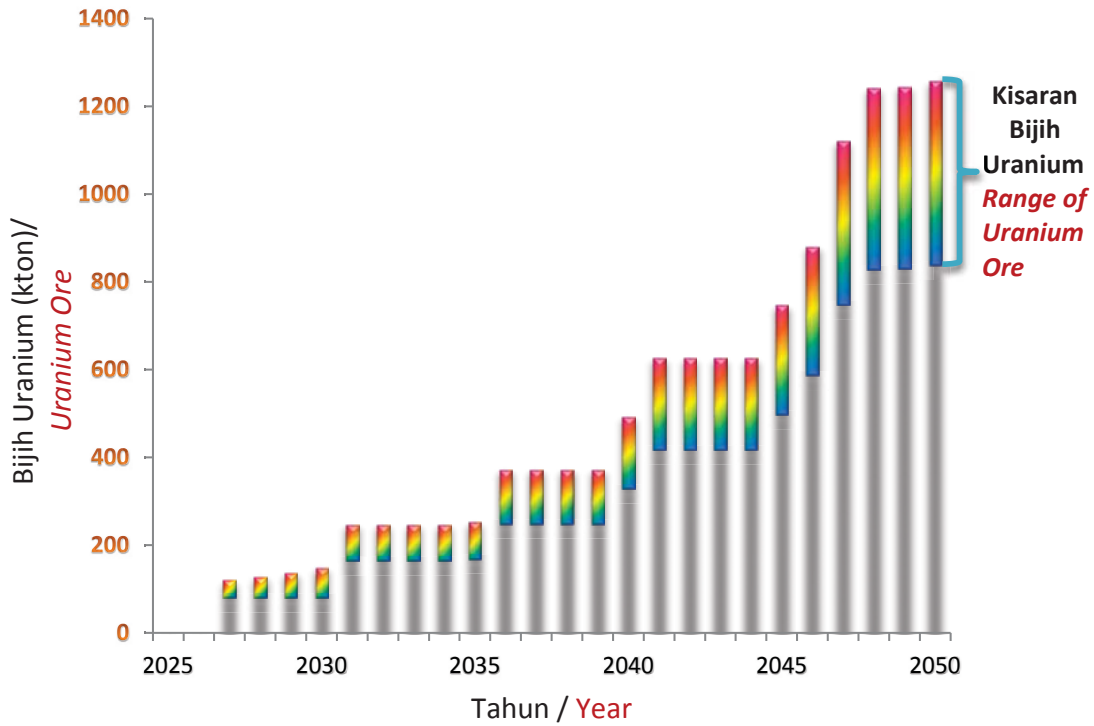
## URANIUM DEMAND

*Operation of 1,000 MWe LWR NPP with 90% availability and 45 GWd/tonne burn-up will require about 22 tonnes of enriched uranium per year. Therefore, for the first NPP operating in 2027 with capacity of 2x1,000 MWe, about 44 tonnes of enriched uranium is needed. In 2050 when the total generating capacity of NPP reaches 21 GWe, about 462 tonnes of enriched uranium is required.*

*The need of natural uranium in the form of yellow cake ( $U_3O_8$ ) is proportional to the need of enriched uranium. The need of yellow cake in 2027 for 2x1,000 MWe NPP is projected about 398 tonnes. The need of yellow cake is predicted to increase to about 4,200 tonnes in 2050 when the installed capacity reaches 21 GWe.*

# KEBUTUHAN BIJIH URANIUM

## URANIUM ORE DEMAND



## **KEBUTUHAN BIJIH URANIUM**

Setiap PLTN dengan kapasitas 1.000 MWe membutuhkan bijih uranium setara dengan 40.000 sampai 200.000 ton per tahun, tergantung pada kadar uranium dalam bijih tersebut. Berdasarkan rentang nilai tersebut, dapat diproyeksikan bahwa pada tahun 2035 kebutuhan bijih uranium hampir mencapai 200.000 ton, sedangkan pada tahun 2050 dengan kapasitas total PLTN sekitar 21 GWe akan membutuhkan bijih uranium lebih dari 800.000 ton.

Untuk memenuhi kebutuhan bijih uranium ini, tidak harus mengandalkan cadangan uranium Indonesia saja, karena penambangan bijih uranium di beberapa negara lebih ekonomis. Pada umumnya negara-negara yang membutuhkan uranium untuk bahan bakar PLTN lebih memilih untuk membeli uranium di pasar internasional karena harganya lebih kompetitif.

Eksplorasi bijih uranium di Indonesia saat ini belum dilaksanakan, karena belum adanya kebutuhan. Aktivitas terkait dengan potensi uranium di Indonesia masih dalam tahap eksplorasi oleh BATAN. Sementara itu, untuk bijih thorium, BATAN sedang melaksanakan penelitian dan pengembangan pengolahan bijih thorium di Bangka Belitung.

## **URANIUM ORE DEMAND**

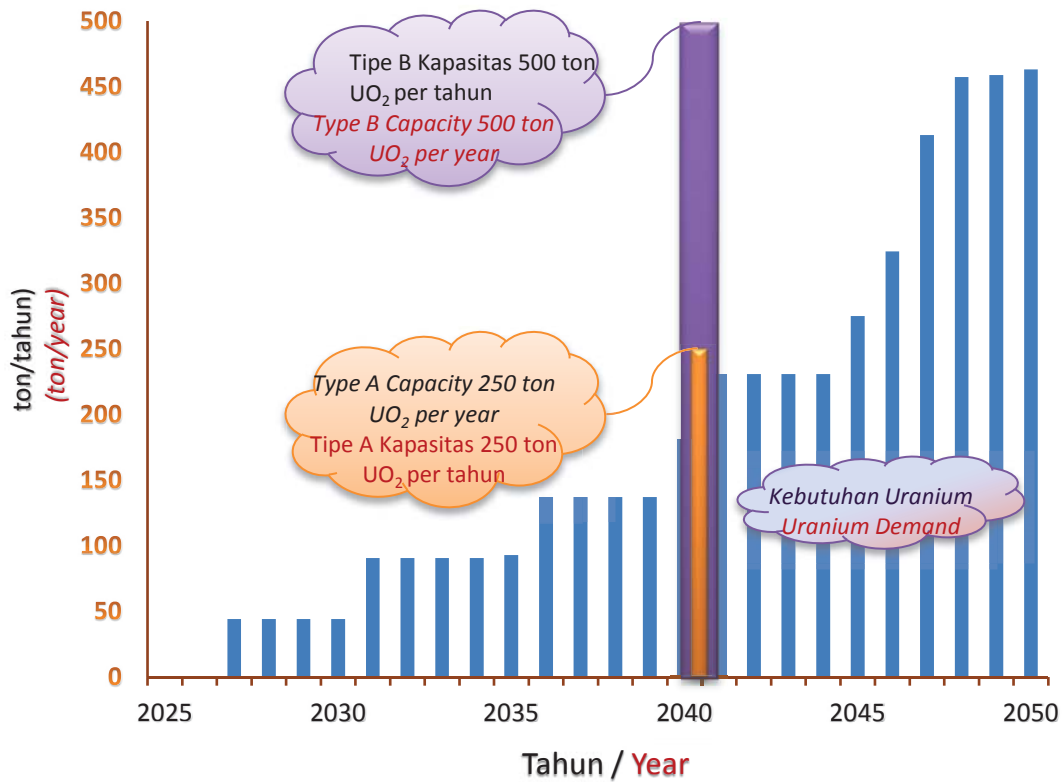
*Every nuclear power plant with a capacity of 1,000 MWe will need uranium ore equivalent to 40,000 to 200,000 tonnes of uranium depending on the uranium concentration in the ore. Based on this range, it can be estimated that in 2050 the need of uranium ore reaches 200,000 tonnes, while in 2050 when the total NPP capacity is 21 GWe the need of uranium ore is estimated over 800,000 tonnes.*

*To meet the uranium ore demand, it does not have to rely only on Indonesia's uranium resources, because uranium ore mining in other countries is more economical than that in Indonesia. In general, countries requiring uranium for their NPP fuel prefer to buy uranium from international market, because its price is competitive.*

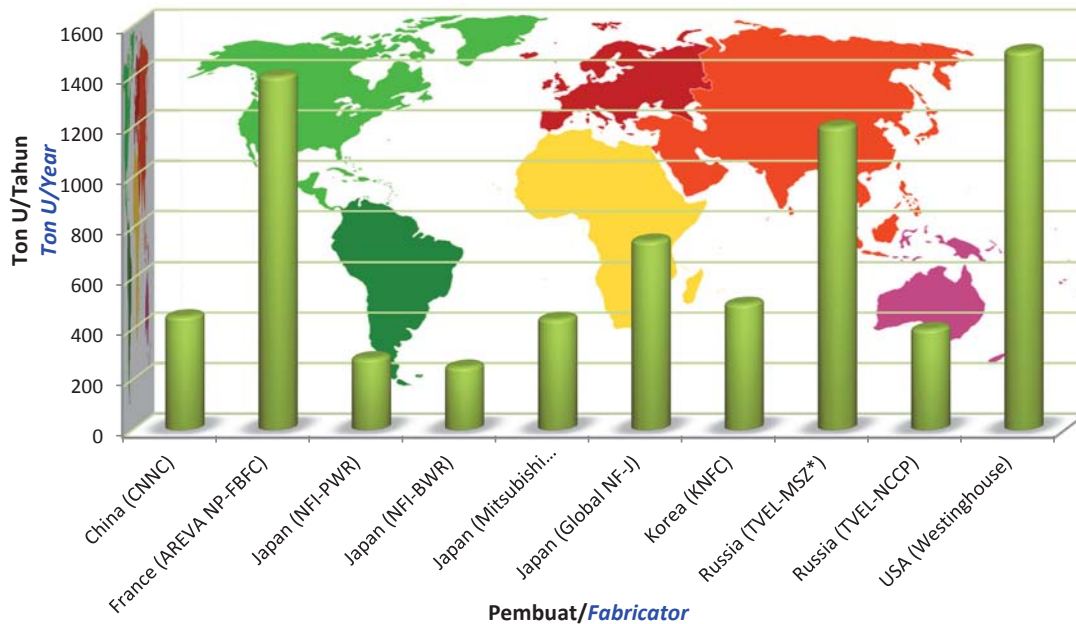
*Exploitation of uranium ore in Indonesia has not been carried out yet due to no demand. The uranium potential related activities in Indonesia are still in exploration phase by BATAN. Meanwhile, for thorium ore, BATAN is at present conducting research and development on thorium ore in Bangka Belitung.*

## PENYEDIAAN FASILITAS FABRIKASI

### CONSTRUCTION OF FABRICATION FACILITY



### Kapasitas Produksi Fasilitas Fabrikasi Dunia/ *Production Capacity of World Fabrication Facility*





## **PENYEDIAAN FASILITAS FABRIKASI**

Kebutuhan bahan bakar nuklir yang makin meningkat seiring dengan bertambahnya unit PLTN mengharuskan pembangunan fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir. Berdasarkan perhitungan, kebutuhan bahan bakar nuklir pada tahun 2027 sebesar 44 ton. Jumlah ini dinilai belum layak untuk pembangunan suatu fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir.

Fasilitas fabrikasi yang sesuai untuk Indonesia mengacu pada fasilitas fabrikasi yang telah beroperasi di wilayah Asia Timur, seperti di Jepang dan Korea. Jepang memiliki fasilitas fabrikasi dengan berbagai kapasitas produksi, salah satunya fasilitas fabrikasi NFI (*Nuclear Fuel Industries*) dengan kapasitas 250 ton bahan bakar nuklir pertahun. Korea memiliki instalasi fabrikasi KNFC (*Korean Nuclear Fuel Company*) dengan kapasitas 500 ton bahan bakar nuklir pertahun.

Dengan mengacu pada kapasitas produksi kedua negara tersebut, Indonesia layak membangun fasilitas fabrikasi pada tahun 2041, ketika kebutuhan bahan bakar mencapai sekitar 220 ton yang setara dengan kapasitas PLTN 8–10 GWe. Pembangunan fasilitas fabrikasi bahan bakar nuklir akan meningkatkan kontribusi partisipasi nasional.

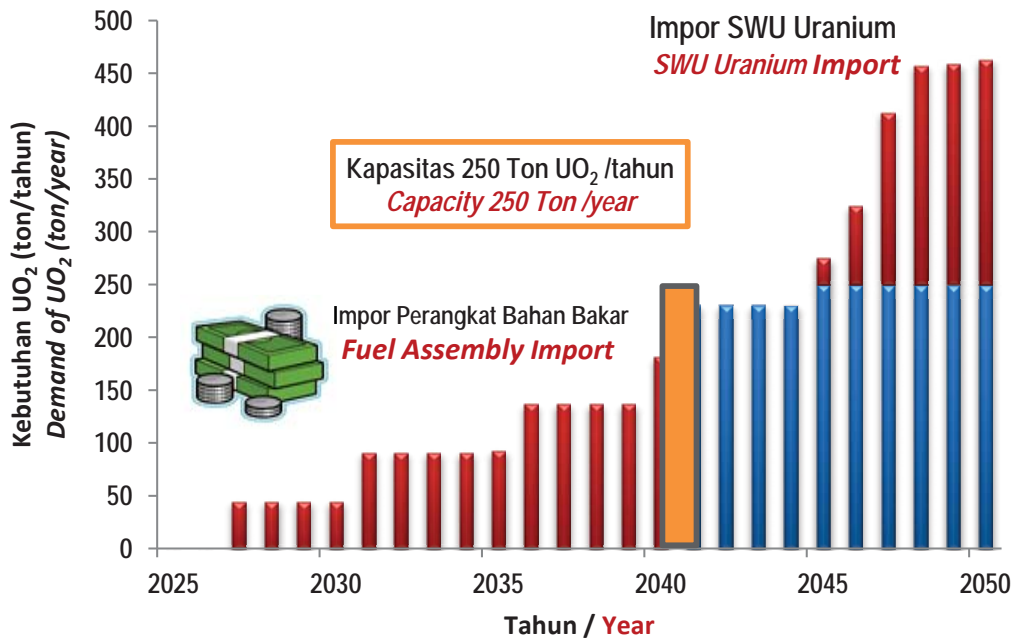
## **CONSTRUCTION OF FABRICATION FACILITY**

*An increase in nuclear fuel demand along with the increasing NPP units requires the construction of nuclear fuel fabrication facility. Based on calculation, nuclear fuel demand in 2027 will reach 44 tonnes. This figure is considered not feasible to construct a nuclear fuel fabrication facility.*

*Fabrication facility suitable for Indonesia will refer to the installation of fabrication that has been operating in East Asia, as in Japan and Korea. Japan has a fabrication facility with different production capacities, one of which is Nuclear Fuel Installation with capacity of 250 tonnes of nuclear fuel annually. Korea has a fabrication plant KNFC (Korean Nuclear Fuel Company) with a capacity of 500 tonnes of nuclear fuel per year.*

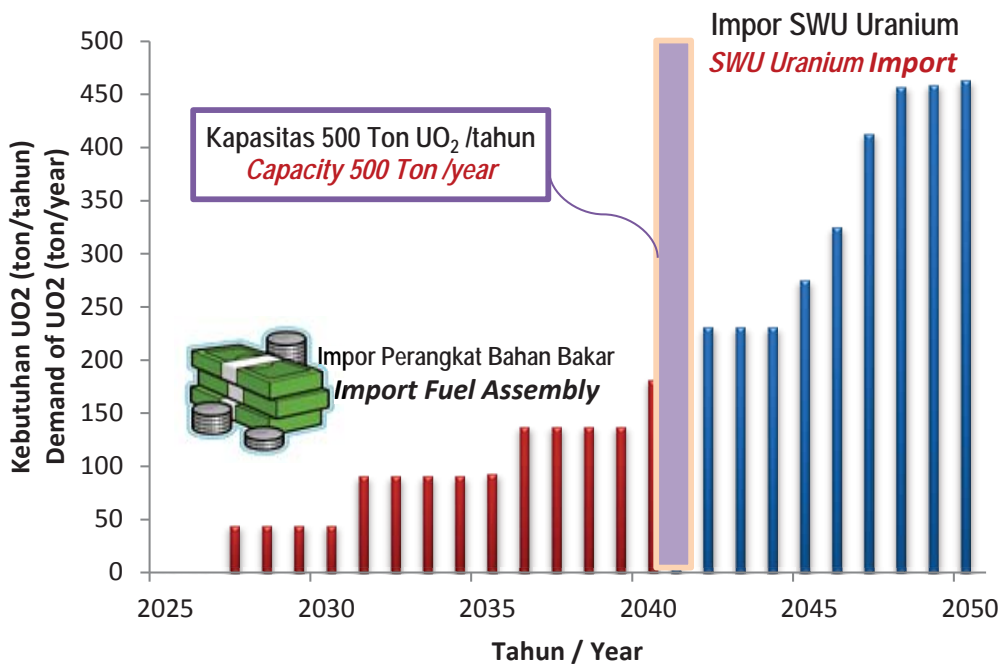
*Referring to the production capacities of these two countries, it will be feasible for Indonesia to construct a fuel fabrication facility in 2041 when the nuclear fuel demand reaches 220 tonnes, which is equivalent to NPP capacity of 8 – 10 GWe. The construction of a nuclear fuel fabrication plant will increase the contribution of national participation.*

**PROYEKSI IMPOR URANIUM**  
**URANIUM IMPORT PROJECTION**



Skenario penyediaan bahan bakar uranium untuk pabrikasi berkapasitas 250 ton per tahun /

*Scenario for providing uranium fuel for fabrication with capacity 250 ton per year*



Skenario penyediaan bahan bakar uranium untuk pabrikasi berkapasitas 500 ton per tahun /

*Scenario for providing uranium fuel for fabrication with capacity 500 ton per year*

## PROYEKSI IMPOR URANIUM

Untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar nuklirnya, Indonesia akan mengimpor bahan bakar uranium. Impor dalam bentuk perangkat bahan bakar siap pakai dilakukan selama Indonesia belum memiliki fasilitas fabrikasi. Impor ini akan berlangsung dari tahun 2027 sampai tahun 2040. Impor dalam bentuk uranium diperkaya (HF<sub>6</sub>) dimulai pada tahun 2041, ketika fasilitas fabrikasi telah berproduksi.

Setelah tahun 2041, ada dua skenario yaitu membangun fasilitas fabrikasi bahan bakar berkapasitas 250 ton/ tahun dan fasilitas fabrikasi berkapasitas 500 ton/tahun. Untuk skenario dengan kapasitas 250 ton/tahun, Indonesia akan mengimpor dalam bentuk uranium diperkaya (HF<sub>6</sub>) dengan nilai sekitar 230 ton per tahun dari tahun 2041 sampai 2044 dan sebesar 250 ton pertahun mulai tahun 2045. Sisa kebutuhan uranium akan diimpor dalam bentuk perangkat bahan bakar siap pakai sampai tahun 2050.

Untuk skenario dengan fasilitas fabrikasi berkapasitas 500 ton/tahun, Indonesia mulai tahun 2041 akan mengimpor seluruh bahan bakar PLTN dalam bentuk uranium diperkaya (HF<sub>6</sub>) yang diperkirakan mencapai sekitar 470 ton pada tahun 2050.

## URANIUM IMPORT PROJECTION

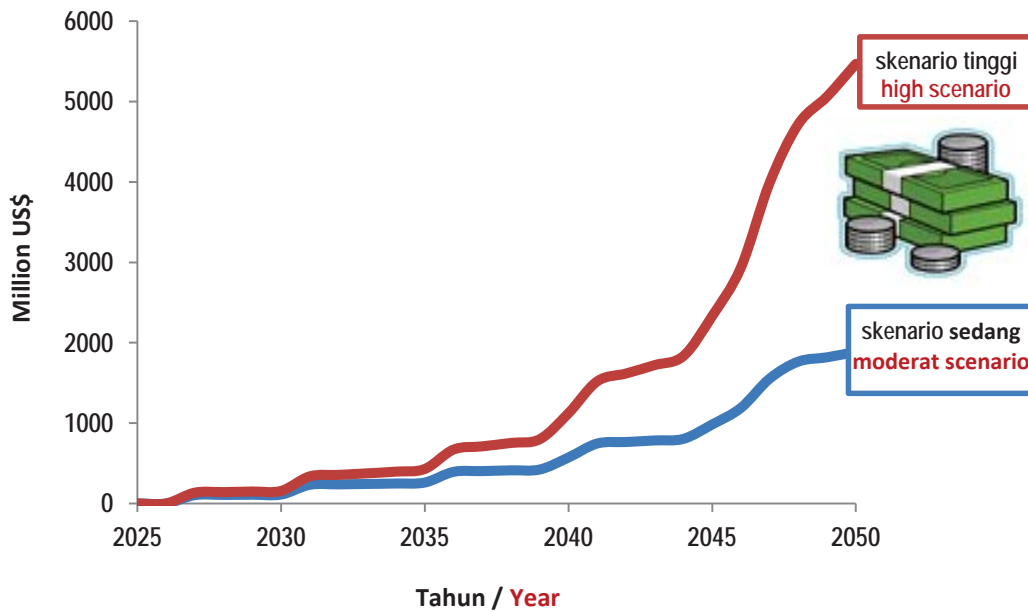
*In order to fulfill the needs of the nuclear fuel, Indonesia would import enriched uranium. The ready-to-use fuel assemblies will be imported as long as Indonesia has not had a nuclear fuel fabrication facility.. This import will be carried out from 2027 to 2040. Import of enriched uranium (HF<sub>6</sub>) will be started in 2041 when a fuel fabrication facility will have been in production.*

*After 2041, there are two scenarios, i.e. constructing nuclear fuel facility with capacity of 250 tonnes/year and of 500 tonnes/year. For the scenario of constructing 250 tonnes/year fabrication facility, Indonesia will import enriched uranium (HF<sub>6</sub>) as high as 231tonnes per year from 2041 to 2044 and 250 tonnes per year since 2045. The remaining demand will be fulfilled with the import of ready-to-use fuel assemblies until 2050.*

*For the scenario of constructing 500 tonnes/year fabrication facility, Indonesia will import in 2041 all NPP fuel in the form of enriched uranium (HF<sub>6</sub>), which is estimated to reach 470 tonnes in 2050.*

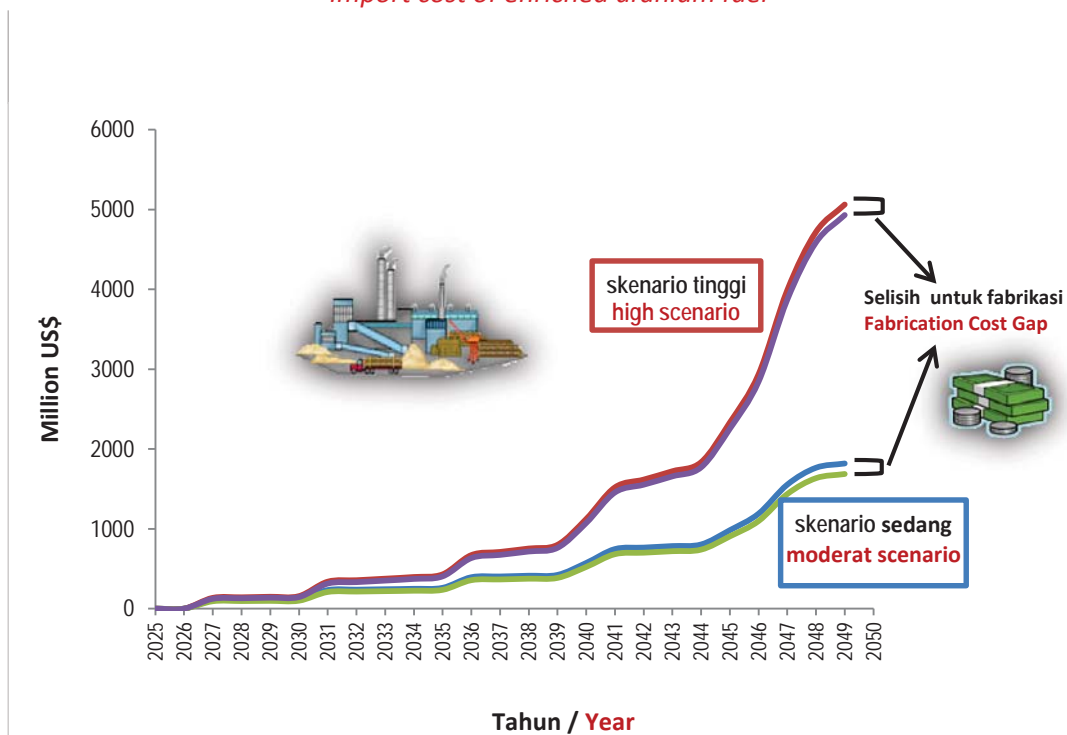
# PROYEKSI BIAYA IMPOR URANIUM

## URANIUM IMPORT COST PROJECTION



Biaya import bahan bakar dalam bentuk uranium diperkaya /

*Import cost of enriched uranium fuel*



Biaya import bahan bakar uranium dalam bentuk pelet uranium siap pakai /

*Import cost of pelet uranium fuel*

## PROYEKSI BIAYA IMPOR URANIUM

Biaya total bahan bakar uranium merupakan total biaya uranium alam (U3O8) ditambah dengan biaya proses konversi, proses pengayaan dan proses fabrikasi. Impor dalam bentuk perangkat bahan bakar siap pakai berarti membeli dengan harga senilai biaya total tersebut. Impor dalam bentuk uranium diperkaya (HF6) akan mengurangi biaya impor untuk proses fabrikasi, dimana selisih biaya tersebut akan diserap dalam negeri karena telah memiliki fasilitas fabrikasi.

Perhitungan biaya impor berdasarkan proyeksi harga uranium U3O8, biaya konversi, pengayaan dan fabrikasi. Proyeksi harga U3O8 menggunakan skenario IAEA (tinggi dan sedang) yang mempertimbangkan supply-demand uranium di pasar dunia. Tahun 2027 biaya impor total untuk 2x1.000 MWe PLTN sekitar 104 juta USD untuk skenario sedang atau 135 juta USD untuk skenario tinggi.

Total biaya impor pada tahun 2050 dengan total kapasitas sekitar 21 GWe diperkirakan mencapai sekitar 1,9 miliar USD untuk skenario sedang atau mencapai 5,5 miliar USD untuk skenario tinggi. Nilai tukar dolar berdasarkan awal tahun 2015 sekitar Rp 13.000 per dolar.

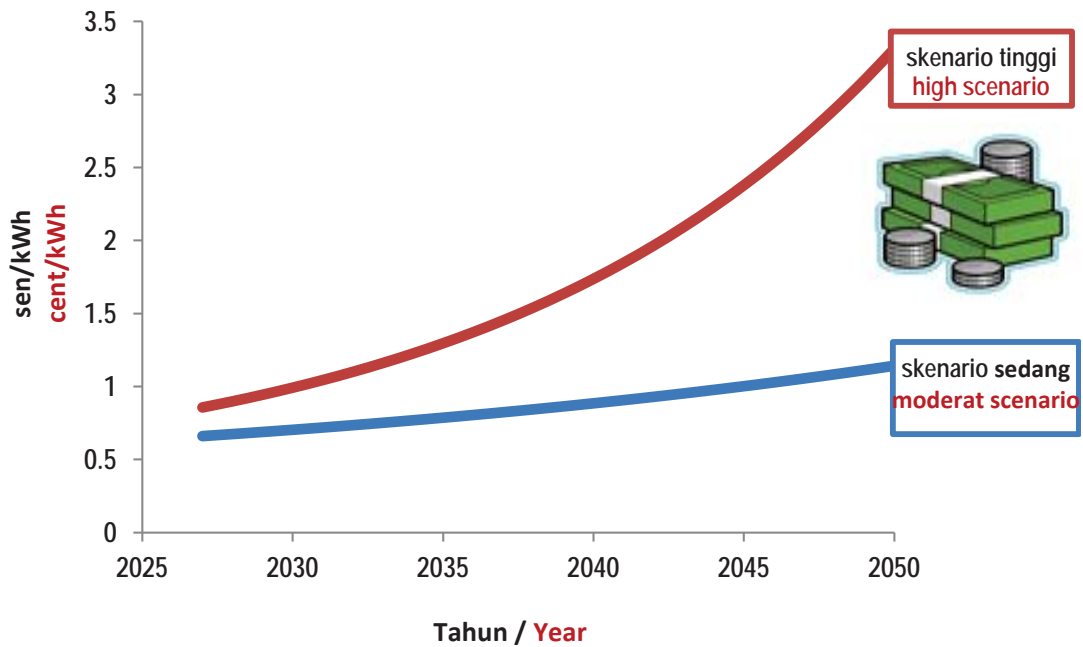
## URANIUM IMPORT COST PROJECTION

*Total uranium fuel cost is the accumulated cost of natural uranium (U3O8) added with the cost of conversion, enrichment and fabrication processes. Import in the form of ready-to-use fuel means buying at a price equivalent to the total cost. Imports in the form of enriched uranium (HF6) will reduce the cost of fabrication, in which the difference in cost will be absorbed in the country because of the availability of fabrication facility.*

*The calculation of import cost is based on projected price of uranium U3O8, the costs of conversion, enrichment and fabrication. The price projection of U3O8 uses IAEA scenarios (high and medium scenario) considering supply-demand of uranium in the world market. In 2027, the cost of imports for 2x1,000 MWe nuclear power plant is about 104 million USD for the moderate scenario or 135 million USD for the high scenario.*

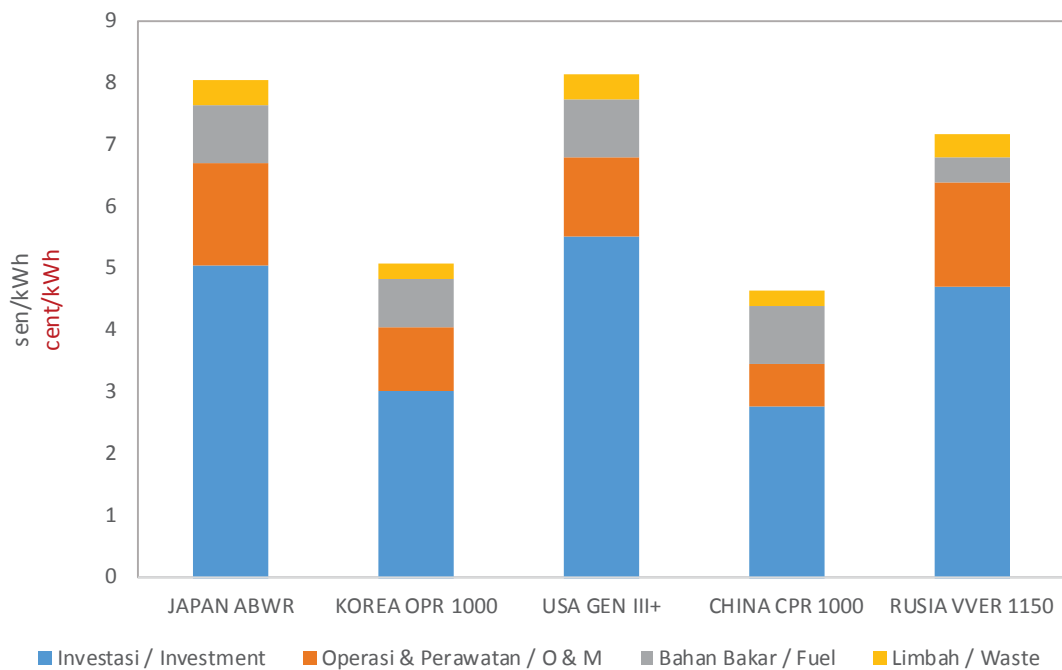
*Total cost of imports in the year 2050 with a capacity of almost 21 GWe is approximately 1.9 billion USD for the moderate scenario or 5.5 billion USD for the high scenario. The USD exchange rate is based on early 2015 rate, Rp. 13,000 per USD.*

## PROYEKSI BIAYA BAHAN BAKAR UNTUK PEMBANGKITAN LISTRIK FUEL COST PROJECTION FOR ELECTRICITY GENERATION



Proyeksi biaya bahan bakar uranium untuk pembangkitan listrik /

*Fuel cost projection for electricity generation*



Total biaya untuk pembangkitan listrik berbagai PLTN /

*Total cost of electricity generation for several NPP*

## **PROYEKSI BIAYA BAHAN BAKAR UNTUK PEMBANGKITAN LISTRIK**

Biaya bahan bakar untuk pembangkitan adalah biaya penyediaan bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 kwh. Biaya tersebut dapat dihitung berdasarkan rasio biaya total bahan bakar per tahun terhadap besarnya total energi listrik rata-rata yang dihasilkan pertahun. Nilai biaya bahan bakar untuk pembangkitan pada PLTN sekitar 10% dari biaya pembangkitan total.

PLTN dengan kapasitas 1.000 MWe dan waktu operasi rata-rata per tahun sekitar 90%, menghasilkan listrik total sebesar 7,9 TWh (*Tera Watt hours*). Biaya bahan bakar untuk pembangkitan PLTN yang pertama pada tahun 2027 dihitung berdasarkan biaya total bahan bakar 2x1.000 MWe dibagi total energi terbangkitkan 2x7,9 TWh. Biaya bahan bakar pembangkitan diperoleh sekitar 0,66 sen/kwh untuk skenario sedang atau 0,86 sen/kwh untuk skenario tinggi.

Biaya bahan bakar untuk pembangkitan pada tahun 2050 dengan total kapasitas sekitar 21 GWe diperkirakan mencapai sekitar 1,14 sen/kwh untuk skenario sedang atau 3,31 sen/kwh untuk skenario tinggi.

## **FUEL COST PROJECTION FOR ELECTRICITY GENERATION**

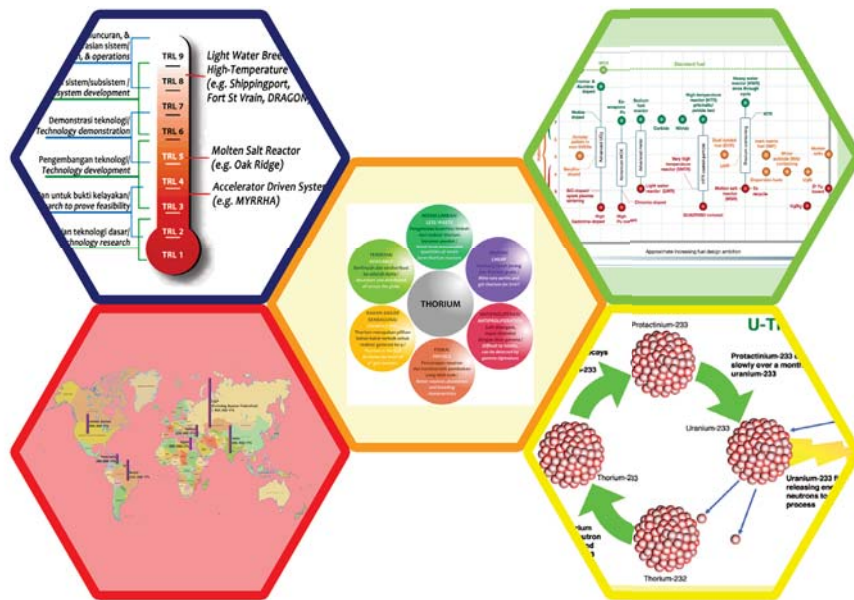
*The fuel cost for electricity generation cost is the cost of fuel provision required to produce 1 kWh of electrical energy. Such costs can be calculated based on the ratio of total fuel cost per year to the total amount of average electrical energy produced per year. The fuel cost for electricity generation on NPP is about 10% of the total generation cost.*

*Nuclear power plant with 1,000 MWe capacity and availability of about 90 % per year will generate electricity of 7.9 TWh in total. The fuel costs for generation for the first NPP in 2027 is estimated based on the total fuel cost of 2x1,000 MWe divided by total energy generated 2x7.9 TWh. The fuel cost for electricity generation is about 0.66 cents/KWh for moderate scenario or 0.86 cents/KWh for high scenario.*

*The fuel coast for electricity tgeneration in 2050 for the total capacity of 21 GWe is estimated about 1.14 cents/KWh for moderate scenario or 3.31 cents/KWh for high scenario.*







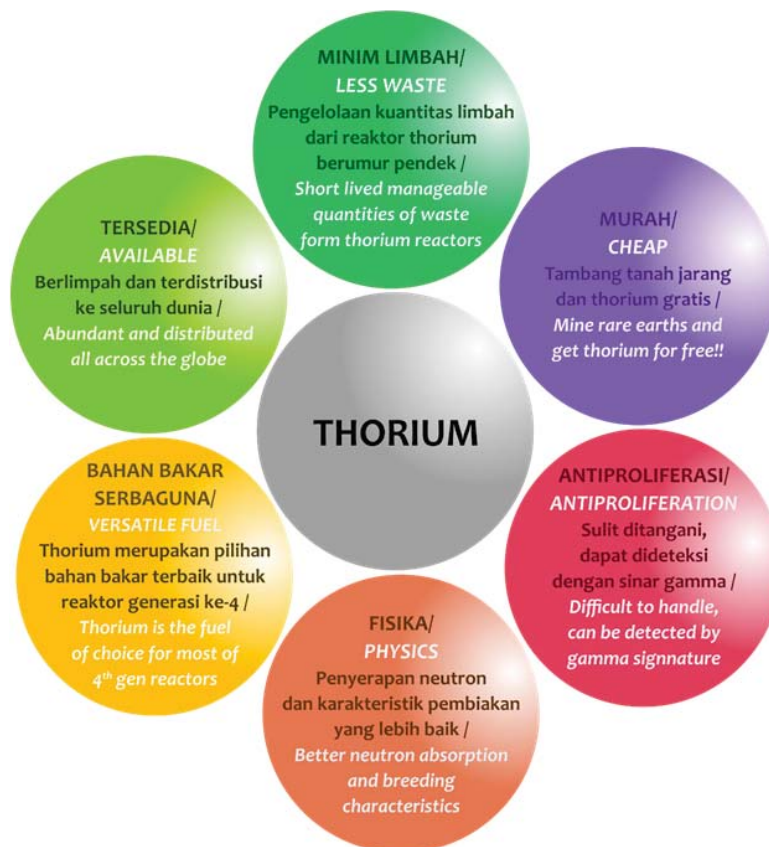
# THORIUM

## THORIUM

## SIFAT FISIK THORIUM

### PHYSICAL PROPERTIES THORIUM

Sifat/Characteristic	Bahan Bakar/Type of Fuel					
	U	UO <sub>2</sub>	Pu	PuO <sub>2</sub>	Th	ThO <sub>2</sub>
Struktur Kristal/Crystal Structure	Orthorhom 298 – 935K) Tetragonal (935K- 1045K)	FCC(tipe CaF <sub>2</sub> )				
Titik Leleh/Melting Point, K	1405	~3123	913	~2623	2025	~3643
Massa Jenis/Theoretical Density, g/cm <sup>3</sup> pada 298K	19,05	10,96	19,86	11,46	11,68	10,00
Konduktivitas Panas/Thermal Conductivity, Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> pada 773K	30	4,8	30	4,48	43,1	6,2
Koefisien Ekspansi Termal/Thermal Expansion Coefisien, K <sup>-1</sup>	14,2x10 <sup>-6</sup> (30-600K)	10x10 <sup>-6</sup> (298- 1223K)	56x10 <sup>-6</sup>	11,4x10 <sup>-6</sup> (298- 1223K)	11,9x10 <sup>-6</sup> (30- 600K)	9,67x10 <sup>-6</sup> (298- 1223K)



## SIFAT FISIK THORIUM

Salah satu produk antara pada konversi  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  adalah  $^{232}\text{U}$  yang merupakan isotop pengemisi gamma kuat (2-2,26 Mev). Adanya isotop ini menyebabkan dibutuhkankannya teknik penanganan fabrikasi bahan bakar jarak jauh agar terlindung dari lingkungan radiasi gamma energi tinggi. Hal ini membuat proses lebih rumit dan mahal.

Kelimpahan thorium di alam cukup tinggi, sekitar 3-4 kali lebih tinggi dibanding Uranium. Tampang lintang absorpsi neutron thermal dari Th-232 adalah sekitar 3 kali dibanding U-238. Karena itu, laju konversi Th-232 menjadi U-233 lebih tinggi dibanding laju konversi U-238 menjadi Pu-239.  $\text{ThO}_2$  mempunyai konduktivitas panas lebih tinggi dan koefisien ekspansi panas yang lebih rendah dibanding  $\text{UO}_2$ , ini berakibat temperatur bahan bakar lebih rendah, yang berdampak strain lebih rendah pada kelongsong sehingga hal ini memungkinkan bahan bakar dapat dioperasikan dengan waktu tinggal dalam reaktor yang lebih lama.

Produksi aktinida minor lebih sedikit bila menggunakan  $^{232}\text{Th}$ / $^{233}\text{U}$  sebagai bahan bakar. Bahan bakar Thorium juga tidak memproduksi Pu sehingga mempersulit pembuatan senjata nuklir.

## PHYSICAL PROPERTIES THORIUM

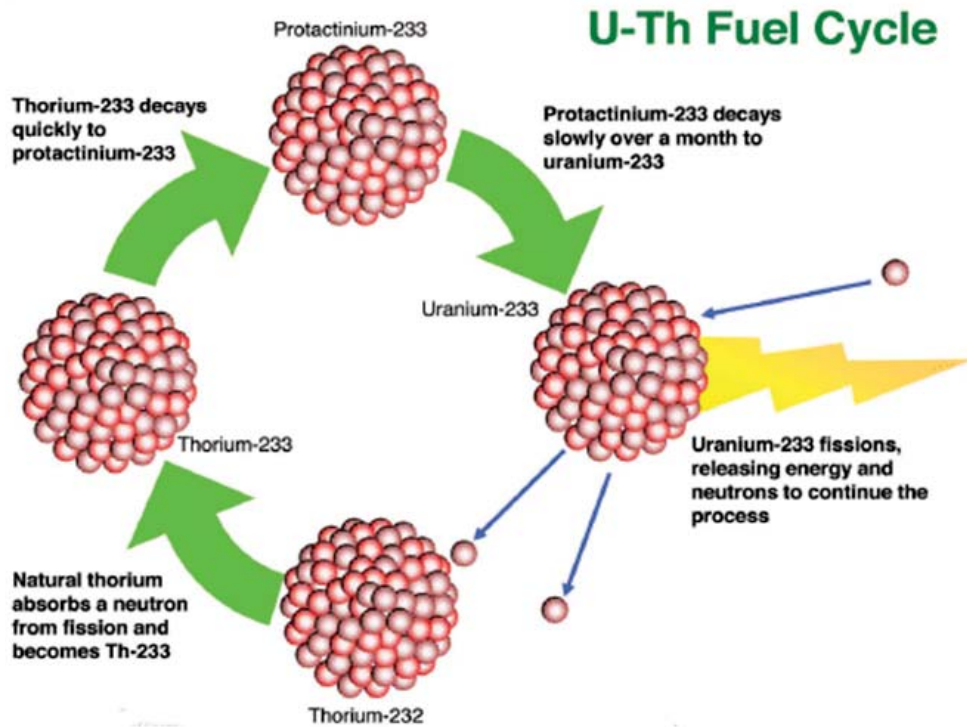
*One of the products of  $^{232}\text{Th}$ - $^{233}\text{U}$  conversion is the isotope  $^{232}\text{U}$  which is a strong gamma emitter (2 to 2.26 Mev). The presence of this isotope needs for remotely fuel fabrication to protect against high energy gamma radiation area. This makes the process more complicated and expensive.*

*Thorium abundance in nature is quite high, around 3-4 times higher than Uranium. Thermal neutron absorption cross section of Th-232 is about 3 times compared to U-238. Therefore, the rate of conversion of Th-232 to U-233 was higher than the rate of conversion of U-238 into Pu-239.  $\text{ThO}_2$  has higher thermal conductivity and thermal expansion coefficient that is lower than  $\text{UO}_2$ , so the fuel temperature is lower, which affects the lower strain on the cladding and allows the fuel can be operated with longer time in the reactor.*

*Production of minor actinides is less when using  $^{232}\text{Th}$  /  $^{233}\text{U}$  as a fuel. Thorium fuel also does not produce Pu so more difficult to manufacture nuclear weapons.*

## REAKSI NUKLIR & REAKTOR THORIUM

### REACTION OF NUCLEAR & REACTOR THORIUM



Nama Reaktor/ Name of Reactor	Negara/ Country	Jenis/ Type	Daya/ Power	Bahan Bakar/ Fuel	Periode Operasi/ Operation Period
AVR	Jerman	HTGR, Exp. (Pebble Bed)	15 MW(e)	Th+235U Driver Fuel, Coated fuel particles	1967-1988
THTR-300	Jerman	HTGR, Power (Pebble Bed)	300 MW(e)	Th+235U, Driver Fuel, Coated fuel particles	1985-1989
Lingen	Jerman	BWR, Irradiation	60 MW(e)	Test Fuel (Th,Pu)O <sub>2</sub> pellets	1968-1973
Dragon (OECD-Euratom)	UK	HTGR, Exp	20 MWt	Th+235U Driver Fuel, Coated fuel particles	1966-1973
Peach Bottom	USA	HTGR, Exp.	40 MW(e)	Th+235U Driver Fuel, Coated fuel particles	1966-1972
Fort St Vrain	USA	HTGR, Power	330 MW(e)	Th+235U Driver Fuel, Coated fuel particles, Dicarbide	1976-1989
MSRE ORNL	USA	MSBR	7.5 MWt	<sup>233</sup> U Molten Fluorides	1964-1969
BORAX-IV&ELK River Station	USA	BWR (Pin Assemblies)	2.4 MW(e); 24 MW(e)	Th+235U Driver Fuel Oxide Pellets	1963 - 1968
Shippingport	USA	LWBR PWR (Pin Assemblies)	100 MW(e)	Th+233U Driver Fuel, Oxide Pellets	1977-1982
Indian Point 1	USA	LWBR PWR	285 MW(e)	Th+233U Driver Fuel, Oxide Pellets	1962-1980
SUSPOP/KSTR KEMA	Netherlands	Aqueous Homogenous Suspension	1 MWt	Th+HEU, Oxide Pellets	1974-1977
NRX&NRU	Canada	MTR (Pin Assemblies)	20MW; 200MW	Th+ <sup>235</sup> U, Test Fuel	1947 (NRX) + 1957 (NRU);
CIRUS, DHRUVA&KAMINI	India	MTR Thermal	40 MWt; 100 MWt; 30 kwt	Al+ <sup>233</sup> U Driver Fuel, 'J' rod of Th & ThO <sub>2</sub> , 'I' rod of ThO <sub>2</sub>	1960-2010 (CIRUS); others in operation
KAPS 1&2; KGS 1&2; RAPS 2,3&4	India	PHWR (Pin Assemblies)	220 MW(e)	ThO <sub>2</sub> Pellets	1980 (RAPS 2)
FBTR	India	LMFBR (Pin Assemblies)	40 MWt	ThO <sub>2</sub> blanket	1985; in operation

## REAKSI NUKLIR & REAKTOR THORIUM

Thorium-232 merupakan isotop dapat biak (fertile). Thorium-232 yang menyerap neutron lambat akan menghasilkan uranium-233 ( $^{233}\text{U}$ ) yang merupakan bahan fisil. Oleh karena Thorium adalah bahan fertil maka penggunaannya sebagai bahan bakar reaktor harus disertai bahan fisil uranium pengayaan rendah (LEU), Plutonium (Pu) atau membuat produk U-233 terlebih dahulu. Tahap awal bahan bakar Thorium harus merupakan campuran dengan LEU atau Pu, dalam bentuk senyawa oksida Thorium ( $\text{ThO}_2$ ) dengan oksida plutonium ( $\text{PuO}_2$ ) atau oksida Thorium dengan oksida Uranium ( $\text{UO}_2$ ) untuk menghasilkan Thorium-MOX.

PLTN (komersial) AHWR Kalprapar-1 di Gujarat merupakan PLTN yang pertama di dunia menggunakan bahan bakar berbasis thorium. Tiongkok sebelum peristiwa kecelakaan PLTN di Fukushima sudah mengumumkan ambisinya untuk membangun PLTN berbasis thorium yang disebut dengan istilah TMSR (Thorium Molten Salt Reactor) atau Reaktor Garam Cair China.

Reaktor Fort St. Vrain (FSV) di USA merupakan reaktor berpendingin gas, menggunakan bahan bakar thorium berbentuk prismatic dan moderator grafit.

## REACTION OF NUCLEAR & REACTOR THORIUM

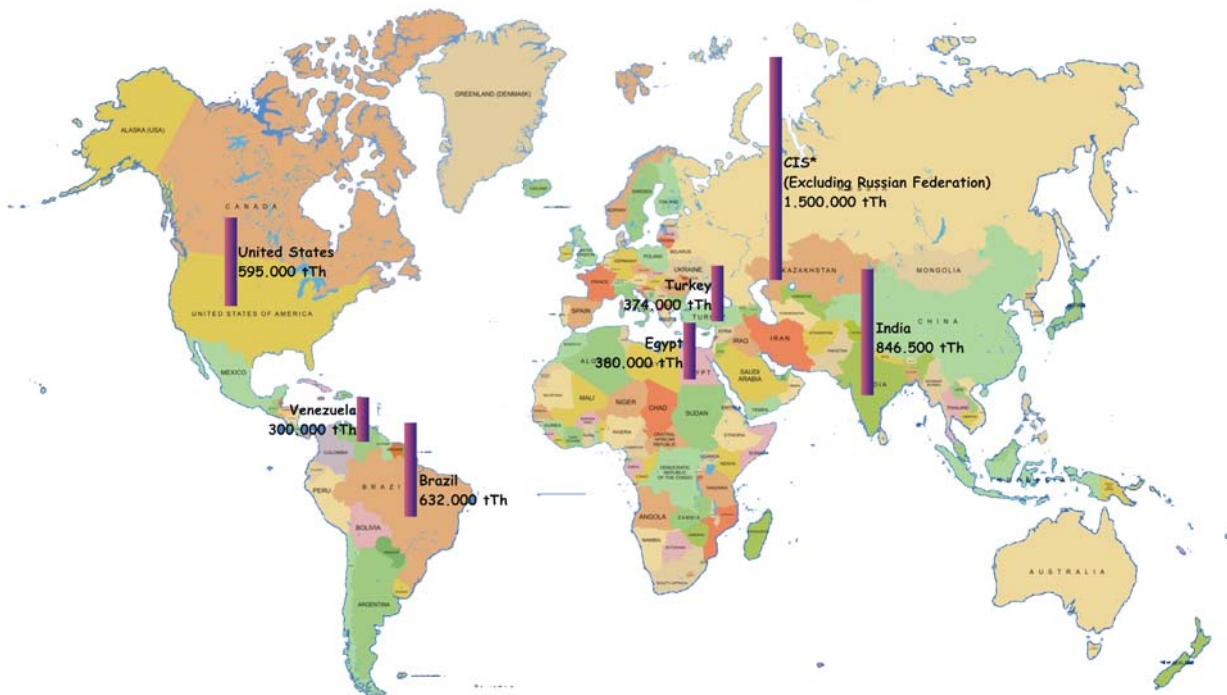
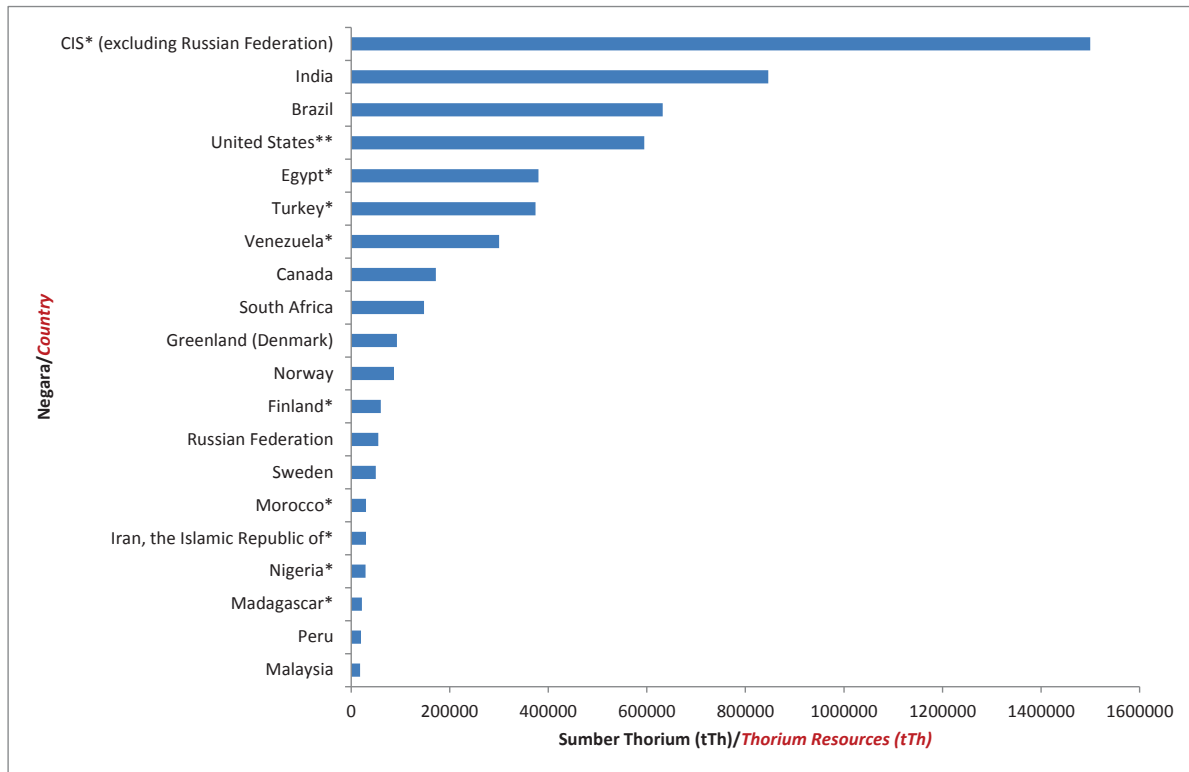
*Thorium-232 is an isotope that can multiply (fertile). Thorium-232 which absorbs slow neutrons will produce uranium-233 ( $^{233}\text{U}$ ) which is fissile material. Therefore Thorium is a fertile material, the use as a fuel reactor fissile material must be accompanied with low-enriched uranium (LEU), Plutonium (Pu) or make product of U-233 first. Thorium fuel in early stage should be a blend with LEU or Pu, in the form of oxides of thorium ( $\text{ThO}_2$ ) with plutonium oxide ( $\text{PuO}_2$ ) or thorium oxide uranium oxide ( $\text{UO}_2$ ) to produce thorium-MOX (mixed-oxide).*

*NPP (commercial) AHWR Kalprapar-1 in Gujarat is the first nuclear power plant in the world using thorium as fuels. China before the events at Fukushima nuclear power plant accident has already announced his ambition to build thorium-based nuclear power plants termed China TMSR (Thorium Molten Salt Reactor).*

*Reaktor Fort St. Vrain (FSV) in the USA is a gas-cooled reactors, using prismatic shaped thorium fuel and graphite moderator.*

# POTENSI THORIUM

## THORIUM RESOURCES



Negara-negara yang memiliki potensi terbesar thorium /

*Countries with majority thorium resource*

## POTENSI THORIUM

Data sumber daya thorium tidak selengkap data uranium, karena saat ini thorium belum digunakan sebagai bahan bakar PLTN sehingga belum terlalu menarik secara ekonomi. Potensi thorium total di seluruh dunia mencapai sebesar 6.355.300 ton, dengan mayoritas berada di wilayah Asia dengan total sebesar 2.647.500 ton.

Wilayah Asia yang memiliki potensi thorium paling besar berada di wilayah China dan Rusia. Wilayah Eropa yang berpotensi thorium terbesar ada di negara Turki. Potensi thorium wilayah Afrika berada di negara Mesir, sedangkan wilayah Amerika berada di negara Brazil dan Amerika Serikat.

Indonesia belum termasuk ke dalam negara yang mempunyai sumber-daya thorium teridentifikasi, karena penelitian terbaru yang dilakukan BATAN masih menghasilkan data sumber daya thorium dengan kategori spekulatif. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lanjutan dan mendalam untuk menemukan sumber-daya thorium teridentifikasi di Indonesia yang layak tambang.

## THORIUM RESOURCES

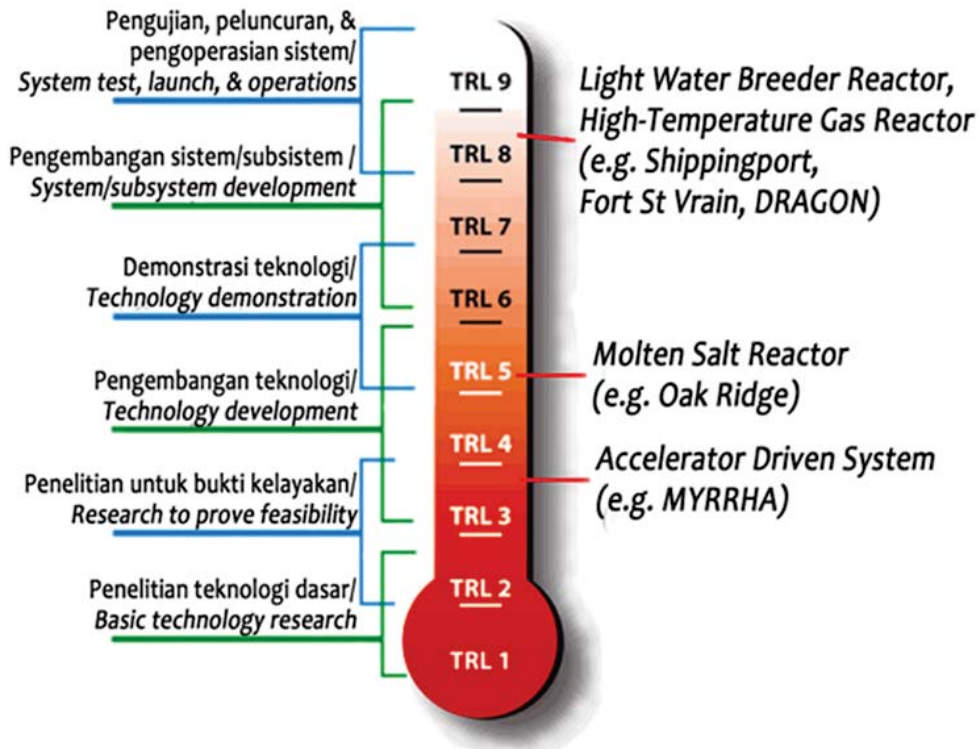
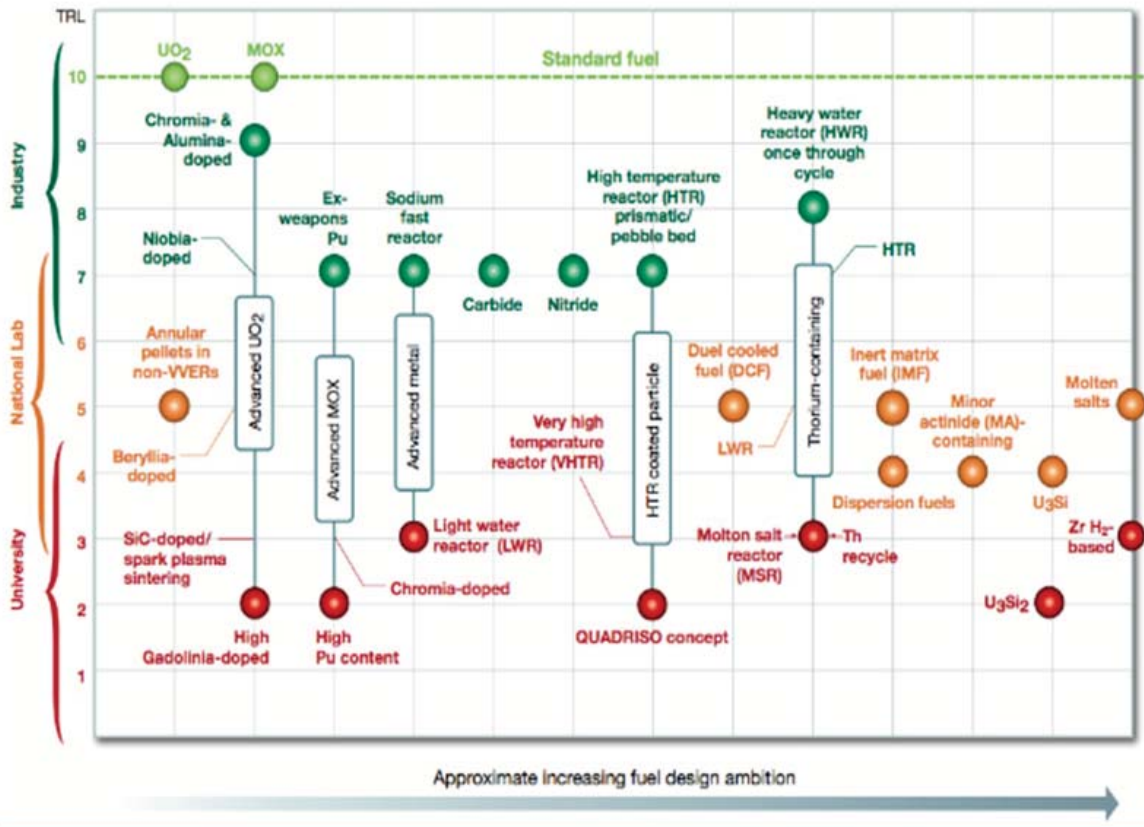
*The data of thorium resource are still not complete yet because thorium has not been used as a nuclear fuel, so it is not attractive economically. The total potential of thorium in the world reaches 6.3553 million tonnes, mostly located in the regions of Asia with a total of 2.6475 million tonnes.*

*Asian countries that have the largest thorium potential are China and Russia. In Europe, Turkey has the largest thorium potential. Meanwhile, in Africa region, Egypt has the largest thorium potential and in America region, Brazil and USA has largest thorium resource.*

*Indonesia does not belong to the group of countries that have identified thorium potential, because BATAN's research activities on thorium resources result in speculative category. Therefore, further and more detail research is needed to find feasible identified thorium resources in Indonesia.*

# TINGKAT KESIAPAN TEKNOLOGI REACTOR THORIUM

## TECHNOLOGY READINESS LEVEL OF THORIUM REACTOR





## TINGKAT KESIAPAN TEKNOLOGI REACTOR THORIUM

Laboratorium Nuklir Nasional Inggris telah mengklasifikasikan berbagai bahan bakar maju dan kelongsong dalam hal Teknologi Tingkat Kesiapan sebagai bagian dari penilaian energi nuklir terpadu. Pendekatan ini akhirnya membantu untuk menginformasikan apakah ada kredibel R & D jalur untuk pengembangan, dan tingkat tantangan untuk pembangunan itu.

Tingkat Kesiapan Teknologi (TRLs) dikembangkan awalnya dalam program penerbangan ruang NASA dan merupakan cara yang ideal untuk memperoleh pemahaman tentang kematangan teknologi yang muncul. Sebagai teknologi berkembang dari rendah ke tinggi TRL, bergerak dari ide untuk aplikasi yang lengkap

Tingkat Kesiapan Teknologi (TRL) dari bahan bakar thorium berada pada level 4 sampai 5 yaitu tahap pengembangan teknologi. Hal ini menunjukkan belum adanya reaktor berbahan bakar thorium yang telah beroperasi secara komersil.

Keekonomian thorium hingga saat ini belum diketahui dikarenakan belum adanya biaya eksploitasi secara resmi dan belum adanya PLTN berbahan thorium yang komersil. Penggunaan bahan bakar thorium bersama uranium diperkaya rendah (LEU) sebagai driver masih memerlukan jangka waktu 15-20 tahun untuk sampai tahap komersial.

## TECHNOLOGY READINESS LEVEL OF THORIUM REACTOR

*The UK's National Nuclear Laboratory has classified a range of advanced fuels and claddings in terms of Technology Readiness Levels as part of an integrated nuclear energy assessment. This approach ultimately helps to inform whether there is a credible R&D pathway to development, and the degree of challenge to that development.*

*Technology Readiness Levels (TRLs) were developed originally in the NASA space flight programme and are an ideal way to gain an understanding of the maturity of emerging technologies. As technology develops from a lower to a higher TRL, it moves from an idea to a fully-fledged application.*

*Technology Readiness Levels (TRL) of thorium fuel at the level of 4 to 5 which means on the technology development phase. This shows there are no thorium-fueled reactors that have been operating commercially.*

*Economies of thorium still unknown until now due to the lack of formal exploitation costs and the absence of commercial thorium based NPP. The use of thorium fuel along low enriched uranium (LEU) as the driver still needs time about 15-20 years to reach commercial phase.*





# AKTIVITAS EKSPLORASI DAN FABRIKASI OLEH BATAN

*EXPLORATION AND FABRICATION ACTIVITIES  
BY BATAN*

**KALAN - KALIMANTAN BARAT**  
**KALAN – WEST KALIMANTAN**



Titik lokasi Kalan di Kalimantan Barat /

*Kalan location in West Kalimantan*



Aktifitas eksplorasi di Kalan

*Exploration activities in Kalan*

## **KALAN - KALIMANTAN BARAT**

Salah satu aktivitas eksplorasi BATAN berada di Kalan, Provinsi Kalimantan Barat. Studi ini menghasilkan informasi bahwa sumber-daya uranium terdapat pada endapan metamorfik di cekungan Kalan, dan endapan plaser monasit di Ketapang. Selain kandungan uranium, monasit juga mengandung thorium dengan kadar yang cukup signifikan.

Sumber-daya uranium di Kalan terbagi menjadi beberapa sektor. Sektor Eko Remaja sebesar 553 ton  $U_3O_8$  terukur. Pada Sektor Rabau, terdapat sumber-daya sebesar 294 ton  $U_3O_8$  dari 389.000 ton bijih terukur. Sektor Rirang memiliki sumber-daya U di Lembah Rirang sebesar 31,6122 ton  $U_3O_8$ . Sumber-daya uranium di Sektor Lemajung sebesar 708 ton  $U_3O_8$  terukur, dan sebesar 199 ton  $U_3O_8$  terindikasi. Sektor Amir Engkala mempunyai sumber-daya uranium sebesar 247,66 ton  $U_3O_8$  terindikasi dan sebesar 619,32 ton  $U_3O_8$  hipotetik. Sektor Jeronang Hulu terdapat sebesar 915,44 ton  $U_3O_8$  dari 2.200.213,12 ton bijih. Sektor Semut memiliki sebesar 274,15 ton  $U_3O_8$  dari 152.490,6 ton bijih tereka. Jumbang mempunyai sumber-daya sebesar 3.666,134 ton  $U_3O_8$  spekulatif. Prembang Kanan terdapat sebesar 243 ton  $U_3O_8$  spekulatif. Dendang Arai memiliki sebesar 139 ton  $U_3O_8$  spekulatif. Sementara itu, Sektor Bubu mempunyai sumber-daya sebesar 113,4 ton  $U_3O_8$  spekulatif dari 113.400 ton bijih.

## **KALAN – WEST KALIMANTAN**

*One of BATAN's exploration activities is in Kalan, West Kalimantan Province. The results of this study show that uranium resources are contained in the metamorphic sediment in the Kalan's basin and plaser monazite sediment in Ketapang. In addition to containing uranium, monazite also contains thorium in significant concentration.*

*Uranium Resources in Kalan is divided into several sectors. Eko Remaja sector has 553 tonnes of  $U_3O_8$  measured resource of. In Rabau sector, the resource is 294 tonnes of  $U_3O_8$  from 389,000 tonnes of measured ore. Rirang sector's uranium resource is 31.6122 tonnes of  $U_3O_8$ . Uranium resource in Lemajung sector is 708 tonnes of measured  $U_3O_8$  and 199 tonnes of indicated  $U_3O_8$ . Amir Engkala sector has 247.66 tonnes of indicated  $U_3O_8$  and 619.32 tonnes of hypothetical  $U_3O_8$ . Jeronang Hulu sector has 915.44 tonnes  $U_3O_8$  from 2,200,213.12 tonnes of ore. Semut sector has 274.15 tonnes from 152,490.6 tonnes  $U_3O_8$  of inferred ore. Jumbang has 3666.134 tonnes speculative  $U_3O_8$ . In Prembang Kanan sector, the resource is 243 tonnes of speculative  $U_3O_8$ . Dendang Arai has 139 tonnes of speculative  $U_3O_8$ . In Bubu sector, there is 113.4 tonnes of speculative  $U_3O_8$  from 113,400 tonnes of ore.*

**MENTAWA - KALIMANTAN TENGAH**  
**MENTAWA - CENTRAL KALIMANTAN**



Titik lokasi Mentawa di Kalimantan Tengah/

*Mentawa location in Central Kalimantan*



Aktifitas laboratorium untuk hasil eksplorasi

*Laboratory activities for exploration product*

## **MENTAWA - KALIMANTAN TENGAH**

Sektor Mentawa terletak di luar Cekungan Kalan, yaitu terletak di sebelah Selatan Cekungan Kalan, termasuk dalam wilayah Desa Tanjung Paku, Kabupaten Kota Waringin Timur, Kalimantan Tengah. Perhitungan potensi sumber-daya uranium pada Sektor Mentawa dilakukan dengan memanfaatkan data yang tersedia.

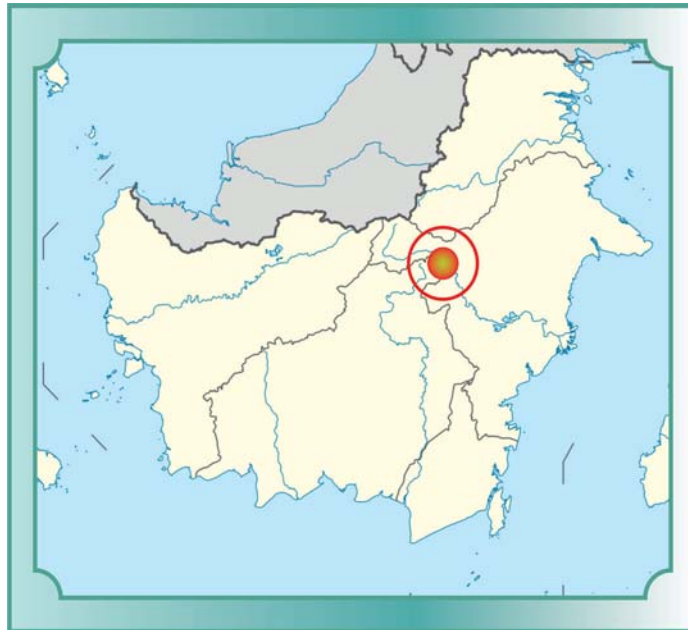
Perhitungan menggunakan asumsi perubahan kandungan mineral setiap beda kedalaman secara vertikal. Hal ini dilakukan sampai dengan kedalaman 220 meter dari permukaan. Asumsi ini berdasarkan pada beda tinggi kandungan mineral yang tersingkap di bagian Timur lokasi penelitian. Sebaran lateral diasumsikan sesuai dengan sebaran tanah yang beradiometri yaitu seluas 33.763,34 m<sup>2</sup>. Contoh batuan untuk analisis kadar uranium diambil dengan metode “channel sampling” baik pada mineral beradiometri tinggi maupun rendah. Kadar uranium yang digunakan adalah kadar rata-rata dari contoh tersebut yaitu 408,59 ppm. Berat jenis batuan diasumsikan 2,7, yaitu berat jenis batuan kuarsit yang ada di Kalan yang secara fisik sama dengan kuarsit di Mentawa. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa potensi sumber-daya uranium di Sektor Mentawa adalah sebesar 9.669,463 ton U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> spekulatif.

## **MENTAWA - CENTRAL KALIMANTAN**

*Mentawa sector is located outside Kalan Basin, which is located in the Southern side of Kalan Basin, within the area of Tanjung Paku Village, East Waringin Timur Regency, Central Kalimantan. The calculation of the potential uranium resource in Mentawa Sector was done by utilizing the available data.*

*The calculations was based on the assumption that mineral contents change at different depths vertically. It is done up to a depth of 220 meters below the surface. This assumption is based on the mineral deposit content difference exposed in the Eastern part of the study site. Lateral distribution is assumed in accordance with the distribution of radiometric land of 33,763.34 m<sup>2</sup> in area. Rock samples for uranium content analysis were taken using “channel sampling” method, both at high and low radiometric mineral. The uranium concentration is the average concentrations of these samples, i.e. 408.59 ppm. The mass density of rock is assumed 2.7, which is the mass density of weight quartzite rock of Kalan physically similar to the quartzite in Mentawa. The calculation results show that in the potential uranium resource in Mentawa sector is amounted to 9,669.463 tonnes of speculative U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>.*

**MAHAKAM HULU - KALIMANTAN TIMUR**  
**UPSTREAM MAHAKAM – EAST KALIMANTAN**



Titik lokasi Mahakam Hulu di Kalimantan Timur/  
*Mahakam Hulu location in East Kalimantan*



Aktifitas eksplorasi di Mahakam Hulu /  
*Exploration activities in Mahakam Hulu*



## MAHAKAM HULU - KALIMANTAN TIMUR

Di Kalimantan Timur, sumber-daya uranium terdapat pada tipe endapan vulkanik di daerah Kawat, hulu Sungai Mahakam. BATAN telah bekerjasama dengan CEA Perancis melakukan eksplorasi uranium pada tahap pendahuluan di Kalimantan Timur. Hasil eksplorasi mendapatkan daerah potensial uranium seluas 25 km<sup>2</sup> yang terletak di hulu Sungai Mahakam, Kalimantan Timur. Daerah potensial uranium tersebut disebut daerah Kawat dan dicirikan oleh adanya beberapa paparan radioaktivitas batuan yang mempunyai nilai berkisar antara 1.500 hingga 15.000 cps. Anomali- anomali tersebut terkonsentrasi pada batuan gunung api berkomposisi asam hingga menengah yang berumur Tersier.

Pada cakupan area 26 km<sup>2</sup> ditemukan beberapa lokasi paparan radioaktivitas pada batuan vulkanik asam dengan radioaktivitas tertinggi mencapai >15.000 cps SPP 2 NF dengan kadar uranium total antara 72,5 sampai 1.950 ppm. Berdasarkan lokasi keterdapatannya, lokasi paparan radioaktivitas tersebut dikelompokkan ke dalam tiga sektor potensial uranium yaitu sektor Kawat, Nyaan dan Paluq.

## UPSTREAM MAHAKAM – EAST KALIMANTAN

*In East Kalimantan, uranium resource is contained in the volcanic sediment types in the Kawatarea, in the upstream of the Mahakam River. BATAN has cooperated with the CEA of French to do uranium exploration in the preliminary stage in East Kalimantan. The results of exploration obtain uranium potential area of 25 km<sup>2</sup> located in the upstream of the Mahakam River in East Kalimantan. The uranium potential areas are called Kawat area and characterized by the presence of multiple exposures of radioactivity by rock ranging from 1,500 to 15,000 cps. These anomalies are concentrated in the volcanic rocks of acid to intermedii Tertiary Age.*

*In the coverage area of 26 km<sup>2</sup> several locations of radioactivity exposure are discovered in acid volcanic rocks with the highest radioactivity > 15,000 cps SPP 2 NF with total uranium content between 72.5 and 1,950 ppm. Based on its availability, the locations of radioactivity exposure are grouped into three uranium potential sectors, namely Kawat sector, Nyaan and Paluq.*

**MAMUJU- SULAWESI BARAT**  
**MAMUJU – WEST SULAWESI**



Titik lokasi Mamuju di Sulawesi Barat /  
*Mamuju location in West Sulawesi*



Aktifitas eksplorasi di Mamuju /  
*Exploration activities in Mamuju*

## MAMUJU - SULAWESI BARAT

Mamuju Sulawesi Barat adalah daerah yang mempunyai kandungan thorium/uranium skala *green field*, atau daerah baru dengan kondisi geologi yang menarik dari segi teori keberadaan mineral radioaktif. Kandungan thorium/uranium di Mamuju terdapat pada sebaran Formasi Gunung api Adang dengan luasan 820 km<sup>2</sup>. Mamuju tersusun atas batuan beku gunung api, yang berselingan dengan endapan piroklastik dan tuffities.

Mineralisasi/anomali thorium dan uranium diinterpretasikan terbentuk dalam beberapa proses geologi sebagai berikut:

1. Kandungan thorium/uranium berhubungan dengan *alterasi hidrotermal*. Contoh tipe ini berada di hulu Sungai Mamuju.
2. Kandungan uranium berhubungan dengan proses pelarutan dan pengendapan uranium akibat air meteorik pada batuan tuffities konglomerat. Contoh dari tipe ini adalah Botteng.
3. Kandungan thorium yang berhubungan dengan proses *supergene*. Anomali terlihat dari tingginya thorium pada tanah laterit sedangkan pada batuan sekitarnya tidak terlalu tinggi. Contoh tipe ini terdapat di Takandeang.

## MAMUJU – WEST SULAWESI

*Mamuju, West Sulawesi, is a region that has thorium/uranium content of green field scale, or a new area found with very interesting geological conditions in terms of radioactive mineral existence theory. Thorium/uranium in Mamuju are contained on the distribution of Volcanic Formation Adang within an area of 820 km<sup>2</sup>. Mamuju is composed of volcanic igneous rock, which is interspersed with pyroclastic deposits and tuffities.*

*It is interpreted that mineralization/anomaly of thorium and uranium content is formed in some geological processes as follows:*

1. *The content of thorium/uranium is associated with hydrothermal alteration. Example of this type is located in the upstream of Mamuju River.*
2. *The content of uranium is associated with process of dissolution and precipitation of uranium due to the meteoricwater in tuffities conglomerate rock, for example Botteng.*
3. *The content of thorium is associated with supergene processes. The anomaly is apparent from high thorium content in laterite soil, while it is low in the surrounding rocks. An example of this type is found in Takandeang.*

**BIAK NUMFOR - PAPUA BARAT**

**BIAK NUMFOR – WEST PAPUA**



Titik lokasi Biak Numfor di Papua Barat /

*Biak Numfor location in West Papua*



Aktifitas eksplorasi di Biak Numfor /

*Exploration activities in Biak Numfor*

## **BIAK NUMFOR - PAPUA BARAT**

Biak Numfor Provinsi Papua Barat merupakan dataran dengan morfologi bergelombang rendah yang didominasi oleh endapan batu gamping berumur *Tersier-Kwarter*. Dari hasil analisis dan evaluasi data survei disimpulkan bahwa di daerah Biak terindikasi adanya kandungan uranium pada tanah permukaan batu gamping “*Formasi Mokmer*” yang tersebar di daerah sekitar Maryendi, Darmapis, dan Denafi.

Zona yang memiliki kandungan uranium dicirikan oleh keberadaan tanah berwarna coklat tua dan coklat kemerahan, dengan dosis radiasi 1,9 sampai 4.032,3 nSv/jam, kadar uranium 20,27 – 325 ppm eU, yang secara geologi menempati lembah dan cekungan topografi lokal pada permukaan batu gamping “*Formasi Mokmer*” berumur Kwarter. Kandungan uranium di permukaan merupakan pengendapan uranyl karbonat yang berasal dari batu gamping yang dapat diklasifikasikan sebagai endapan uranium tipe permukaan dengan sub-tipe tanah. Penelitian eksplorasi ini belum dapat menentukan potensi uranium secara kuantitatif.

## **BIAK NUMFOR – WEST PAPUA**

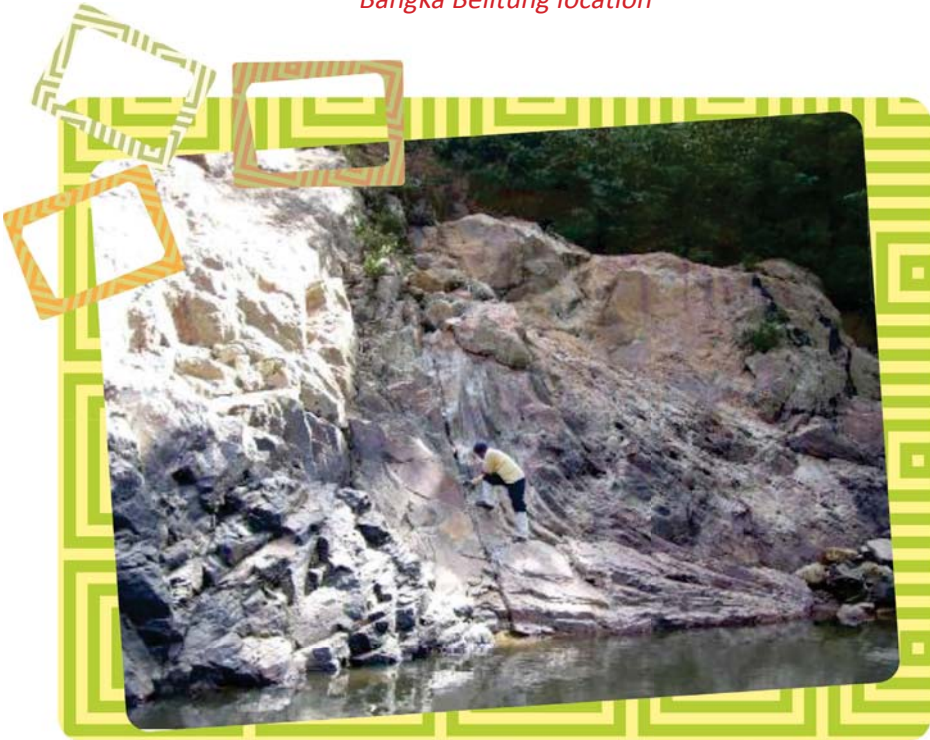
*Biak Numfor, West Papua Province, is plain with low -lying undulating morphology dominated by limestone deposits of Tertiary – Quaternary era. The analysis and evaluation of survey data concluded that in the Biak area the existence of uranium content is indicated in the limestone surface soil of “Mokmer Formation” that are scattered in the area around Maryendi, Darmapis, and Denafi .*

*The zone having uranium content is characterized by the presence of dark brown and reddish brown soil with radiation dose of 1.9 to 4032.3 nSV/h, uranium concentration from 20.27 to 325 ppm eU, which geologically occupies valley and basin of local topography on the limestone surface of “Formation Mokmer” of Quaternary Age. The content of uranium in the surface is uranyl carbonate deposition that comes from limestone, which can be classified as uranium deposits in sub-surface soil type. This exploration research still cannot determine quantitatively the uranium potential.*

**BANGKA BELITUNG**  
**BANGKA-BELITUNG**



Titik lokasi Bangka Belitung /  
*Bangka Belitung location*



Aktifitas eksplorasi di Bangka Belitung /  
*Exploration activities in Bangka Belitung*

## **BANGKA-BELITUNG**

Di Bangka-Belitung, sumber-daya uranium dan thorium terdapat pada endapan plaser monasit yang keterdapatannya berada bersama dengan timah. Hasil estimasi sumber-daya uranium yang ada di Bangka-Belitung dapat dilihat pada Peta Sebaran Bahan Galian Nuklir di Indonesia.

Cerucuk – Belitung Merupakan dataran dengan sudut lereng  $5^{\circ} - 20^{\circ}$  yang tersusun satuan batupasir, satuan batu lempung pasiran, terobosan granit dan endapan aluvial. Keberadaan mineral radioaktif (monasit) terindikasi oleh nilai pengukuran radioaktivitas yang relatif tinggi, 40 – 400 cps. Uranium dan thorium terdapat dalam endapan aluvial berumur kwarter. Secara geologi sumber-daya U dan Th pada daerah ini mengandung 78 ton  $U_3O_8$  hipotetik dan 532 ton Th.

Secara geologi daerah Tembang Rusa merupakan dataran aluvium dan tersusun atas Formasi Kelapa Kampit, F. Tajam dan Aluvial berumur kwarter. Pola Penyebaran endapan aluvial yang mengandung mineral radioaktif berarah Barat Laut – Tenggara. Secara geologi sumber-daya U dan Th pada daerah ini mengandung 489 ton  $U_3O_8$  hipotetik dan 4.208 ton Th.

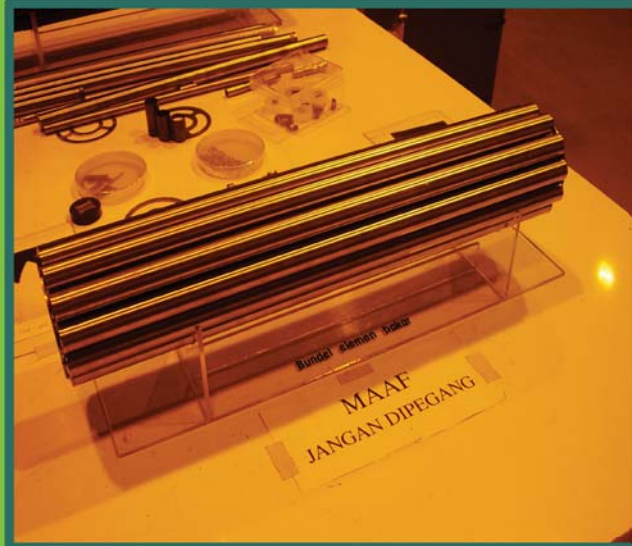
## **BANGKA-BELITUNG**

*In Bangka – Belitung, uranium and thorium resources are in plaser precipitate monazite together with tin. The results of uranium resource estimation in Bangka Belitung can be seen from the Distribution Map of Nuclear Minerals in Indonesia.*

*Cerucuk – Belitung, which is a plateau with a slope angle of  $5^{\circ} - 20^{\circ}$ , consists of sandstone, sandy clay stone, granite penetration and alluvial deposits. The existence of radioactive minerals (monazite) is indicated by the relatively high radioactivity measurements of 40 – 400 cps. Uranium and thorium are contained in the alluvial deposits of Quarternary Age. Geologically, U and Th resources in this area contains 78 tonnes of hypothetical  $U_3O_8$  and 532 tonnes of Th.*

*Geologically, Tembang Rusa Area is alluvium plain and composed of Kelapa Kampit formation, Tajam Foration, and alluvial of Quarternary Age. The distribution pattern of alluvial deposits that contain radioactive mineral direct is North-West and South-East. Geologically, uranium and Thorium resources in this Area contains 489 tonnes of hypothetical  $U_3O_8$  and 4.208 tonnes of Th.*

**LITBANG PEMBUATAN  $UO_2$  DARI YELLOW CAKE**  
*R&D TO MAKE  $UO_2$  FROM YELLOW CAKE*



Contoh elemen bahan bakar  $UO_2$  hasil riset /  
*Sample fuel elemen  $UO_2$  of research product*



Laboratorium riset pembuatan elemen bahan bakar  $UO_2$  /  
*Research laboratory for producing fuel elemen  $UO_2$*



## LITBANG PEMBUATAN UO<sub>2</sub> DARI YELLOW CAKE

BATAN telah melaksanakan penelitian dan pengembangan (litbang) di bidang siklus bahan bakar nuklir. Salah satu tahap litbang yang pernah dilaksanakan adalah pembuatan UO<sub>2</sub> dari *yellowcake* uranium. Litbang ini terdiri dari beberapa kegiatan seperti pembuatan serbuk halus UO<sub>2</sub> dengan ukuran submikron yang memenuhi persyaratan kualitas, optimasi proses kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> dan sinterring suhu rendah dalam pembuatan pelet dan pembuatan pelet UO<sub>2</sub> bentuk annular.

Kegiatan perekayasa terkait dengan litbang pembuatan UO<sub>2</sub>, seperti modifikasi muffle furnace untuk proses sinterring oksidatif, juga dilaksanakan oleh BATAN. Kegiatan lainnya adalah pembuatan peralatan getar elektro mekanik untuk membantu proses pembuatan pelet UO<sub>2</sub>.

Pembuatan pelet UO<sub>2</sub> dari *yellow cake* ini bertujuan untuk membuat elemen bahan bakar reaktor tipe PHWR yang tidak memerlukan proses pengayaan untuk menaikkan kadar uranium fisil (U-235), karena reaktor tipe PHWR cukup menggunakan uranium alam dengan tingkat pengayaan rendah (uranium alam).

## R&D TO MAKE UO<sub>2</sub> FROM YELLOW CAKE

*BATAN has carried out R&D (research and development) on the field of nuclear fuel cycle. One of the phases that has ever been conducted is the production of UO<sub>2</sub> from yellow cake. This R&D consists of several activities such as production of UO<sub>2</sub> fine powder in sub-micron size that meets the requirement of quality, optimization of UO<sub>2</sub> powder compacting process and low temperature sinterring in the production of pellets and annular shape UO<sub>2</sub> pellets.*

*Engineering activities associated with R&D of UO<sub>2</sub> production including modification on muffle furnace for oxidative sinterring process, has been done by BATAN. Another activity is manufacturing electro-mechanical vibrating equipment to support the production of UO<sub>2</sub> pellets.*

*The objective of this production of UO<sub>2</sub> pellets from yellow cake isto make PHWR reactor fuel element that does not need enrichment process to increase the content of fissile uranium (U-235), because PHWR reactor type only uses low uranium enrichment level (natural uranium).*

**LITBANG PEMBUATAN BAHAN STRUKTUR ELEMEN BAKAR REAKTOR DAYA**  
**R&D ON STRUCTURAL MATERIAL OF POWER REACTOR FUEL ELEMENT**



Kelongsong bahan bakar hasil riset /  
*Fuel cladding of research product*



Pelet UO<sub>2</sub> hasil riset /  
*UO<sub>2</sub> pellets of research product*

## LITBANG PEMBUATAN BAHAN STRUKTUR ELEMEN BAKAR REAKTOR DAYA

Kegiatan litbang BATAN di bidang siklus bahan bakar nuklir juga mencakup pembuatan bahan struktur elemen bakar reaktor daya. Bahan struktur ini bersama sama dengan bahan bakar nuklir UO<sub>2</sub> akan menjadi perangkat bahan bakar nuklir yang siap dipakai di reaktor nuklir.

Kegiatan perekayasa terkait litbang pembuatan bahan struktur ini antara lain perancangan tungku lebur untuk membuat paduan zirkonium (*Zircalloy*) dan perancangan peralatan konversi dari ingot leburan *Zircalloy* menjadi produk bentuk batang/plat. Proses yang dilaksanakan adalah pembuatan bahan ZrC, pelapisan kelongsong ZrY dengan ZrC dengan ketebalan dalam orde mikron, karakterisasi sifat mekanik dan mikrostruktur lapisan ZrC, serta pembuatan paduan dan komposit SiC.

Kegiatan litbang terkait bahan struktur mencakup pelaksanaan sintesis paduan Zr(Sn,Nb,Fe,V), karakterisasi mikrostruktur, dan sifat mekanik paduan Zr. Paduan Zr (*Zircalloy*) merupakan bahan dasar untuk kelongsong bahan bakar yang memiliki ketahanan korosi dalam temperatur tinggi, sehingga cocok untuk bahan struktur elemen bakar nuklir.

## R&D ON STRUCTURAL MATERIAL OF POWER REACTOR FUEL ELEMENT

*BATAN's R&D activities in the field of nuclear fuel cycle also include the manufacture structural material of power reactor fuel elements. This structural material together with UO<sub>2</sub> nuclear fuel will be assembled to produce nuclear fuel assembly that is ready for use in a nuclear reactor.*

*Engineering activities related to this R&D of material structural manufacture include the design of the melting furnace to make zirconium alloys and the design of conversion equipment of rod/plate products from Zircalloy ingots. The processes that have been undertaken are the manufacture of ZrC, coating of ZrY cladding with ZrC with micron-order thickness, characterization of mechanical properties and microstructure of ZrC layer, and manufacture of SiC alloys and composites.*

*Related structural materials R&D activities include the implementation of synthesis Zircalloy (Sn, Nb, Fe, V), characterization of the microstructure and mechanical properties of Zircalloy. Zircalloy is the base material for the fuel cladding, which has corrosion resistance at high temperature, making it suitable for structural material of nuclear fuel elements.*

**LITBANG FABRIKASI BAHAN BAKAR UNTUK SISTEM ENERGI NUKLIR INOVATIF**  
**R&D ON FUEL FABRICATION FOR INNOVATIVE NUCLEAR ENERGY SYSTEMS**



Laboratorium untuk fabrikasi bahan bakar /

*Laboratory for fuel fabrication*



Pellet hasil fasilitas fabrikasi /

*Pellets product of fabrication facility*

## LITBANG FABRIKASI BAHAN BAKAR UNTUK SISTEM ENERGI NUKLIR INOVATIF

BATAN juga melaksanakan litbang fabrikasi bahan bakar nuklir sebagai bagian dari sistem energi nuklir inovatif. Kegiatan ini merupakan penelitian terapan yang terkait dengan modifikasi terhadap material yang digunakan pada bahan bakar nuklir dan strukturnya.

Kegiatan litbang ini mencakup pembuatan kompakan pelet dari paduan UZr (Uranium Zirconium), pelaksanaan proses uji kualitas pelet UZr, karakterisasi sifat dan karakter termomekanik UZr, dan karakterisasi korosi suhu tinggi pada paduan UZrHx.

Kegiatan litbang ini memiliki target mampu membuat elemen bakar yang terdiri dari pelet UZrHx dalam kelongsong SS/Zry. Beberapa eksperimen juga dilaksanakan dalam kegiatan litbang inovatif ini, seperti pembuatan serbuk UN melalui proses pengurangan *carbothermic* UO<sub>2</sub> dan pembuatan pelet UN/ZrN dengan proses sintering.

Keseluruhan kegiatan litbang ini memiliki tujuan agar BATAN memiliki kemampuan dalam membuat serbuk UN melalui proses *carbothermic reduction* UO<sub>2</sub> dan mampu membuat pelet UN, UN/ZrN yang memenuhi persyaratan yang telah ditetapkan.

## R&D ON FUEL FABRICATION FOR INNOVATIVE NUCLEAR ENERGY SYSTEMS

*BATAN also carries out R&D on fabrication of nuclear fuel as part of an innovative nuclear energy system. This activity is an applied research related to the modification of the material used in nuclear fuel and structural material.*

*R&D activities include the manufacture of pellets that contains the UZr alloy (Uranium Zirconium), the quality test process for UZr pellets, characterization of the thermo-mechanical property and of UZr, and characterization of high temperature corrosion in the UZrHx alloy.*

*The objectives of these R&D activities are to obtain capability of making nuclear fuel element that comprises UZrHx pellets in SS/ZrY cladding. Some experiments were also carried out in these innovative research and development activities, such as pulverizing UN through reduction process of UO<sub>2</sub> carbothermic and manufacture of UN/ZrN pellets by sintering process.*

*Overall R&D activities have objectives to make BATAN have the ability to produce UN powder through reduction process of carbothermic UO<sub>2</sub> and make UN, UN/ZrN pellets that meet the requirement specified.*

## **LITBANG PEMBUATAN BAHAN BAKAR DENSITAS TINGGI UNTUK REAKTOR RISET**

Kegiatan litbang BATAN yang lebih spesifik adalah pembuatan bahan bakar densitas tinggi beserta bahan struktur elemen bakar untuk reaktor riset. Kegiatan ini memiliki visi agar BATAN memiliki kemandirian dalam penyediaan pasokan bahan bakar untuk reaktor riset yang dimiliki oleh BATAN.

Kegiatan litbang untuk pembuatan bahan bakar densitas tinggi untuk reaktor riset memiliki beberapa target antara lain mampu membuat leburan dan serbuk paduan U-Mo yang memenuhi persyaratan, mampu membuat prototipe pelat elemen bakar dispersi UMo-Al, mampu membuat leburan dan serbuk paduan U-Zr, dan berhasilnya pelaksanaan pengujian iradiasi prototipe elemen bakar UZr-Al di teras RSG-GAS secara aman dan selamat.

Kegiatan litbang untuk bahan struktur elemen bakar yang dilaksanakan BATAN memiliki target antara lain diperolehnya kemampuan men-sintesis dan karakterisasi paduan AL-Fe-Ni, diperolehnya kemampuan dalam membuat paduan AL-Fe-Ni dimensi besar dan diperolehnya kemampuan membuat pelat dengan ketebalan 6 mm, 2,6 mm dan 1,3 mm dari paduan Al-Fe-Ni hasil sintesis.

## **R&D ON MAKING A HIGH DENSITY FUEL FOR RESEARCH REACTORS**

*BATAN's more specific R&D activities are manufacture of high density fuels and its structural materials of fuel elements for research reactor. This activity brings the vision so that BATAN has independency in providing nuclear fuel supply for its research reactors.*

*R&D activities for the manufacture of high density fuel for research reactors have several targets, such as capability of making mixed and powdered U-Mo alloy, capability of making a prototype UMo-Al dispersion fuel element plate, capability of making mixed and powdered alloy U-Zr, and the successful implementation of irradiation testing on prototype of UZr-Al fuel elements on the RSG-GAS core with secure and safe.*

*R&D activities for fuel element structural material, which have been carried out by BATAN, are aimed to obtain the capability of synthesizing and characterizing Al-Fe- Ni alloy, the capability of making Al-Fe-Ni alloy in large dimension, and capability of making plates with a thickness of 6 mm, 2.6 mm and 1.3 mm from synthesized Al-Fe-Nilai alloy.*

## LITBANG FABRIKASI BAHAN BAKAR UNTUK REAKTOR SUHU TINGGI

BATAN juga melaksanakan litbang fabrikasi bahan bakar BISO/TRISO dalam rangka untuk mengantisipasi pembangunan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) oleh BATAN. RDE direncanakan bertipe HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor) dengan bahan bakar kernel  $UO_2$ .

Litbang yang dilaksanakan terkait dengan pembuatan kernel  $UO_2$  untuk HTGR dan memiliki target antara lain tersedianya proses pembuatan prototipe Sol-gel dengan kapasitas 2,5 kg/batch hasil pengembangan sendiri, diperolehnya kemampuan membuat kernel  $UO_2/UC$  sinter sesuai persyaratan, tersedianya prototipe alat CVD untuk pelapisan kernel, dan diperolehnya kemampuan membuat partikel bahan bakar BISO dan TRISO sesuai persyaratan.

Litbang ini memiliki visi agar BATAN mempunyai kemandirian dalam menyediakan pasokan bahan bakar reaktor HTGR selama masa aktif reaktor tersebut. Reaktor ini diharapkan sebagai reaktor riset generasi berikutnya yang akan menggantikan reaktor riset yang telah mendekati fase dekomisioning.

## R&D OF FUEL FABRICATION FOR HIGH TEMPERATURE REACTOR

*BATAN also carries out R&D on BISO/TRISO fuel fabrication in order to anticipate the construction of Experimental Power Reactor (EPR) by BATAN. EPR is planned as a High Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) type with the fuel in form of  $UO_2$  kernel.*

*R&D carried out is related to the manufacture of  $UO_2$  kernel for HTGR and has several targets, such as the availability of prototype Sol-gel manufacturing process with capacity of 2.5 kg / batch as self development, capability of making sintered kernel  $UO_2/UC$  that meets the requirement, availability of CVD tool prototype for kernel coating, and capability of making BISO and TRISO fuel particles in accordance with the requirements.*

*This R&D brings the vision so that BATAN has capability of providing fuel supply for HTGR reactor during its life time. It is expected that the reactor become the next-generation research reactor that will replace the existing research reactors, which are closing to their decommissioning phases.*

## DEFINISI

**Bahan Bakar Nuklir:** bahan yang dapat menghasilkan proses reaksi nuklir berantai.

**Back-end:** Alur pengelolaan bahan bakar nuklir bekas mencakup penyimpanan sementara, pengolahan ulang, daur ulang sampai pada penyimpanan secara permanen.

**Bijih Uranium:** batuan mineral yang mengandung kadar uranium cukup tinggi sehingga layak secara ekonomi untuk dieksploitasi.

**Batang Bahan Bakar:** elemen bahan bakar berisi bahan fisil berbentuk batang atau pin dan dapat dirakit menjadi elemen bahan bakar.

**Bejana Reaktor:** bejana bertekanan yang berisi pendingin reaktor nuklir, penyungkup dan teras reaktor.

**Bank Bahan Bakar LEU:** Bank uranium internasional yang menjamin ketersediaan bahan bakar nuklir dalam bentuk uranium diperkaya tingkat rendah.

**Bauran Energi:** kebijakan dalam pemanfaatan berbagai sumber energi untuk memenuhi kebutuhan energi.

## DEFINITION

**Nuclear fuel:** materials that can produce a nuclear chain reaction process

**Back-end:** series of management steps for nuclear fuel after used, including temporary storage, reprocessing, and recycling before wastes are disposed.

**Uranium ore:** mineral rocks that contain high concentrations of uranium and to be economically viable for exploitation.

**Fuel rod:** fuel elements containing fissile material in the form of a rod or pin and can be assembled into fuel assembly .

**A reactor pressure vessel:** the pressure vessel containing the nuclear reactor coolant, core shroud, and the reactor core.

**LEU fuel bank:** International uranium bank which ensures the availability of nuclear fuel in the form of low-level enriched uranium.

**Energy mix:** policies in the utilization of various energy sources to meet energy demands



**Burn-Up:** Ukuran konsumsi bahan bakar reaktor yang dapat dinyatakan dalam bentuk banyaknya energi yang dihasilkan per satuan berat bahan bakar dalam reaktor.

**Burn up:** *The value of the reactor fuel consumption that can be expressed in terms of the amount of energy produced per unit weight of fuel in the reactor.*

**Front-end:** alur pengolahan bahan bakar nuklir mencakup penambangan, penggilingan, konversi, pengkayaan dan fabrikasi.

**Front-end:** *Series of nuclear fuel processing includes mining, milling, conversion, enrichment and fabrication.*

**Fisil:** bahan yang dapat mengalami reaksi fisi ketika menyerap neutron termal, contohnya uranium-235 dan plutonium-239.

**Fisil:** *material that can undergo fission reactions when absorbing thermal neutrons, for example, uranium-235 and plutonium-239.*

**Fertil:** bahan yang tidak bersifat fisil, tetapi dapat berubah menjadi bahan fisil melalui proses penangkapan neutron dalam reaktor nuklir, contohnya adalah uranium-238 dan thorium-232.

**Fertil:** *non fissile material , but can be turned into fissile materials through neutron capture in nuclear reactors , for example, is uranium - 238 and thorium - 232.*

**Hafnium:** Hafnium adalah unsur kimia dengan simbol Hf dan nomor atom 72.

**Hafnium:** *a chemical element with the symbol Hf and atomic number 72.*

**Isotop:** nuklida yang memiliki nomor atom sama tetapi mempunyai nomor massa yang berbeda.

**Isotop:** *nuclides that have the same atomic number but different mass numbers possessed.*

**Limbah Radioaktif:** benda yang mengandung dan atau terkontaminasi radionuklida pada konsentrasi atau tingkat radioaktivitas yang melampaui ambang batas keselamatan yang ditetapkan oleh lembaga yang berwenang.

**Radioactive Waste:** *objects containing or contaminated with radionuclides at concentrations or radioactivity levels that exceeded the safety threshold set by the relevant authorities.*

**Logam Radioaktif:** bahan yang menunjukkan gejala radioaktif karena radionuklida.

**Low Enriched Uranium:** Uranium yang berisi isotop Uranium 235 dalam konsentrasi kurang dari 20% dan lebih besar dari 0,7%. Uranium Bahan bakar reaktor komersial saat ini diperkaya sampai 5% atau kurang.

**Metode In-situ Leach (ISL):** In-situ pencucian (ISL), juga disebut in-situ pemulihan (ISR) atau solusi pertambangan, adalah proses penambangan digunakan untuk memulihkan mineral seperti tembaga dan uranium melalui lubang bor dibor ke deposit, in situ.

**Moderator:** bahan yang digunakan dalam reaktor untuk memperlambat neutron cepat. Pada umumnya moderator adalah air biasa, air berat, berilium dan grafit.

**Netron:** partikel elementer tidak bermuatan, memiliki massa yang sedikit lebih besar dari proton, terdapat di dalam inti atom semua unsur kecuali atom hidrogen (H-2). Neutron merupakan mata rantai dari reaksi berantai di dalam reaktor nuklir.

**Perangkat Bahan Bakar Nuklir:** Sekelompok terstruktur batang bahan bakar (panjang, ramping, tabung logam yang mengandung

***Radioactive Materials:** materials that exhibit symptoms due to radionuclide.*

***Low Enriched Uranium:** Uranium containing the isotope uranium 235 in a concentration of less than 20 % and greater than 0.7 % . Uranium Fuel current commercial reactors is enriched up to 5 % or less.*

***In-situ leaching (ISL):** also called in-situ recovery (ISR) or solution mining, is a mining process used to recover minerals such as copper and uranium through boreholes drilled into a deposit, in situ.*

***Moderator:** materials used in a reactor to slow down the fast neutrons . In general, the moderator is ordinary water , heavy water , beryllium and graphite.*

***Neutron:** uncharged elementary particle, has a mass slightly larger than protons, contained in the nucleus of all elements except hydrogen atom (H - 2). Neutron is a chain of a chain reaction in a nuclear reactor.*

***Nuclear Fuel Assembly:** A structured group of fuel rods (long, slender, metal tubes containing pellets of fissionable material, which provide*

pelet dari bahan fisi, yang menyediakan bahan bakar untuk reaktor nuklir). Tergantung pada desain, masing-masing bejana reaktor mungkin memiliki puluhan perangkat bahan bakar (juga dikenal sebagai bundel bahan bakar), yang masing-masing dapat berisi 200 atau lebih batang bahan bakar.

**Plutonium:** unsur logam berat radioaktif buatan. Isotopnya yang paling penting adalah plutonium-239 yang fisil. Isotop ini dihasilkan dari iradiasi uranium-238 dengan neutron. Plutonium-239 dapat digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir maupun sebagai bahan peledak senjata nuklir.

**Portable SMR:** Jenis Reaktor dengan kapasitas di bawah 300 MWe yang bersifat portabel.

**Reaktor Nuklir:** Tempat dimana reaksi fisi berantai dapat dimulai, dipertahankan dan dikendalikan. Komponen utamanya terdiri dari bahan bakar, pendingin, moderator, reflektor, dan pengendali.

**Radioaktivitas:** kemampuan beberapa nuklida (isotop tidak stabil) untuk memancarkan partikel-partikel, sinar gamma atau sinar-x, selama proses peluruhan spontan menjadi nuklida lain yang spontan.

*fuel for nuclear reactors). Depending on the design, each reactor vessel may have dozens of fuel assemblies (also known as fuel bundles), each of which may contain 200 or more fuel rods.*

***Plutonium:** artificial radioactive heavy metal elements. The most important isotope is fissile plutonium-239. This isotope is generated from the irradiation of uranium-238 with neutrons. Plutonium-239 can be used as fuel for nuclear reactors as well as nuclear weapons explosives.*

***Portable SMR:** Type of reactor with a capacity below 300 MWe which is portable.*

***Nuclear Reactor:** Component where the fission chain reaction can be initiated, maintained and controlled. Its main components consist of fuel, coolant, moderator, reflector, and controllers.*

***Radioaktivitas:** the ability of some nuclides (isotopes are unstable) to emit particles, gamma rays or x-rays , during the process of spontaneous decay into other nuclides spontaneous.*

**Reaktor Air Bertekanan:** Tipe Reaktor yang menggunakan air bertekanan tinggi sebagai pendingin dan moderator.

**Reaktor Air Mendidih:** Tipe Reaktor yang menggunakan air (H<sub>2</sub>O) bertekanan rendah sebagai pendingin dan moderator dimana air pendingin keluar dari reaktor berbentuk uap.

**Reaktor Air Berat Bertekanan:** tipe reaktor yang menggunakan air berat (D<sub>2</sub>O) sebagai pendingin dan moderator.

**Reaktor Suhu Tinggi:** Tipe reaktor yang beroperasi pada temperatur tinggi dan pada umumnya berpendingin bentuk gas.

**Siklus Bahan Bakar Nuklir:** rangkaian proses yang terdiri dari penambangan bijih uranium, pemurnian, konversi, pengayaan uranium dan konversi ulang menjadi logam uranium.

**Thorium:** unsur radioaktif alam dengan nomor atom 90 dan nomor massa 232. Isotop fertile thorium-232 sangat banyak di alam dan ketika menyerap neutron bertransmutasi menjadi U-233.

**Uranium:** unsur radioaktif dengan nomor atom 92 dan nomor massa 238. Terdiri atas dua jenis isotop fisil (uranium-235 dan uranium-233)

***Pressurised Water Reactor:** Reactor types which use high pressure water as coolant and moderator.*

***Boiling Water Reactor:** reactor types using Low -pressure water (H<sub>2</sub>O) as coolant and moderator, Where steam will be directly produced from coolant water.*

***Heavy Water Reactor:** Reactors type that use heavy water (D<sub>2</sub>O) as coolant and moderator .*

***High Temperature Reactor:** Reactor types that operate at high temperatures and generally uses gas as coolant.*

***Nuclear Fuel Cycle:** a series of processes consisting of uranium ore mining , refining , conversion , enrichment and re-conversion into uranium metal.*

***Thorium:** natural radioactive element with the atomic number 90 and mass number 232. A lot of fertile isotope thorium-232 are deposited in nature and when it absorbs a neutron will transmuts into U-233*

***Uranium:** radioactive element with the atomic number 92 and mass number 238. It consists of two types : fissile isotopes (uranium-235*

dan dua isotop fertil (uranium-238 dan uranium-234).

**Uranium Diperkaya:** uranium yang kandungan isotop fisil uranium-235 nya telah ditingkatkan menjadi lebih dari 0,71% (alam).

**Yellow Cake:** konsentrat uranium-oksida yang dihasilkan dari pemekatan bijih uranium hasil tambang, biasanya dinotasikan sebagai  $U_3O_8$ . Bila dikeringkan pada suhu rendah akan berwarna kuning, dan pada suhu yang lebih tinggi akan berwarna coklat terang.

*and uranium-233) and fertile isotope (uranium-238 and uranium-234).*

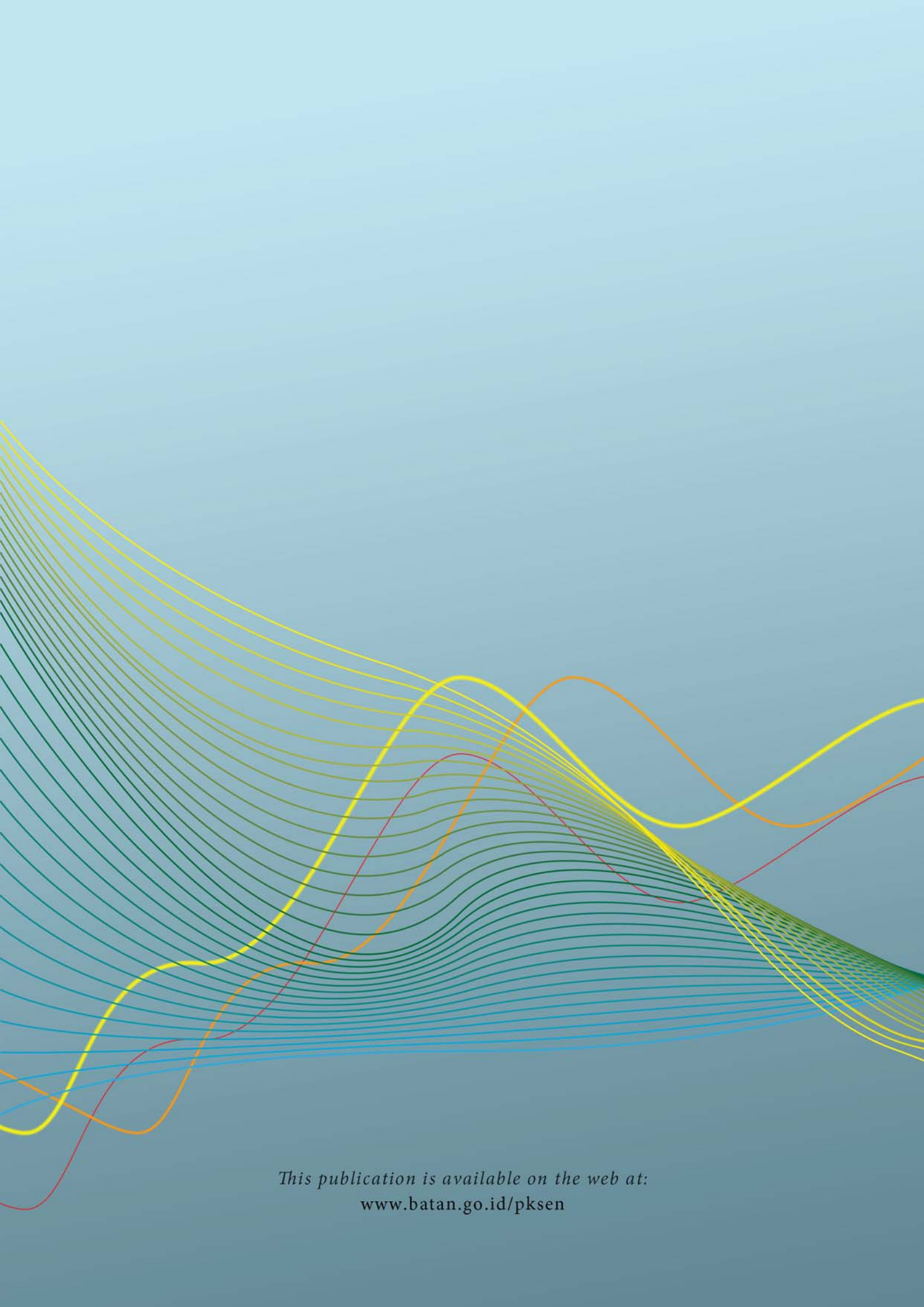
**Uranium Enrichment:** *uranium with content of fissile isotope uranium-235 more than 0.71% (natural).*

**Yellow Cake:** *uranium - oxide concentrate produced from mined uranium ore concentration, usually denoted as  $U_3O_8$ . When dried at low temperature will be yellow , and at higher temperatures will be light brown.*

## DAFTAR PUSTAKA / REFERENCES

1. Pusdatin, *Handbook of Statistic Energy Economic of Indonesia*, Kementerian ESDM, 2011.
2. Direktorat Jenderal EBTKE, “Statistik EBTKE”, Ditjen Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, Maret, 2011. Gerry Runte Worthington Sawtelle LLC, “*Probabilistic Assessment of Global Nuclear Power Plant Construction Through 2030*”, November 2013.
3. World Nuclear Association, “*The Economics of Nuclear Power*”, Vienna, February, 2014.
4. PLN, “*Final Report Feasibility Study for Bangka Nuclear Power Plant Project - Non Site Aspect*”, 2013.
5. The University of Chicago EPIC, “*Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S.*”, November 2011.
6. Grant Harris, Phil Heptonstall, Robert Gross & David Handley, 2012, “*Cost Estimates for Nuclear Power in the UK*”, ICEPT Working Paper, Ref: ICEPT/WP/2012/014, Imperial College, London, 2014.
7. World Nuclear Association (WNA), “*Supply of Uranium*”, <http://www.wna.org>,
8. August 2012.
9. World Nuclear Association (WNA), “*Thorium*”, <http://www.wna.org>, March 2014.
10. BATAN, “*Potensi Uranium & Thorium di Indonesia*”, Tahun 2013.
11. Fetter, S., “*How Long Will the World’s Uranium Supplies Last?*”, <http://www.scientificamerican.com>.
12. World Nuclear Association (WNA), “*Ensuring Security of Supply in the International Nuclear Fuel Cycle*”, August 2012.
13. BPPT, “*Outlook Energi Indonesia 2014*”, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, 2014.
14. Andrii Gritsevskiy, “*Global Trends in Nuclear Energy Policies and Technology Post Fukushima*”, International Conference on Nuclear Governance Post- Fukushima, Singapore, October 2013.
15. <https://www.iaea.org/sites/default/files/ntr2015.pdf>
16. <http://www.world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/>
17. Red Book IAEA-NEA “*Uranium 2014 :Resources, Production and Demand*”
18. <http://www.uxc.com/review/uxcPrices.aspx>
19. [http://www.uranium.info/nuclear\\_market\\_review.php](http://www.uranium.info/nuclear_market_review.php)
20. <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2014/>





*This publication is available on the web at:*  
[www.batan.go.id/pksen](http://www.batan.go.id/pksen)