

ANALISIS POTENSI THORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR ALTERNATIF PLTN

Erlan Dewita

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) – BATAN
Jalan Kuningan Barat, Mampang Prapatan, Jakarta Selatan 12710
Telp/Fax: (021) 5204243 Email: erland@batan.go.id

Masuk: 16 Februari 2012

Direvisi: 15 Maret 2012

Diterima: 25 Mei 2012

ABSTRAK

ANALISIS POTENSI THORIUM SEBAGAI BAHAN BAKAR NUKLIR ALTERNATIF PLTN. Dewasa ini, sebagian besar reaktor daya nuklir dunia menggunakan bahan bakar basis uranium (UO_2) dengan pengayaan 2-5%. Namun akhir-akhir ini, perhatian dunia banyak tertuju pada bahan bakar basis thorium terkait beberapa keuntungan. Selain pertimbangan sumberdaya thorium(Th) dunia yang besar (sekitar 3 kali lebih besar dari sumber daya uranium), penggunaan bahan bakar basis thorium juga akan mengurangi jumlah limbah radioaktif, sifat-sifat nuklir U-233 juga lebih unggul dibanding U-235 dan Pu-239 dalam reaktor termal. Penggunaan bahan bakar nuklir basis thorium diharapkan bermanfaat untuk menjaga keberlanjutan energi nuklir dan keamanan dari senjata nuklir. Tujuan studi adalah menganalisis potensi thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif untuk PLTN ditinjau dari aspek sumber daya alam dan proses pemisahan thorium dari monazite. Studi dilakukan dengan mengkaji beberapa pustaka. Hasil studi diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan bagi pemerhati/ peneliti bahan bakar nuklir untuk mengembangkan bahan bakar basis thorium. Hasil menunjukkan bahwa thorium tersebar dalam lapisan bumi dalam bentuk batuan dan mineral. Mineral dengan kandungan thorium terbesar adalah mineral thorium fosfat-tanah jarang, monazit (Ce-La-Y) mengandung sekitar 12% ThO_2 , namun rata-rata mengandung ThO_2 sekitar 6-7%. Sumberdaya thorium dunia 5.385.000 ton dan sumberdaya terbesar terdapat di India yaitu 846.000 ton (16%). Th-232 merupakan bahan fertil yang lebih unggul dibanding U-238, karena tampang lintang serap neutron Th-232 dalam reaktor termal 3 kali lebih tinggi dibanding U-238 dimana untuk Th-232 (7.4 barns) dan U-238 (2.7 barns). Sedangkan untuk proses ekstraksi dari monazit dikenal ada 2 proses, yaitu opening acid dan opening alkali, sedangkan pemungutan thorium dari bahan bakar bekas digunakan proses thorex.

Kata kunci: potensi, thorium, bahan bakar, cadangan, uranium

ABSTRACT

POTENCY ANALYSIS OF THORIUM AS ALTERNATIVE NUCLEAR FUEL FOR NPP. Nowadays, most of nuclear power reactors use (UO_2) uranium based fuel with 2-5% enrichment uranium. However, recently much attention are given to thorium based fuel correlation to several advantages of thorium used. Besides of consideration that thorium reserve in the world is high (about 3 times higher than uranium reserves), the use of thorium based fuel will also decrease the amount of radioactive waste, nuclear properties of U-233 is better than U-235 and Pu-239 in the thermal reactor. Use of thorium based nuclear fuel is hoped useful for keep nuclear energy sustainability and safeguard of nuclear weapon. Object of this study is analyzing the thorium potency as alternative nuclear fuel for NPP in viewpoint of thorium reserves aspect and thorium separation process from monazit or from reprocessing of spent fuel. Study is conducted by assess several references. Result of this study is hoped to be valuable for nuclear fuel researcher to developing thorium based fuel. Result of this study mentioned that thorium is distributed in earth's crust as ores or minerals. Mineral with highest thorium is thorium fosfat-rare earth, monazit (Ce-La-Y) containing about 12% ThO_2 , however, it containing ThO_2 average about 6-7%. The world's thorium resources is 5.385.000 ton and the highest thorium resurces is 846.000 ton (16%) in India. Thorium-232 is fertile material which is better than U-238, because neutron absorbed cross section of Th-232 in thermal spectrum is 3 times higher than U-238 where is Th-232 (7.4 barns) and U-238 (2.7 barns). While, there are 2 processes of thorium extraction, namely opening acid dan opening alkali and thorium recovery from thorium based nuclear spent fuel is used thorex.

Keywords: potency, thorium, fuel, reserves, uranium

1. PENDAHULUAN

Dewasa ini, terdapat 430 reaktor daya nuklir komersial (PLTN) yang beroperasi di 31 negara dengan total kapasitas 372,000 MWe dengan kontribusi listrik sebesar 13.5% dari kebutuhan listrik dunia. Dari berbagai jenis PLTN yang beroperasi di dunia (430 unit PLTN), tipe PWR merupakan jenis reaktor yang paling banyak dioperasikan dengan jumlah 272 unit^[1]. Jenis reaktor tersebut menggunakan bahan bakar uranium-235 dalam bentuk pellet UO_2 dengan pengayaan 2-5%. Karena itu, dibutuhkan cadangan uranium-235 yang cukup besar untuk memasok bahan bakar PLTN. Sebagai gambaran, pada akhir tahun 2004 seluruh reaktor daya komersial yang beroperasi di seluruh dunia telah membutuhkan 67 320 ton U (or 79 390 ton U_3O_8), sedangkan produksi tambang uranium dunia adalah 40 263 ton U atau kira-kira 60% dari kebutuhan. Hal ini merupakan penurunan dari tahun sebelumnya dimana produksi tambang uranium dunia (35 772 ton U) dimana hanya menyediakan 52% kebutuhan dunia (68 435 tU). Untuk menutupi kekurangan pasokan tahunan digunakan sumber sekunder berupa hasil reprocessing bahan bakar bekas, pengayaan ulang dan lain-lain.

Walaupun cadangan uranium diperkirakan masih cukup, namun penggunaan uranium secara terus menerus menyebabkan jumlah cadangannya semakin menipis. Karena itu, dalam rangka menjaga keamanan energi dan keberlanjutan (*sustainability*) energi nuklir, maka akhir-akhir ini perhatian dunia mulai mengarah pada penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif. Thorium merupakan bahan fertil yang apabila menyerap neutron akan menjadi bahan fisil U-233 yang dalam reaktor nuklir dapat menghasilkan reaksi berantai sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar PLTN. Jumlah cadangan thorium dunia cukup besar yaitu 3-4 kali lebih banyak dibanding uranium dan terdistribusi secara merata. Selain sumber daya thorium yang lebih besar dibanding uranium, thorium memiliki beberapa keunggulan dibanding uranium, diantaranya rasio konversi thorium menjadi isotop U-233 lebih tinggi dibanding dengan U-238 menjadi Pu-239. Hal ini disebabkanampang lintang serap neutron termal thorium (7.4 barns) kira-kira 3 kali lebih tinggi dibanding uranium yaitu 2.7 barns. Selain itu, thorium dioksida secara kimia juga lebih stabil dan tahan radiasi dibanding uranium dioksida. Sedangkan dari besar energi yang dibangkitkan, hasil fisi 1 atom U-233 lebih besar yaitu 81,95 TJ/kg dibanding hasil fisi 1 atom U-235 (77 TJ/kg). Namun demikian, tidak seperti uranium alam yang mengandung ~ 0,7% isotop fisil U-235, thorium alam merupakan bahan fertil, karena itu thorium dan bahan bakar berbasis thorium seperti thorium karbida, oksida dapat digunakan dalam reaktor daya dan reaktor riset dalam bentuk kombinasi dengan isotop fisil U-235 atau Pu-239. Hal ini bertujuan agar dapat terjadi konversi menjadi isotop fisil U-233 yang berdampak dapat memperbesar jumlah sumberdaya bahan fisil dunia. Pada dasarnya, Uranium-233 telah digunakan sebagai bahan bakar untuk beberapa jenis reaktor, seperti :*Heavy Water Reactors* (PHWR), *High Temperature Gas Cooled Reactors* (HTR), *Boiling Water Reactors* (BWR), *Pressurized Water Reactors* (PWR), *Fast Neutron Reactors* (FNR), *Molten Salt Reactors* (MSRs, LFTRs)[2].

Mineral thorium ditemukan dalam sebagian besar batuan dan tanah. Pada umumnya tanah mengandung rata-rata sekitar 6 ppm thorium. Selain dalam tanah, thorium juga terdapat dalam beberapa mineral dan mineral utama yang mengandung thorium adalah Monazit (Ce, La, Y, Th) PO_4 , thorit (Th, U) SiO_4 , Brockite (Ca, Th, Ce) $(PO_4) H_2O$, Xenotime (Y, Th) PO_4 , Euxenite (Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) $_2O_6$ dan thorianite ($ThO_2 + UO_2$). Di antara beberapa mineral tersebut, monazit merupakan mineral tanah jarang thorium-fosfat yang mengandung thorium oksida terbesar yaitu sekitar 12%, namun demikian kandungan thorium dalam mineral berbeda-beda tergantung lokasi dan rata-rata mengandung thorium oksida sekitar 6-7%^[3]. Jumlah thorium adalah beberapa kali lebih banyak dalam lapisan

bumi dibanding isotop uranium dan thorium-232 beberapa ratus kali lebih banyak dibanding uranium-235. Terdapat 2 proses yang dapat dilakukan untuk mengekstraksi thorium dari monazit yaitu proses asam dan proses alkali. Studi yang dilakukan terhadap potensi bahan bakar berbasis thorium ditinjau dari aspek potensi jumlah sumberdaya thorium, sifat fisika kimia, sifat neutronik dan proses ekstraksi untuk menghasilkan thorium dari monasit. Studi dilakukan untuk memperoleh gambaran dan pemahaman tentang potensi thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif untuk PLTN ditinjau dari jumlah sumberdaya alamnya dan proses ekstraksi maupun reprocessing dari bahan bakar bekas.

2. SIFAT – SIFAT THORIUM

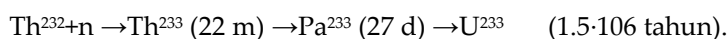
2.1. SIFAT KIMIA

Thorium merupakan unsur yang mempunyai sifat reaktif dan dapat bereaksi dengan oksigen, hidrogen, halogen dan sulphur. Thorium bereaksi secara lambat dengan air, tetapi tidak mudah larut dalam hampir semua asam, kecuali asam khlorida. Thorium dapat larut dalam asam nitrat pekat yang mengandung sejumlah kecil katalis *ion fluoride*. Serbuk thorium bersifat *pyrophoric* (terbakar secara spontan dengan udara), karena itu harus berhati-hati dalam penanganannya^[4].

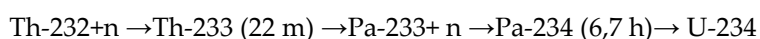
2.2. SIFAT FISIKA

Thorium murni merupakan logam bersifat radioaktif, berwarna putih keperakan yang relatif stabil dalam udara dan dapat mempertahankan warnanya selama beberapa bulan. Bila terkontaminasi dengan oksida, thorium bereaksi secara perlahan menjadi berwarna abu-abu dan akhirnya menjadi hitam. Sifat fisika thorium sangat dipengaruhi oleh derajat kontaminasi dengan oksida. Thorium oksida mempunyai titik leleh sekitar 3.300°C, yang merupakan nilai tertinggi dibanding titik leleh oksida lainnya serta titik didih 5063 K (4790 °C). Hanya beberapa unsur seperti tungsten dan beberapa senyawa seperti tantalum carbida yang mempunyai titik leleh lebih tinggi. Thorium murni lembut, sangat ulet dan dapat di *cold-rolled*, *swaged*, dan *drawn*. Isotop thorium yang paling stabil adalah thorium-232 dengan waktu paruh 14.05 juta tahun.

Terdapat 25 isotop thorium yang dikenal dan semuanya tidak stabil dengan massa atom antara 212 hingga 236. Diantara isotop-isotop tersebut, yang paling stabil adalah thorium-232 (Th232) yang merupakan sebuah isotop pengemisi alpha dan mempunyai waktu paruh sangat panjang yaitu sekitar 1.41×10^{10} tahun. Dalam teras reaktor, Th-232 menyerap neutron menjadi Th-233 yang selanjutnya meluruh dengan sangat cepat (waktu peluruhan 22 menit) menjadi Protactinium-233 (Pa233) dan meluruh lagi menjadi U-233 (waktu peluruhan 27 hari):



Satu hal yang perlu diketahui bahwa reaksi ini berkompetisi dengan lainnya tergantung pada tingkat fluks rata-rata :



2.3. SIFAT NEUTRONIK

Thorium maupun uranium dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir. Meskipun, bukan merupakan bahan fisil, thorium-232 (²³²Th) akan menyerap neutron lambat untuk menghasilkan uranium-233 (²³³U) yang merupakan bahan fisil. Satu sifat yang menarik dari Th-232 adalah thorium-232 merupakan bahan fertil yang lebih unggul dibanding U-238,

karenaampang lintang serap neutron Th-232 dalam reaktor termal 3 kali tinggi dibanding U-238 dimana untuk Th-232 (7.4 barns) dan U-238 (2.7 barns). Sehingga, konversi Th-232-233U lebih efisien dibanding U-238 – Pu-239 dalam spektrum neutron termal. Selanjutnya, dalam spektrum termal, proses fisi isotop U-233 dengan neutron lambat (termal) akan menghasilkan neutron lebih tinggi per neutron yang diserap dibanding uranium-235 dan plutonium-239. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Jumlah neutron hasil fisi rata-rata yang diproduksi per neutron termal yang diserap (yang disebut faktor “eta”) adalah 2.27 untuk U-233 dibanding dengan 2.07 untuk U-235 dan 2,11 untuk Pu-239. Karena itu, U-233 merupakan isotop fisil terbaik dari semua isotop fisil yang ada dalam spektrum neutron termal. Ditinjau dari energi yang dihasilkan, hasil fisi 1 atom U-233 menghasilkan energi sebesar 197.9 MeV dan fisi 1 atom of U-235 menghasilkan 200 MeV, karena itu untuk menghasilkan energi yang sama untuk bahan bakar thorium membutuhkan neutron yang lebih banyak dibanding U-235^[5].

Tabel 1. Perbandingan Sifat Nuklir dari isotop fisil U-233, U-235 dan Pu-239^[6]

Isotop	U-235		Pu-239		U-233	
	Spektrum Termal	Cepat	Spektrum Termal	Cepat	Spektrum Termal	Cepat
σ_f (barn)	582	1,81	743	1,76	531	2,79
σ_c (barn)	101	0,52	270	0,46	46	0,33
$\alpha = \sigma_f / \sigma_c$	0,17	0,29	0,36	0,26	0,09	0,12
v	2,42	2,43	2,87	2,94	2,49	2,53
$\eta = v \cdot \sigma_f / \sigma_c$	2,07	1,88	2,11	2,33	2,29	2,27
β_{eff} (%)	0,65		0,210		0,276	

3. CADANGAN DAN SUMBER DAYA THORIUM

Thorium tersebar dalam lapisan bumi dalam bentuk batuan dan mineral, biasanya bercampur dengan uranium, unsur-unsur tanah jarang, niobium dan tantalum oksida, silikat dan fosfat. Dalam deposit jenis vein, thorium berada sebagai thorite (thorium silicate) atau thorianite (thorium oksida). Pada dasarnya terdapat beberapa mineral thorium dan beberapa mineral thorium yang utama seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi utama bijih/ mineral Thorium^[7]

Ore	Composition
Thorite	(Th,U)SiO ₄
Thorianite	(ThO ₂ +UO ₂)
Thorogummite	Th(SiO ₄) _{1-x} (OH) _{4x}
Monazit	(Ce,La,Y,Th)PO ₄
Brocktite	(Ca,Th,Ce)(PO ₄)H ₂ O
Xenotime	(Y,Th)PO ₄
Euxenite	(Y,Ca,Ce,U,Th)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆
Iron Ore	Fe + rare earths Th apatite

Di antara mineral tersebut diatas, mineral dengan kandungan thorium terbesar adalah mineral thorium fosfat-tanah jarang, monazit (Ce-La-Y) yang mengandung sekitar 12% thorium oksida, namun rata-rata mengandung thorium oksida sekitar 6-7% dan merupakan sumber thorium yang akhir-akhir ini paling banyak diproduksi secara komersial^[3]. Namun demikian, monazit mempunyai kandungan thorium yang berbeda-beda tergantung pada lokasi mineral. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3, terlihat bahwa monazit yang

terdapat di negara Srilanka mengandung thorium oksida (ThO₂) terbesar yaitu 14,32%berat. Mineral lain yang mengandung thorium terbesar kedua adalah thorite (ThSiO₄), dan thorianite (ThO₂ + UO₂). Sumberdaya monazit dunia diperkirakan sekitar 12 juta ton, sebagian besar dari sumberdaya tersebut terdapat dalam pasir yang terdeposit pada pa ntai selatan dan timur India ^[9].

Tabel 3. Kandungan Thorium dalam monazite ^[9]

Negara	Komposisi monazit (% berat)								
	ThO ₂	U ₃ O ₈	(RE) ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂	Oksida lain
India	8,88	0,35	59,37	(28,46)	27,03	0,32	0,36	1,00	-
Brazil	6,50	0,17	59,20	(26,80)	26,00	0,51	1,75	2,20	-
Florida, USA	3,10	0,47	40,70	-	19,30	4,47	-	8,30	-
Afrika Selatan	5,90	0,12	46,41	(24,90)	27,00	4,50	0,42	3,30	-
Malaysia	8,75	0,41	46,20	(23,20)	20,00	-	2,20	6,70	-
Korea	5,47	0,34	65,00	(24,70)	-	0,35	0,19	4,08	-
Italia	11,34	15,64	35,24	-	31,02	-	-	-	6,76
Srilanka	14,32	0,10	53,51	-	26,64	-	-	-	5,03

Thorium di alam terdeposit dalam batuan dan mineral, sumber thorium berdasarkan jenis deposit ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Cadangan Thorium berdasarkan jenis deposit^[10]

Jenis deposit	Resources (1000 tTh)	Persentase
Carbonatite	1.900	31,3
Placer	1.500	24,7
Vein type	1.300	21,4
Alkaline rocks	1.120	18,4
Lain-lain	258	4,2
Total	6.078	100,0

Jumlah Sumber daya/ cadangan thorium di dunia adalah 3-4 kali lebih besar dibanding uranium. Berdasarkan data IAEA tahun 2005, jumlah cadangan thorium dunia 6.078.000 tTh, tetapi jumlah ini setiap tahun berubah tergantung ditemukan atau tidaknya cadangan baru. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5, menunjukkan bahwa sumber daya thorium terbesar terdapat di negara India.

Diantara negara-negara di dunia, 5 negara yang memiliki sumber daya thorium dalam jumlah besar seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 adalah India (846.000 ton), Turkey (744.000 ton), Brazil (606.000 ton), Australia (521.000 ton) dan USA (434.000 ton).

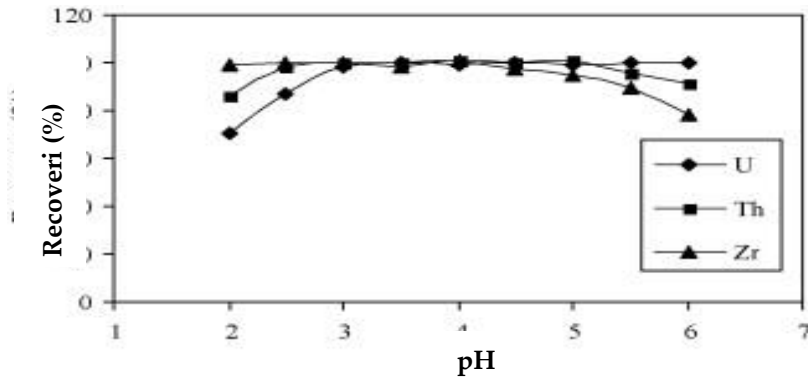
Tabel 5. Sumber daya Thorium dunia^[11]

Negara	Tonnes	% Total
India	846.000	16
Turkey	744.000	14
Brazil	606.000	11
Australia	521.000	10
USA	434.000	8
Egypt	380.000	7
Norway	320.000	6
Venezuela	300.000	6
Canada	172.000	3
Russia	155.000	3
South Africa	148.000	3
China	100.000	2
Greenland	86.000	2
Finland	60.000	1
Sweden	50.000	1
Kazakhstan	50.000	1
Negara-negara lain	413.000	8
Total dunia	5.385.000	

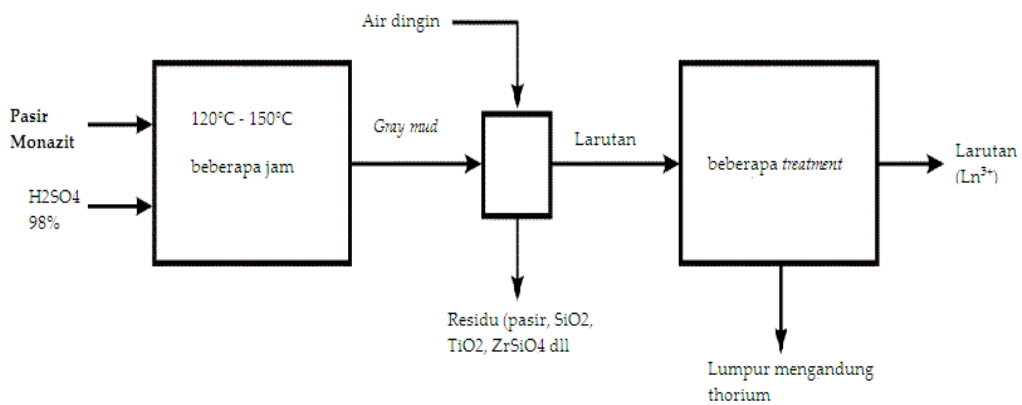
OECD NEA & IAEA, Uranium 2011: Resources, Production and Demand ("Red Book"), using the lower figures of any range and omitting 'unknown' CIS estimate.

4. PROSES EKSTRAKSI THORIUM DARI PASIR MONAZIT DAN MINERAL LAIN

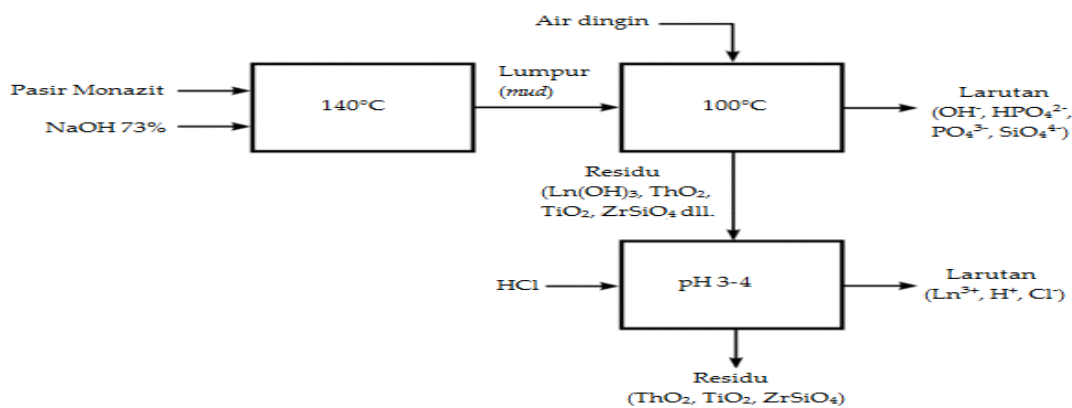
Proses ekstraksi thorium, diawali dengan "breaking" monazite, selanjutnya dilarutkan menggunakan 2 metode seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3, pertama adalah memanaskan monazite pada temperatur (120-150°C) bersama asam sulfat pekat (98%) selama beberapa jam (H_2SO_4) sehingga dihasilkan cairan yang mengandung unsur-unsur tanah jarang, Th dan U. Kedua, proses basa dimana monazite dipanaskan pada temperature 140°C menggunakan larutan sodium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 73% dimana Th dan U dipisahkan selama proses sebagai sebuah hidroksida. Pemrosesan monazit menyebabkan terbentuknya konsentrat tanah jarang yang mengandung uranium (U), thorium (Th) dan fosfat (PO_4^{3-}). Thorium diekstrak sebagai residu tidak larut ke dalam fase organik yang mengandung amina. Selanjutnya dipisahkan atau dilucuti menggunakan ion seperti nitrat, klorida, hidroksida, atau karbonat, thorium kembali ke fase cair. Selanjutnya, Th diendapkan dan dikumpulkan. Pemisahan Th dari larutan biasanya dilakukan berdasarkan pada kelarutan dalam asam encer dimana thorium fosfat kurang larut dibanding fosfat dari logam lainnya yang ada dalam larutan. Akibatnya, secara parsial diperoleh endapan larutan asam dan endapan yang diperoleh kaya dengan thorium fosfat. Proses pengendapan thorium fosfat harus diulang beberapa kali sampai diperoleh endapan yang hampir seluruhnya mengandung garam thorium. Pada proses ekstraksi Th, terdapat beberapa faktor yang berpengaruh, yaitu jenis pelarut, konsentrasi pelarut dan pH larutan. Pengaruh pH terhadap ekstraksi Th ditunjukkan pada Gambar 2. dimana hasil ekstraksi terbesar terjadi pada pH sekitar 4 (suasana asam). Metode asam menyebabkan dihasilkannya limbah asam yang cukup signifikan, dan kehilangan kandungan fosfate dari bijih.



Gambar 1. Pengaruh pH pada rekovery (%)^[12]



Gambar 2. Proses Ekstraksi Thorium dari Monazit menggunakan proses asam^[4]



Gambar 3. Proses Ekstraksi Thorium dari Monazit menggunakan proses basa^[4]

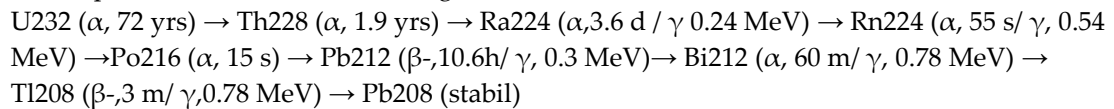
Beberapa metode tersedia untuk memproduksi logam thorium: thorium dapat diperoleh dengan mereduksi oksida thorium dengan kalsium, dengan elektrolisis klorida anhidrat thorium dalam campuran natrium dan kalium klorida, dengan reduksi mereduksi kalsium dari thorium tetraklorida dicampur dengan seng klorida anhidrat, dan dengan mereduksi thorium tetraklorida dengan logam alkali.

5. REPROSESING BAHAN BAKAR BASIS THORIUM

Seperti yang dibahas sebelumnya bahwa thorium merupakan bahan fertil, karena itu penggunaannya dalam reaktor memerlukan bahan fisil sebagai penggerak (*driver*) sehingga

reaksi berantai dapat dipertahankan. Dalam reaktor, thorium (Th-232) berubah menjadi bahan fisil U-233. Bahan fisil U-233 tersebut dapat diperoleh kembali sebagai hasil reprocessing bahan bakar basis thorium bekas yang biasa disebut dengan Thorex (*Thorium Extraction*). U-233 yang telah dipisahkan maupun thorium dan isotop fisil lainnya dapat di refabrikasi menjadi rakitan bahan bakar baru dan dikembalikan ke reaktor lainnya sebagai bagian dari daur bahan bakar tertutup. Namun, salah satu kelemahan prinsip dari daur thorium adalah adanya U-232 yang terbentuk dalam teras melalui reaksi nuklir pada Th232 and U-233. U-232 merupakan pengemisi alpha dengan umur paruh 72 tahun.

Rantai peluruhan U-233 adalah sebagai berikut :



Dapat dilihat bahwa rantai ini meliputi pengemisi gamma kuat seperti Thallium-208 (sekitar 2.6 MeV). Karena itu, adanya U-232 mensyaratkan bahwa pembuatan bahan bakar berbasis U-233 dilakukan dari jarak jauh dari lingkungan gamma dan memerlukan biaya tambahan yang signifikan. Karakteristik nuklir U-233 sangat berbeda dengan plutonium grade untuk senjata nuklir (weapons grade plutonium -WGP) atau uranium pengayaan tinggi (HEU). ²³²Th meluruh sangat lambat tetapi isotop thorium lainnya terjadi dalam rantai peluruhan uranium dan thorium. Sebagian besar dari isotop-isotop ini berumur pendek, sebab itu lebih radioaktif dibanding ²³²Th.

6. PEMBAHASAN

Studi terhadap potensi terhadap thorium sebagai bahan bakar nuklir dilakukan untuk melihat potensi yang dimiliki. Selain pertimbangan penggunaan thorium adalah untuk menjaga keamanan energi dan keberlanjutan (*sustainability*) energi nuklir. Walaupun pada kenyataannya jumlah cadangan uranium diperkirakan masih cukup, namun penggunaan uranium secara terus menerus menyebabkan jumlah cadangannya semakin menipis. Keadaan ini dapat dilihat pada Tabel 6 dimana pada tahun 2011 sudah terjadi defisit uranium di beberapa negara dan hanya Canada yang mengalami surplus Uranium.

Tabel 6. Kebutuhan dan Produksi Uranium di Beberapa Negara^[13]

Negara	Kebutuhan Uranium (2011)	% dari kebutuhan dunia	Produksi hasil tambang (2010)	Defisit
USA	18,376	29	1,660	16,716
Perancis	9,254	15	0	9,254
Jepang	2,805	4	0	2,805
Rusia	4,912	8	3,562	1,350
Jerman	1,934	3	0	1,934
Korea Selatan	4,029	6	0	4,029
UK	2,093	3	0	2,093
Ukraina	2,288	3	860	1,428
Canada	1,845	3	9,783	-7,938 Surplus
Spanyol	1,379	2	0	1,379
Sweden	1,366	2	0	1,366
Rest of world	12,271	20		
Total	62,552	100	53,663	8,669 (14%)

Pertimbangan penggunaan thorium sebagai bahan bakar nuklir alternatif adalah thorium mempunyai sifat-sifat nuklir yang unggul dan jumlah cadangannya 3-4 kali lebih besar dibanding uranium. Selain itu, thorium dioksida lebih unggul dibanding uranium dioksida terkait kinerjanya sebagai bahan bakar reaktor. Thorium dioksida merupakan oksida yang sangat stabil sehingga dapat mempertahankan stabilitas dimensinya pada derajat bakar tinggi. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7, bahwa ThO₂ mempunyai konduktivitas panas lebih tinggi dan koefisien ekspansi panas yang lebih rendah dibanding UO₂, 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. Titik leleh ThO₂ (3378°C) lebih tinggi sekitar 500°C dibanding uranium dioksida (2865°C). Perbedaan temperatur ini dapat digunakan untuk menyediakan margin keselamatan yang cukup apabila terjadi kenaikan temperatur akibat kehilangan pendingin (*loss of coolant*).

Tabel 7. Perbandingan Sifat Fisika Bahan Bakar UO₂, PuO₂ dan ThO₂^[14]

SIFAT	U	UO ₂	Pu	PuO ₂	Th	ThO ₂
Struktur Kristal	Orthorhom 298 – 935K) Tetragonal (935K-1045K)	FCC (tipe CaF ₂)				
Titik Leleh (MP), K	1405	-3123	913	-2623	2025	-3643
Theoretical density , g/cm ³ pada 298K	19,05	10,96	19,86	11,46	11,68	10,00
Konduktivitas panas (Wm ⁻¹ K ⁻¹), 773K	30	4,8	30	4,48	43,1	6,2
Koefisien thermal expansion (K ⁻¹)	14,2x10 ⁻⁶ (30-600K)	10x10 ⁻⁶ (298- 1223K)	56x10 ⁻⁶	11,4x10 ⁻⁶ (298- 1223K)	11,9x10 ⁻⁶ (30- 600K)	9,67x10 ⁻⁶ (298- 1223K)

Terdapat beberapa tipe reaktor yang dapat menggunakan thorium sebagai bahan bakar, antara lain: PHWR, HTR, BWR, PWR, FNR, MSR dan ADS. Dalam spektrum termal, U-233 merupakan material fisil terbaik karena tampang lintang tangkapan netronnya jauh lebih rendah dibanding dengan Pu-239 (267 barns) dan U-235 (100 barns), meskipun Pu-239 memproduksi jumlah netron yang lebih tinggi per fisi dibanding U-233. Sebab itu, siklus 232Th–233U mungkin mengkonsumsi lebih sedikit bahan fisil, dibanding siklus 238U–239Pu. Fraksi perlambatan netron (*delayed neutron fraction-β_{eff}*) berturut-turut dari U-233 dan U-235 adalah 0.31% dan 0.69% . Namun demikian penggunaan thorium sebagai bahan bakar memiliki beberapa aspek yang menguntungkan dan tantangan. Meskipun Thorium mempunyai beberapa keuntungan, seperti : ketersediaannya di alam cukup besar yaitu 3-4 kali lebih besar dibanding uranium, karena itu bahan bakar thorium dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif selain bahan bakar uranium sehingga dapat digunakan untuk menjaga/menjamin keberlanjutan jangka panjang tenaga nuklir. Daur bahan bakar thorium merupakan sebuah cara yang menarik untuk memproduksi energi nuklir jangka panjang dengan limbah radioaktif aktivitas rendah. Reaktor berbasis thorium tidak menghasilkan Pu-239 sehingga tidak dapat digunakan untuk membuat senjata nuklir.

Tampang lintang serap netron termal dari Th-232 (7.4 barns) adalah hampir 3 kali U-238 (2.7 barns). Karena itu, konversi thorium menjadi U-233 lebih tinggi dibanding konversi U-238 menjadi Pu-239. Dengan demikian, thorium merupakan bahan fertil yang lebih

unggul dibanding U-238 dalam reaktor termal tetapi dalam reaktor cepat thorium merupakan bahan fertil yang kurang unggul dibanding uranium. Untuk inti isotop fisil U-233, jumlah neutron yang dibebaskan per neutron yang diserap (η) adalah lebih besar dari 2,29 melebihi nilai yang dimiliki U-235 dan Pu-239. Selanjutnya, bertentangan dengan siklus U238–239Pu dimana pembiakan hanya diperoleh dengan spektrum neutron cepat, siklus bahan bakar ^{232}Th – ^{233}U dapat beroperasi dengan spektrum termal atau epithermal dan cepat. Thorium dioksida secara kimia lebih stabil dan mempunyai ketahanan radiasi yang lebih tinggi dibanding uranium dioksida. Laju pelepasan produk fisi untuk bahan bakar berbasis ThO_2 adalah satu tingkat lebih rendah dibanding UO_2 . ThO_2 mempunyai sifat termofisika (*thermophysical*) lebih disukai karena konduktivitas panasnya lebih tinggi dan ekspansi panasnya lebih rendah dibanding UO_2 . Dengan demikian, bahan bakar berbasis ThO_2 diharapkan mempunyai kinerja yang lebih baik dibanding UO_2 dan bahan bakar campuran oksida berbasis UO_2 . ThO_2 relatif lebih inert dan tidak mengoksidasi seperti UO_2 yang dengan mudah mengoksidasi menjadi U_3O_8 dan UO_3 . Karena itu, penyimpanan sementara jangka panjang dan pembuangan permanen dalam tempat penyimpanan bahan bakar bekas berbasis ThO_2 adalah lebih mudah tanpa permasalahan oksidasi. Daur bahan bakar dan bahan bakar berbasis Th mempunyai ketahanan proliferasi hubungan pembentukan U-232 melalui reaksi ($n,2n$) dengan Th-232, Pa-233 dan U-233. Umur paruh U-232 hanya 73,6 tahun dan produk pasangan (*daughter products*) mempunyai umur paruh yang sangat pendek dan seperti Bi-212 dan Tl-208 mengemisikan radiasi gamma yang sangat kuat. Dari pertimbangan yang sama, ^{235}U dapat digunakan sebagai uranium pengayaan tinggi (HEU) dan plutonium *grade* senjata nuklir (WPu) untuk menghindari penggunaan tidak untuk tujuan damai. Pada daur bahan bakar ^{232}Th – ^{233}U , jumlah plutonium dan aktinida minor umur panjang (MA: Np, Am and Cm) terbentuk sangat sedikit dibanding daur bahan bakar ^{238}U – ^{239}Pu , sehingga meminimalkan radiotoksitas bahan bakar bekas. Namun, pada daur bahan bakar ujung belakang dari daur bahan bakar ^{232}Th – ^{233}U terdapat radionuklida yang lain seperti ^{231}Pa , ^{229}Th and ^{230}U , yang mungkin mempunyai dampak radiologis jangka panjang.

Namun demikian, selain aspek yang menguntungkan juga terdapat beberapa tantangan dalam penggunaan thorium sebagai bahan bakar, diantaranya adalah: Titik leleh ThO_2 (3.350°C) lebih tinggi dibanding UO_2 (2.800°C), karena itu, dibutuhkan temperatur sintering yang lebih tinggi ($>2.000^\circ\text{C}$) untuk memproduksi bahan bakar campuran oksida (*mixed oxide*) berbasis ThO_2 and UO_2 dengan densitas tinggi. Pencampuran bahan bantuan (CaO , MgO , Nb_2O_5 dan lain-lain) diperlukan untuk mencapai densitas pelet yang diinginkan pada temperatur rendah. Bahan bakar campuran oksida berbasis ThO_2 and UO_2 bersifat inert dan tidak seperti bahan bakar UO_2 and $(\text{U,Pu})\text{O}$, dimana tidak mudah larut dalam asam nitrat pekat. Penambahan sejumlah kecil HF dalam HNO_3 pekat pada dasarnya menyebabkan korosi peralatan dan perpipaan *stainless steel* dalam pembangkit olah ulang (*reprocessing*). Namun demikian masalah korosi dapat dimitigasi dengan penambahan aluminium nitrat. Larutan THOREX mendidih [$13\text{ M HNO}_3 + 0.05\text{ M HF} + 0.1\text{ M Al}(\text{NO}_3)_3$] at $\sim 393\text{ K}$ dan periode pelarutan yang panjang dibutuhkan untuk bahan bakar basis ThO_2 . Bahan bakar Th atau berbasis Th mengandung jumlah signifikan ^{232}U yang mempunyai umur paruh hanya 73,6 tahun dan produk pasangan pengemisi gamma kuat, ^{212}Bi dan ^{208}Tl dengan umur paruh sangat pendek. Akibatnya, terdapat penumpukan dosis radiasi yang signifikan terkait penyimpanan bahan bakar bekas berbasis Th atau ^{233}U yang telah dipisahkan, karena itu memerlukan *hot cells* dan meningkatkan biaya daur bahan bakar. Pada rantai konversi ^{232}Th - ^{233}U , Pa-233 terbentuk sebagai sebuah produk antara (*intermediate*), yang mempunyai umur paruh relative lebih panjang (~ 27 hari) dibanding Np-239 (2.35 hari) dalam daur bahan bakar uranium sehingga membutuhkan waktu pendinginan yang lebih

lama yaitu paling sedikit 1 tahun untuk menyempurnakan peluruhan Pa-233 menjadi U-233. Secara normal, Pa dilewatkan limbah produk fisi dalam proses THOREX, yang mempunyai dampak radiologi jangka panjang. Inilah yang mendasari pemisahan Pa dari larutan bahan bakar bekas sebelum proses ekstraksi pelarut untuk pemisahan ²³³U dan thorium. Tiga aliran proses pemisahan uranium, plutonium dan thorium dari bahan bakar bekas (Th, Pu)O₂ belum dikembangkan. Database dan pengalaman bahan bakar thorium dan daur bahan bakar thorium sangat terbatas dibanding UO₂ dan bahan bakar (U, Pu) sehingga diperlukan investasi besar sebelum bahan bakar thorium dan daur bahan bakar digunakan secara komersial. Meskipun, thorium siap digunakan, sejumlah tantangan teknis perlu diatasi sebelum teknologi baru ini dapat mencapai potensi penuhnya. Bahan bakar bekas dari reaktor daya nuklir basis thorium kehilangan radioaktivitasnya lebih cepat dari bahan bakar bekas basis uranium. Namun, dalam jangka pendek bahan bakar bekas thorium mengemisikan radiasi yang lebih kuat dan meningkatkan biaya penanganannya.

7. KESIMPULAN

Ditinjau dari aspek sifat fisika, kimia, dan sifat neutronik maupun jumlah cadangannya thorium potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar nuklir alternative. Ditinjau dari aspek sifat neutronik, thorium-232 merupakan bahan fertil yang lebih unggul dibanding U-238, karena tampang lintang serap netron Th-232 dalam spektrum termal 3 kali tinggi dibanding U-238 dimana untuk Th-232 (7.4 barns) dan U-238 (2.7 barns). Sehingga, konversi Th-232- ²³³U lebih efisien dibanding U-238 – Pu-239. ThO₂ mempunyai konduktivitas panas lebih tinggi dan koefisien ekspansi panas yang lebih rendah dibanding UO₂, 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. Titik leleh ThO₂ (3378°C) lebih tinggi sekitar 500°C dibanding uranium dioksida (2865°C). Jumlah cadangannya 3-4 kali lebih besar dibanding Uranium. Mineral dengan kandungan thorium terbesar adalah mineral thorium fosfat-tanah jarang-monazit (Ce-La-Y) yang mengandung sekitar 12% thorium oksida, namun rata-rata mengandung thorium oksida sekitar 6-7% dan merupakan sumber thorium yang akhir-akhir ini paling banyak diproduksi secara komersial^[3]. Monazit mempunyai kandungan thorium yang berbeda-beda tergantung pada lokasi mineral. Meskipun, thorium siap digunakan, sejumlah tantangan teknis perlu diatasi sebelum teknologi baru ini dapat siap digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. _____, "Nuclear Power Plant", www.en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power, diakses tanggal 28 Januari 2012.
- [2]. _____, "Uranium: supply and demand", www.aph.gov.au/.../House_of_Representatives_Committees?.../urani..., diakses tanggal 5 Juli 2012.
- [3]. _____, " Nuclear Power in The World Today", www.world-nuclear.org/info/inf01.html, diakses tanggal 17 Desember 2012
- [4]. ABDULHAFED A MOHAMED ELKHADRAWI, "Thorium Based Nuclear Reactors", Department of Physics, University of Surrey, September 2008
- [5]. _____, "Thorium", <http://en.wikipedia.org/wiki/Thorium>, diakses tanggal 25 Oktober 2012
- [6]. _____, "Uranium-233", <http://en.wikipedia.org/wiki/Uranium-233>, diakses tanggal 3 November 2012.

- [7]. _____, "Thorium as an energy source", www.regjeringen.no/upload/OED/Rapporter/ThoriumReport2008.pdf
- [8]. _____, "Thorium Fission and Fission-Fusion Fuel Cycl", www.intechopen.com/.../thorium-fission-and-..., diakses tanggal 26 Oktober 2012
- [9]. _____, "Could Thorium and the God of Thunder Save Your Portfolio?", www.beta.fool.com/erinannie/2012/07/09/could-thorium...of.../6522/, diakses tanggal 3 November 2012
- [10]. _____, " Why nuclear power is not a sustainable source of low carbon energy", <http://thorium1.com/thorium101/natural-occurrences.html>, diakses tanggal 22 Desember 2012.
- [11]. _____, " thorium", <http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html>, diakses tanggal 14 November 2012
- [12]. GRENECHE D, SZYMCAK W J, BUCHHEIT J M, DELPECH M, VASILE A, H GOLFIER (CEA), " rethinking the thorium fuel cycle: an industrial point of view", AREVA NC, France, 2009
- [13]. _____, "Thorium fuel cycle in India : Production of nuclear grade thorium oxide from monazite", <http://www.after-oil.co.uk/nuclear.htm>, diakses tanggal 20 Desember 2012.
- [14]. _____, "Why nuclear power is not a sustainable source of low carbon energy", <http://www.after-oil.co.uk/nuclear.htm>, diakses tanggal 23 November 2012.
- [15]. IAEA, "Thorium Fuel Cycle-Potensial benefits and challenges", IAEA, TECDOC-1450, May 2005.