

## **PERAN MOX SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR DI MASA DEPAN**

Sriyana, Suparman\*

### **Abstrak**

**PERAN MOX SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR DI MASA DEPAN.** Berdasarkan studi estimasi pasokan bahan bakar nuklir, diperkirakan bahwa mulai tahun 2000 akan terjadi kesenjangan antara produksi dan permintaan uranium di dunia. Kekurangan ini akan berpengaruh terhadap pasokan bahan bakar nuklir untuk PLTN dan terhadap harga bahan bakar nuklir. Hal ini akan memberi peluang pada bahan-bakar MOX (*Mixed OXide*) untuk lebih banyak berperan. Kecenderungan ini terlihat dengan kenaikan pemanfaatan bahan bakar MOX sebagai substitusi bahan bakar uranium untuk reaktor air ringan (*Light Water Reactor, LWR*).

### **Abstract**

**THE ROLE OF MOX FOR NUCLEAR FUEL IN THE FUTURE.** Based on nuclear fuel supply estimation study, it's predicted that starting in the year 2000 there will be a worldwide lack of uranium supply. The lack of supply will influence the nuclear fuel supply for Nuclear Power Plants and nuclear fuel costs. This will give opportunity to Mixed Oxide (MOX) fuel to have more important role. The trend is seen by the increasing usage of MOX as the substitute nuclear fuel in the Light Water Reactor (LWR).

---

\* *Bidang Partisipasi Industri Nasional, P2EN-BATAN*

## I. PENDAHULUAN

Keterbatasan sumber daya alam akan memaksa kita untuk mencari alternatif pengganti dan melakukan penghematan. Demikian juga sumber daya energi, seperti halnya negara kita telah menerapkan kebijaksanaan diversifikasi, intensifikasi dan konservasi untuk membatasi eksploitasi besar-besaran dan penghematan akan sumber daya energi, sehingga sumber daya tersebut mencukupi kebutuhan generasi mendatang.

Walaupun cadangan uranium dunia cukup berlimpah dan relatif murah, namun plutonium sebagai hasil samping dari pembakaran uranium merupakan sumber daya energi yang cukup potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar nuklir. Pemanfaatan plutonium sebagai bahan bakar nuklir adalah dalam bentuk campuran oksida, yaitu uranium-plutonium oksida yang dikenal sebagai bahan bakar MOX (*mixed oxide fuel*). Bahan bakar jenis ini disamping dimanfaatkan pada jenis reaktor pembiak cepat (FBR, *Fast Breeder Reactor*) juga digunakan sebagai bahan bakar pada jenis reaktor air ringan (LWR, *Light Water Reactor*). Kecenderungan ini menarik untuk dikaji sebab pasokan bahan bakar MOX untuk LWR akan memberikan sumbangan terhadap pemenuhan kekurangan pasokan uranium yang diperkirakan terjadi mulai tahun 2000.<sup>(1)</sup>

Rintisan penggunaan bahan bakar MOX pada LWR pertama kali dilakukan di Belgia pada tahun 1963 yaitu pada PLTN BR3, hingga mencapai 70% bahan bakar MOX (terhadap jumlah bahan bakar segar yang dimuat) pada tahun 1986. Jerman (Republik Federasi Jerman) melakukan demonstrasi pada tahun 1968 hingga tahun 1977 dengan muatan MOX maksimum 7 ton *Heavy Metal* (HM) per tahun dan dilanjutkan pemuatan MOX pada tahun 1981 hingga mencapai 16 ton HM per tahun pada tahun 1986. Kemudian diikuti Swiss yang melakukan uji demonstrasi MOX pada tahun 1984 pada PLTN Beznau 2. Sedangkan Perancis memutuskan untuk menggunakan MOX pada tahun 1985 dan hingga tahun 1994 telah diisi ulang pada 5 buah PLTN sebesar 50 ton HM per tahun dan mencapai 12 buah PLTN pada tahun 1995.

## II. BAHAN BAKAR MOX

Bahan bakar MOX adalah bahan bakar nuklir campuran antara plutonium dan uranium dalam bentuk oksida dengan perbandingan tertentu. Bahan bakar ini digunakan pada reaktor pembiak cepat dengan perbandingan  $\text{PuO}_2$  15% - 20% dan pada reaktor bependingin air dengan perbandingan  $\text{PuO}_2$  antara 3% - 5%.

Kedua oksida tersebut mempunyai sifat fisika-kimia yang serupa. Plutonium dioksida dapat membentuk berbagai jenis larutan padat dengan uranium dioksida,  $\text{PuO}_2$  mempunyai struktur kristal yang sama dengan struktur kristal  $\text{UO}_2$ , kompatibilitas  $\text{PuO}_2$  dengan kelongsong

bahan bakar sama dengan  $UO_2$ . Titik leleh  $PuO_2$  cukup tinggi yaitu sebesar  $2400^\circ C$  (titik leleh  $UO_2$  sebesar  $2850^\circ C$ ).

Sebagaimana diketahui bahwa plutonium merupakan unsur yang tidak dijumpai di alam. Unsur ini dapat diperoleh dengan cara tangkapan neutron (*neutron capture*) oleh U-238 yang merupakan bahan fertil dan tersedia di alam. Pada tahun 1940 McMillan dan Abelson di Berkeley menemukan peristiwa dimana U-238 menyerap neutron berkecepatan rendah yang menghasilkan U-239 (selama 23,5 menit). U-239 ini secara berturut-turut berdisintegrasi dengan memancarkan partikel beta membentuk Np-239 (selama 2,3 hari) dan akhirnya membentuk Pu-239. [3]



Pada kenyataannya di dalam reaktor banyak terbentuk isotop plutonium. Misalnya dalam bahan bakar reaktor berpendingin air yang telah mengalami 3 (tiga) siklus operasi, plutonium yang terbentuk mempunyai komposisi sebagai berikut : 1% isotop Pu-238, 57% isotop Pu-239, 23% isotop Pu-240, 13% isotop Pu-241 dan 6% dalam bentuk isotop Pu-242.

**Tabel 1.** Perbandingan Kandungan Plutonium Setelah Mencapai Fraksi Bakar Tertentu

BBN	Burn-up discharge (MWd/t)	Kondisi Awal(%)		Kondisi Akhir(%)	
		U-235	Pu-239+Pu-241	U-235	Pu-239+Pu-241
UO <sub>2</sub> diperkaya	33.000	3,25	0	0,92	0,74
	41.000	3,70	0	0,85	0,81
	50.000	4,20	0	0,82	0,87
MOX	36.500	0,21	3,65	0,12	2,41

Dari beberapa isotop plutonium tersebut Pu-239 dan Pu-241 adalah bahan dapat belah yang digunakan baik dalam reaktor pembiak cepat maupun reaktor berpendingin air. Sebagai gambaran pada Tabel I disajikan Pu-239 dan Pu-241 yang terbentuk setelah mencapai fraksi bakar tertentu, baik dari pembakaran uranium maupun MOX. [4]

Plutonium yang dihasilkan di atas diambil dengan memproses ulang bahan bakar bekas secara kimia. Bahan bakar bekas dilarutkan dalam asam nitrat dan plutonium diperoleh dalam bentuk larutan nitrat ( $Pu(NO_3)_4$ ). Senyawa ini mula-mula diubah menjadi serbuk  $PuO_2$ , kemudian dicampur secara mekanik dengan serbuk  $UO_2$  untuk menghasilkan  $(U,Pu)O_2$  yang siap dibuat pelet.

Campuran oksida (U,Pu)O<sub>2</sub> dapat pula dibuat secara kimia dengan cara menambahkan amonia pada campuran larutan plutonium nitrat dan uranil nitrat. Endapan yang terdiri dari Pu(OH)<sub>4</sub> dan (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>U<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, kemudian dikonversi menjadi (U,Pu)O<sub>2</sub> dengan cara memanaskannya pada temperatur 500°C – 800°C.<sup>[5]</sup>

Disamping adanya keserupaan sifat antara PuO<sub>2</sub> dengan UO<sub>2</sub> yang memungkinkan untuk dibuat bahan bakar campuran, plutonium mempunyai beberapa sifat yang dalam penanganannya lebih rumit. Seperti misalnya :

1. Pu-236, Pu-238 dan Pu-241 adalah merupakan sumber pemancar gamma dengan energi antara 0,04 MeV dan 2,7 MeV
2. Akan terbentuk pengotor Am-241 dan U-237 yang merupakan anak luruh dari Pu-241
3. Fisi spontan dari Pu-238, Pu-240 dan Pu-242 akan memancarkan neutron yang berenergi sebesar 2 MeV
4. Pemancaran neutron juga terjadi pada reaksi ( $\alpha$ ,n) terhadap oksigen, padahal Pu-239, Pu-240 dan Pu-241 adalah sumber pemancar partikel  $\alpha$ .

Berdasarkan hal-hal tersebut di atas plutonium perlu mendapatkan penanganan yang lebih teliti baik dari proses pemungutan hingga proses pabrikasi dan penyimpanannya. Seperti misalnya bahan bakar MOX telah diproduksi secara otomatis di pabrik Mol-Dessel, Belgia. Dengan sistem otomatis ini selain mempercepat produksi juga mengurangi paparan radiasi terhadap pekerja. Kapasitas produksi dari pabrik ini adalah sebesar 35 ton per tahun sejak tahun 1988.<sup>[6]</sup>

### III. KONDISI PASOKAN URANIUM DI DUNIA

Kebutuhan uranium alam untuk reaktor berdaya 1000 MWe jenis LWR sebesar 140 ton/tahun dengan siklus bahan bakar terbuka, dan sebesar 110 ton/tahun untuk siklus tertutup. Situasi uranium internasional termasuk eksplorasi, produksi, pasokan dan permintaan (*supply and demand*) sekarang dan proyeksinya merupakan pokok studi Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) dan Nuclear Energy Agency (NEA) OECD. Kedua badan ini menerbitkan secara periodik laporan keadaan uranium, produksi dan permintaan. Uranium memberi andil dalam ongkos bahan bakar nuklir antara 10% dan 15%, tergantung jenis siklusnya, dan sebesar 5% andilnya untuk ongkos pembangkitan listrik total.

Pasar uranium dibagi antara *spot market* dengan masa pengantaran dalam tahun dan pasar jangka panjang dengan masa pengantaran dalam beberapa tahun. Pangsa pasar untuk kedua bentuk pasar tersebut adalah 15 berbanding 85 hingga 10 berbanding 90 sampai tahun 1992-1993. Perbedaan harga antara kedua pasar tersebut adalah pada nilai yang diberikan untuk jaminan pasokan.

Pada tiga tahun terakhir ini telah terjadi perubahan yang berarti pada pasar uranium. Perubahan ini merupakan hasil dari kejadian-kejadian penting yang berhubungan dengan pembatasan impor uranium yang diproduksi di negara-negara persemakmuran pecahan Uni Soviet dan adanya perombakan senjata nuklir dari uranium pengayaan tinggi sebesar 500 ton dari Rusia menjadi bahan bakar uranium pengayaan rendah pada reaktor sipil.

Pembatasan dengan larangan impor dari negara bekas Uni Soviet, memberikan dampak pada cadangan uranium sipil negara barat berkurang banyak. Penjualan uranium yang diimpor dari negara bekas Uni Soviet, dan penjualan dari cadangan negara barat telah mendominasi dan menekan *spot market*. Dengan pengurangan yang berarti pada pasokan ini, maka kelebihan pasokan di pasar akan berkurang secara progresif. Oleh karena itu diharapkan bahwa hubungan pasokan dan permintaan uranium akan berubah pada dua atau tiga tahun mendatang, ke arah suasana di mana pengguna PLTN akan kembali mempunyai kepercayaan pada produser untuk pasokan bahan bakar nuklirnya.

Diharapkan juga bahwa akan terjadi pertumbuhan yang kuat dari permintaan hasil kontrak produksi baru untuk reaktor yang belum teruji untuk periode sampai 2000 dan sesudahnya. Karena itu diperkirakan bahwa harga uranium akan naik disebabkan kebutuhan meningkat.

Dampak dari introduksi bahan bakar dari bekas senjata ke dalam pasar sipil tidak akan terjadi sampai sesudah tahun 2000. Penggunaan uranium bekas senjata yang 500 ton hanya akan mengisi sebagian dari kebutuhan reaktor .

Pada tahun 1993 ada indikasi bahwa kecenderungan beberapa pasar mungkin telah terjadi sebagai indikator awal dari kondisi perubahan pasar. Kecenderungan ini meliputi : (1) Pelambatan dari penurunan produksi uranium. (2) Penurunan jumlah penutupan pusat produksi. (3) Penurunan jumlah penjualan uranium di *spot market*.

Permintaan bahan bakar untuk reaktor seluruh dunia tahun 2000 diperkirakan lebih dari 185% dari produksi tahun 1993. Permintaan di negara-negara barat diharapkan pada tahun 2000 lebih dari 240% dibandingkan tahun 1993. Ekspansi industri besar akan dibutuhkan dalam rangka untuk memenuhi pertumbuhan ini.

Produksi uranium tahun 1993 adalah sekitar 34.000 ton, kurang dari 6% produksi tahun 1992 yaitu sebesar 36.200 ton. Dengan pengecualian Amerika yang produksinya berkurang lebih dari 40%, produksi di beberapa negara hampir sama atau sedikit berkurang dibandingkan tahun 1992. Sekitar 82% produksi dunia dicapai oleh 9 negara yaitu: Australia (6,8%), Kanada (26,4%), Perancis (5,0%), Kazakhstan (8,1%), Nigeria (8,5%), Rusia (8,4%), Afrika Selatan (4,7%), dan Usbekistan (8,9%). Sisanya berasal dari Republik Cechnya, Gabon, Ukraina dan Amerika Serikat.

Sesuai skenario pasokan dan permintaan uranium untuk masa depan, hanya beberapa kebutuhan reaktor dicukupi oleh uranium segar (*fresh uranium*).<sup>(1)</sup> Kebutuhan lainnya dicukupi

oleh kelebihan cadangan, hasil olah ulang atau dari bahan bakar dari rombakan senjata. Menurut skenario ini, permintaan masa depan untuk uranium segar berkurang dengan adanya defisit yang terjadi sesudah tahun 2000.

Untuk mengatasi masalah kekurangan pasokan uranium tersebut, selain dengan mencari tambang-tambang baru, adalah dengan mengurangi pemakaian uranium yakni dengan menggunakan plutonium dalam bentuk MOX.

#### IV. PERAN BAHAN BAKAR MOX

Menurut studi yang dilakukan oleh E. Muller Kahle dan J.A. Petterson<sup>[2]</sup> (IAEA), dinyatakan bahwa proyeksi pasokan dan permintaan uranium untuk jangka pendek (1988–2000) seperti tertera pada Tabel 2. berikut.

Tabel 2. Pasokan dan Permintaan Uranium untuk Jangka Pendek

Pasokan/ Penerimaan	1988	1990	1995	2000
Permintaan, tU	41.000	44.800	47.200	52.500
Pasokan, tU	38.000	42.100	41.750	35.650
Defisit, tU	3.100	2.700	5.450	16.850
Defisit, %	7,5	6,00	11,50	32,10

Jumlah kumulatif defisit pasokan uranium untuk jangka pendek (hingga tahun 2000) diperkirakan sebesar 90.000 ton. Defisit yang terjadi hingga akhir tahun jangka pendek (tahun 2000) diperkirakan akan dipenuhi dengan redistribusi cadangan uranium. Cadangan ini cukup besar, yaitu diperkirakan 150.000 ton. Redistribusi ini dilakukan hingga mencapai jumlah cadangan yang cukup untuk dua tahun ke depan. Setelah mencapai jumlah cadangan sebesar 100.000 ton, diharapkan defisit yang terjadi akan dipenuhi oleh produksi uranium baru dengan konsekuensi harga uranium akan naik. Sedangkan untuk proyeksi jangka panjang (2000 - 2035) masih diperkirakan terjadi defisit pasokan uranium.

Studi lain menyatakan bahwa kebutuhan uranium dunia akan meningkat dari 58.400 ton pada tahun 1993 menjadi 75.500 ton pada tahun 2010. Defisit uranium adalah sebesar 10.000 ton pada tahun 1994, sedang pada tahun 2000 defisit meningkat menjadi sebesar 40.000 ton dan pada tahun 2005 defisit ini mencapai 55.000 ton hingga tahun 2010. Perkiraan ini telah memasukkan pungutan uranium dari olah ulang, namun belum memperhitungkan pasokan dari olah ulang keperluan militer yang besarnya 500 ton uranium berpengkayaan tinggi (*High Enriched Uranium/HEU*). Pasokan militer ini diperkirakan akan berperan setelah tahun 2000 yang tiap tahun sebesar 14.000 - 17.000 ton uranium berpengkayaan rendah (*Low Enriched*

Uranium/LEU) selama 15 tahun. Namun begitu masih tetap akan terjadi defisit pasokan uranium.<sup>[7]</sup>

Pada studi yang memasukkan daur ulang uranium berpengkayaan tinggi yang berasal dari keperluan militer dan pungutan uranium dari bahan bakar bekas (uranium untuk keperluan sipil), serta redistribusi cadangan uranium diperkirakan sebesar 300.000 ton. Studi ini menyatakan bahwa mulai tahun 2000 akan terjadi defisit pasokan uranium hingga tahun 2010. Saran yang diberikan dari studi ini bahwa defisit uranium dalam jangka menengah (paling tidak hingga tahun 2010) akan dipasok oleh penambangan/produksi uranium yang saat ini tengah beroperasi dan untuk pemenuhan jangka panjang sebaiknya dipenuhi oleh penambangan/produksi uranium yang baru (mengantisipasi ditutupnya produksi yang saat ini beroperasi, misalnya karena alasan ekonomi).<sup>[1]</sup>

Peran bahan bakar MOX dapat dilihat berdasarkan besarnya cadangan plutonium (terutama yang dapat belah). Kandungan plutonium dapat belah dalam bahan bakar bekas adalah 6-7 kg/ton HM untuk PWR, 5-7 kg/ton HM untuk BWR dan 2,43-2,61 kg/ton HM untuk PWR.<sup>[8]</sup> Perkiraan jumlah bahan bakar bekas di seluruh dunia dapat dilihat pada Tabel 3.<sup>[9]</sup>

Tabel 3. Perkiraan Jumlah Bahan Bakar Bekas di Seluruh Dunia

Bahan bakar	1995	2000	2005	2010
Bahan bakar bekas, tHM <sup>[9]</sup>	175.000	225.000	280.000	330.000
BBB yang akan diolah ulang, tHM <sup>[9]</sup>	60.000	75.000	90.000	120.000
Pu dari olah ulang, ton <sup>1)</sup>	269	336	403	537
Pu yang akan didapatkan bila BBB tersimpan diolah ulang, ton <sup>1)</sup>	783	1.007	1.253	1.477

<sup>1)</sup> Perhitungan ini didasarkan pada kandungan Plutonium dapat belah rata-rata terendah dari ketiga jenis reaktor di atas yaitu sebesar 4,477 kg/ton HM atau 0,447%

Jumlah plutonium cukup besar, yaitu yang berasal dari bahan bakar bekas (BBB) yang diolah ulang tersedia 269 ton Pu pada tahun 1995 dan akan menjadi 537 ton pada tahun 2010. Sedangkan bila seluruh BBB diproses ulang akan didapatkan 783 ton Pu pada tahun 1995 dan meningkat menjadi 1.477 ton Pu pada tahun 2010. Peran plutonium terlihat cukup besar untuk digunakan sebagai bahan bakar. Namun demikian pemanfaatan plutonium adalah bersama-sama dengan uranium (teknologi hingga saat ini) sehingga uranium tetap merupakan bahan bakar utama, hingga teknologi fusi komersial dan teruji. Selain dibatasi oleh komposisi dalam bahan bakar MOX pemanfaatan plutonium juga dibatasi oleh kapasitas produksi bahan bakar MOX itu sendiri. Berikut diberikan gambaran mengenai produksi dan perkiraan produksi bahan bakar MOX (dalam ton HM/tahun) : <sup>[8]</sup>

**Tabel 4.** Produksi dan Perkiraan Produksi Bahan Bakar MOX (dalam Ton HM/Tahun)

Negara	1993	1995	2000	2005	2010
Belgia (Dessel)	35	40	40	40	40
Belgia	--	--	40	40	40
Perancis (Cadarache)	15	20	25	25	25
Perancis (Marcoule)	--	20	120	120	120
Jerman (Hanau)	0 <sup>a</sup>	--	--	--	--
Jepang (Tokai)	10	10	15	15	15
Jepang	--	--	--	100	100
Rusia	--	--	(110) <sup>b</sup>	(110)	(110)
Inggeris	8	8	8	8	8
Inggeris	--	--	100	120	120
TOTAL	68	98	348	468	468

<sup>a</sup> Shutdown pada pertengahan 1991 dan tidak beroperasi lagi

<sup>b</sup> Direncanakan akan dibangun

## V. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa :

1. Cadangan plutonium dalam bahan bakar bekas yang cukup besar akan memberikan peran bahan bakar MOX di masa yang akan datang, baik untuk LWR maupun FBR.
2. Pemanfaatan plutonium sebagai substitusi uranium dalam bahan bakar LWR sesegera mungkin dan dalam jumlah yang besar akan dapat menghemat uranium.
3. Uranium akan tetap menjadi bahan bakar nuklir utama dalam jangka panjang sehingga perlu dilakukan pengembangan produksi uranium yang baru.

## DAFTAR PUSTAKA

1. GIROUX, Cogema; *Exploration, Mining and Milling including International Markets*: ITC on Nuclear Fuel Activities: Evaluation of Option, Saclay, Oct- Nov 1994.
2. IAEA, TRS 305, *Nuclear Fuel Cycle in the 1990s and Beyond the Century : Some Trends and Foreseeable Problems*, Vienna, 1989.
3. STEPHENSON, Richard, PhD; *Introduction to Nuclear Engineering*, Toronto, 1958.
4. PRUNIER, C., CEA, *Fuel Performance Overview*, ITC on Nuclear Fuel Activities : Evaluation of Options, Saclay, Oct-Nov. 1994.
5. HERSUBENO, J. B., Dr.; *Pengembangan Elemen Bakar Skala Industri* , Diklat TI- BBN , Serpong, Juli 1995.
6. IAEA, TRS 299, *Review of Fuel Element Developments for Water Cooled Nuclear Power Reactor*, Vienna, 1989.
7. VILLAROS, P. , IAEA, *Availability of Fuel Cycle Services and Supply Insurance Role of the IAEA*. ITC on Nuclear Fuel Activities: Evaluation of Options, Saclay, Oct – Nov 1994.
8. FINUCANE, J., IAEA, *Nuclear Fuel Overview*, ITC on Nuclear Fuel Activities : Evaluation of Options, Saclay, Oct-Nov 1994.
9. TAKATS, F., IAEA, *Spent Fuel Storage and Transportation; Technologies and Safety Issues*. ITC on Nuclear Fuel Activities: Evaluation of Options, Saclay, Oct-Nov 1994.