

TEKNOLOGI DUPIC SEBAGAI ALTERNATIF PENUTUPAN DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR

Erlan Dewita, Djati H Salimy

Pusat Pengembangan Energi Nuklir (PPEN) BATAN
Jl. Kuningan Barat, Mampang Prapatan Jakarta 12710
Telp/Fax: (021)5204243 Email: erlan_dewita@yahoo.com

ABSTRAK

TEKNOLOGI DUPIC SEBAGAI ALTERNATIF PENUTUPAN DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR. Telah dilakukan studi teknologi DUPIC sebagai alternatif untuk penutupan daur bahan bakar nuklir. Tujuan dari studi adalah untuk mempelajari teknologi DUPIC dan kemungkinannya sebagai alternatif untuk penutupan daur bahan bakar nuklir. Teknologi DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel In CANDU) merupakan teknologi pemanfaatan bahan bakar bekas reaktor PWR untuk diolah ulang dan difabrikasi menjadi bahan bakar DUPIC sebagai bahan bakar reaktor Candu. Pemanfaatan secara sinergi ini didasarkan pada kenyataan bahwa dalam bahan bakar bekas reaktor PWR masih terdapat bahan fisil U-235 dan plutonium fisil dengan kadar 2 kali lebih tinggi daripada kadar bahan fisil yang terdapat pada bahan bakar reaktor Candu. Hasil studi menunjukkan bahwa teknologi DUPIC merupakan teknologi alternatif yang menjanjikan untuk penutupan daur bahan bakar nuklir, jika operasi PLTN didukung oleh reaktor-reaktor jenis PWR dan Candu. Teknologi fabrikasi bahan bakar DUPIC yang proses utamanya adalah proses kering OREOX lebih menguntungkan dibanding proses olah ulang konvensional PUREX. Pada proses kering OREOX, tidak mungkin dilakukan pemisahan plutonium fisil, sehingga lebih aman jika ditinjau dari sisi non proliferasi nuklir. Sedang jika dibandingkan daur sekali pakai, pemanfaatan daur DUPIC menguntungkan ditinjau dari penghematan penggunaan uranium alam sebesar 20%, dan pengurangan laju akumulasi bahan bakar bekas sampai 65%. Analisis ekonomi menunjukkan bahwa biaya daur DUPIC lebih murah 0,073 mill\$/kwh dibanding daur sekali pakai.

Kata Kunci: daur bahan bakar nuklir, bahan bakar bekas, teknologi DUPIC, bahan fisil.

ABSTRACT

DUPIC TECHNOLOGY AS AN ALTERNATIVE FOR CLOSING NUCLEAR FUEL CYCLE. The study of DUPIC technology as an alternative for closing nuclear fuel cycle has been carried out. The goal of this study is to understand the DUPIC technology and its possibility as an alternative technology for closing nuclear fuel cycle. DUPIC (Direct Use of PWR spent fuel In CANDU) is a utilization of PWR spent fuel to reprocess and fabricate become DUPIC fuel as nuclear fuel of Candu reactor. The synergical utilization is based on the fact that fissile materials contained in the PWR spent fuel is about twice as much as that in Candu fuel. Result of the study indicates that DUPIC is an alternative promising technology for closing nuclear fuel cycle. The DUPIC fuel fabrication technology of which the major process is the OREOX dry processing, is better than the conventional reprocessing technology of PUREX. The OREOX dry processing has no capability to separate fissile plutonium, thus give the impact of high nuclear proliferation resistance. When compared to once through cycle, it gives advantages of uranium saving of about 20% and spent fuel accumulation reduction of about 65%. Economic analysis indicates that the levelized cost of DUPIC cycle is cheaper by 0.073 mill\$/kwh than that of once through cycle.

Keywords: nuclear fuel cycle, spent fuel, DUPIC technology, fissile material.

1. PENDAHULUAN

Secara umum, dapat dikatakan bahwa bahan bakar nuklir bekas masih sangat bernilai karena mengandung sejumlah besar uranium dapat belah (U-235) dengan kandungan yang lebih tinggi dari yang terdapat dalam uranium alam, serta bahan fisil plutonium sebagai hasil reaksi penyerapan neutron oleh isotop U-238. Jika dibandingkan dengan uranium alam yang mengandung hanya 0,7% bahan fisil U-235, maka kandungan bahan fisil yang ada pada bahan bakar bekas reaktor jenis PWR diperkirakan sekitar 2 kali lebih banyak yaitu 1,5% (0,9% U-235 dan 0,6% Pu-239). Karena hal itu, dengan proses olah ulang, bahan bakar bekas masih dapat dimanfaatkan kembali untuk berbagai reaktor termal konvensional (LWR, HWR), reaktor maju berbahan bakar MOX, ataupun reaktor cepat berbahan bakar plutonium.

Sistem daur bahan bakar nuklir dapat dibagi menjadi 3 model, yaitu: daur bahan bakar sekali pakai (*once through cycle*), daur bahan bakar dengan olah ulang, dan daur terbuka (*open cycle*). Pada daur bahan bakar sekali pakai, bahan bakar nuklir bekas setelah keluar dari reaktor tidak dilakukan proses olah ulang, tetapi langsung disimpan baik pada penyimpanan sementara atau penyimpanan lestari. Model kedua, adalah daur bahan bakar dengan olah ulang yang sering juga disebut sebagai daur tertutup (*closed cycle*). Bahan bakar bekas dari reaktor dilakukan proses olah ulang untuk dipungut uranium sisanya (*recovered uranium*) yang kadar U-235 nya masih sekitar 0,9% dan bahan fisil plutonium. Uranium sisa dikirim ke pabrik pengayaan uranium, kemudian difabrikasi untuk bahan bakar UO₂ yang digunakan pada reaktor-reaktor termal konvensional. Bisa juga uranium sisa bersama-sama dengan plutonium dibuat menjadi bahan bakar MOX untuk reaktor daya maju, maupun untuk reaktor cepat. Sedang daur terbuka merupakan daur yang bersifat *wait and see*. Sistem ini dipakai oleh negara yang usia penggunaan PLTN nya masih belum begitu lama, sehingga belum memutuskan apakah akan menggunakan daur sekali pakai atau daur tertutup.

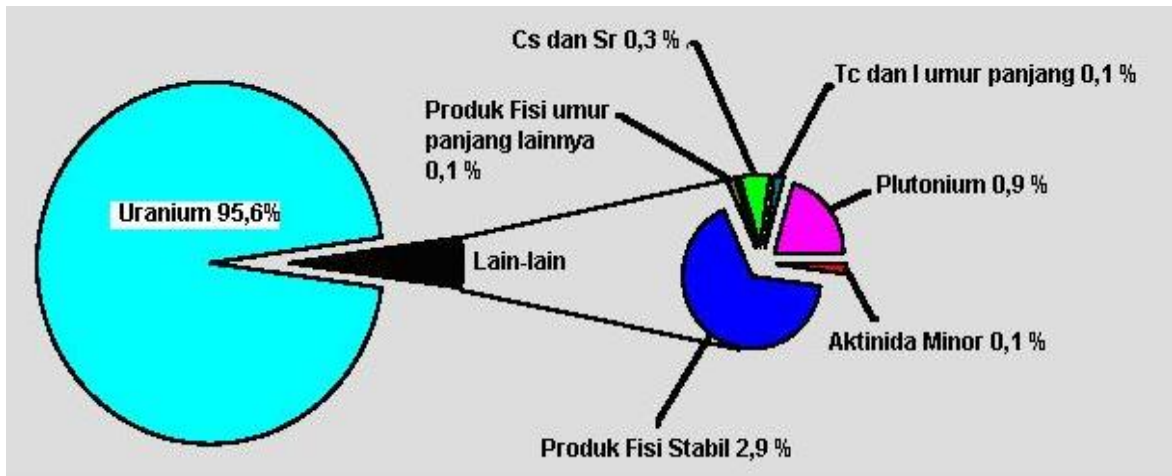
Ditinjau dari sisi ketersediaan bahan bakar nuklir, daur tertutup merupakan daur yang relatif paling baik, karena hasil olah ulang dapat menghemat cadangan uranium. Namun begitu, hanya sejumlah kecil negara yang telah memutuskan menggunakan sistem ini, antara lain: Jepang, Perancis, dan Inggris. Salah satu faktor penyebabnya adalah karena teknologi olah ulang komersial yang ada saat ini merupakan warisan teknologi persenjataan nuklir, sehingga pemanfaatan daur tertutup dikhawatirkan akan sangat rentan terhadap penyebaran senjata nuklir. Karena alasan tersebut, kebanyakan negara saat ini masih memilih sikap *wait and see* dalam sistem daur bahan bakarnya. Hal ini dimaksudkan menunggu perkembangan teknologi olah ulang yang lebih aman terhadap penyalahgunaan. Berbagai teknologi olah ulang terus dikembangkan di berbagai negara maju seperti teknologi ATW (Accelerator driven Transmutation Waste), maupun teknologi DUPIC yang diharapkan dapat menjadi teknologi penanganan bahan bakar bekas yang lebih aman.

DUPIC (*Direct Use of PWR spent fuel In Candu*) merupakan salah satu teknologi daur tertutup yang dikembangkan karena pertimbangan ekonomi dan kekhawatiran dunia terhadap penggunaan plutonium untuk persenjataan nuklir. Dalam sistem daur DUPIC, hasil olah ulang bahan bakar bekas reaktor PWR dapat langsung dimanfaatkan untuk dipakai sebagai bahan bakar pada reaktor Candu. Pemanfaatan secara langsung tersebut diharapkan kemungkinan penyalahgunaan bahan fisil plutonium dapat dicegah.

2. BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS

Secara umum, sejak bahan bakar nuklir diumpankan ke dalam reaktor untuk dimanfaatkan energinya, sampai dikeluarkan dari reaktor membutuhkan waktu antara 12 sampai 18 bulan. Ini berlaku baik pada reaktor berpendingin air ringan (LWR) maupun

reaktor berpendingin air berat (HWR). Menurunnya efektivitas bahan bakar dalam menghasilkan energi disebabkan oleh terbentuknya produk fisi dalam bahan bakar selama reaktor beroperasi. Proses fisi dari isotop uranium dan plutonium dalam bahan bakar uranium dioksida (UO₂) yang terjadi dalam reaktor, akan menghasilkan sekitar seratus jenis produk fisi utama yang beberapa di antaranya tidak stabil dan isotop lain melalui reaksi peluruhannya. Produk fisi yang paling banyak adalah gas Xe dan Kr, sebagian besar produk fisi gas ini tertahan dalam pori-pori material bahan bakar. Namun fraksi tertentu dari produk fisi gas ini akan lepas menuju ruang kosong yang ada pada batang bahan bakar dan menyebabkan peningkatan tekanan bagian dalam (*internal pressure*) yang dapat mempengaruhi integritas kelongsong bahan bakar. Pelepasan gas hasil fisi merupakan salah satu fenomena yang membatasi umur pemakaian bahan bakar nuklir di reaktor^[1]. Bahan bakar yang telah dikeluarkan dari reaktor setelah umur bahan bakar berakhir disebut sebagai bahan bakar bekas. Pada umumnya kandungan awal bahan fisil dalam bahan bakar UO₂ untuk reaktor jenis LWR adalah 3,5% U-235, tergantung pada pengayaan bahan bakar. Selama iradiasi, sebagian besar U-235 mengalami proses fisi atau pembelahan dan sebagian kecil U-238 ditransmutasi menjadi unsur-unsur transuranium, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Bahan bakar nuklir bekas mengandung 95,6% uranium (sebagian besar U-238), sekitar 0,9% plutonium, 0,1% aktinida minor, 0,1% Tc dan I umur panjang, 0,3% Cs dan Sr, 0,1% produk fisi umur panjang lainnya serta 2,9% produk fisi stabil.



Gambar 1. Konstituen dari Bahan Bakar Nuklir Bekas^[2]

Kadar trans-uranium dan aktinida minor dalam bahan bakar bekas relatif sangat rendah, namun bahan-bahan ini merupakan bahan berbahaya yang masuk katagori limbah nuklir aktivitas tinggi. Bahan-bahan ini mempunyai radiotoksistas sangat tinggi, dengan umur paruh sangat panjang.

Namun begitu, karena kadar uranium sisa masih sangat banyak dengan tingkat pengayaan yang lebih tinggi dibanding uranium alam, dan juga kebutuhan akan bahan fisil plutonium sebagai bahan bakar nuklir reaktor maju, mendorong sejumlah pakar untuk memanfaatkan bahan bakar bekas. Teknologi olah ulang dapat mengambil bahan uranium dan plutonium untuk dimanfaatkan kembali, sehingga akan menghemat kebutuhan uranium alam dalam jumlah yang cukup signifikan. Tergantung pada derajat bakar, pada umumnya bahan bakar bekas PWR masih mengandung bahan fisil 1,5% (0,9% U-235 dan

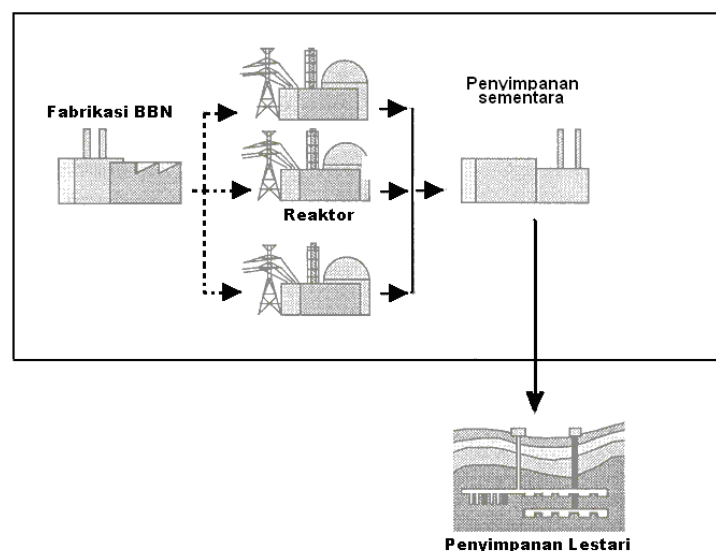
0,6% Pu-239). Sedangkan kandungan bahan fisil (U-235) awal dalam bahan bakar reaktor Candu (HWR) adalah 0,71% menghasilkan bahan bakar bekas Candu dengan kadar bahan fisil adalah 0,5% (0,23% U-235 dan 0,27 % Pu-239)^[3].

3. DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR KONVENSIONAL

Daur bahan bakar nuklir termasuk semua aktivitas yang meliputi beberapa tahap, yaitu mulai dari penambangan sampai proses iradiasi bahan bakar dalam reaktor nuklir, serta memproses bahan bakar bekas dan pengelolaan limbah produk fisi yang dihasilkan selama proses iradiasi dalam reaktor. Beberapa aktivitas yang termasuk dalam daur bahan bakar dibagi menjadi 3 katagori. Katagori pertama meliputi semua aktivitas yang berlangsung sebelum iradiasi bahan bakar, yaitu *mining, milling*, konversi menjadi Uranium Hexafluoride (UF₆), pengayaan isotop U-235 dan fabrikasi serta perakitan bahan bakar. Aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar ujung depan. Katagori kedua, meliputi semua aktivitas mengenai disain daur bahan bakar dan iradiasi rakitan bahan bakar dalam reaktor termasuk evaluasi reaktivitas dan persyaratan kontrol, pemrograman rakitan bahan bakar dalam reaktor, analisis distribusi daya dan evaluasi kemampuan teras. Aktivitas-aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar bagian tengah. Katagori ketiga dari daur bahan bakar meliputi penanganan bahan bakar bekas yang sangat radioaktif. Aktivitas ini meliputi penyimpanan sementara bahan bakar bekas, pemrosesan bahan bakar bekas untuk memungut produk fisi dan memisahkan unsur-unsur transuranium serta penyimpanan lestari. Aktivitas-aktivitas ini disebut sebagai daur bahan bakar ujung belakang.

3.1. Daur Bahan Bakar Sekali Pakai (*Once Through Cycle*)

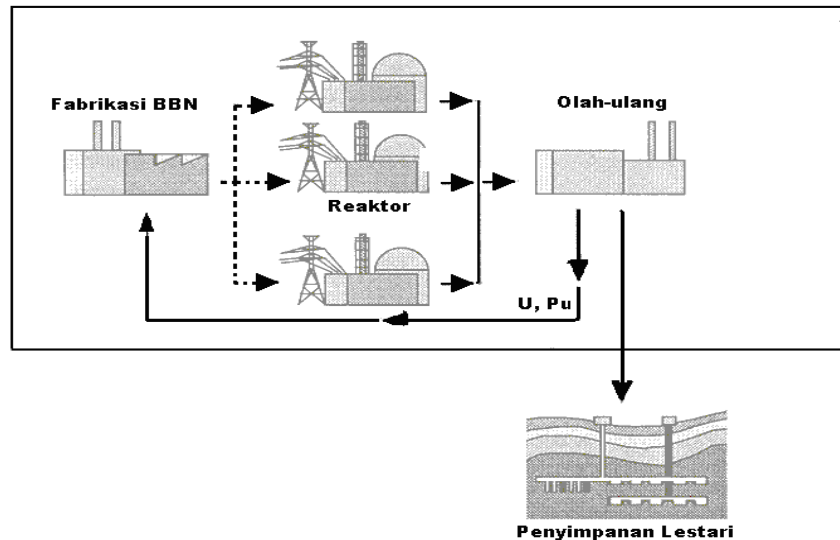
Model daur bahan bakar sekali pakai merupakan model daur yang paling umum dan sederhana. Pada model ini tidak dilakukan proses olah ulang karena tidak ada konstituen dari bahan bakar bekas yang didaur ulang untuk digunakan kembali menjadi bahan bakar. Bahan bakar baru masuk reaktor, sekali bahan bakar digunakan dan setelah mencapai umur pemakaiannya, kemudian dipindahkan secara permanen untuk penyimpanan sementara atau penyimpanan lestari. Skema daur bahan bakar sekali pakai ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Daur Bahan Bakar Sekali Pakai^[3]

3.2. Daur Bahan Bakar Dengan Olah-ulang

Manajemen bahan bakar bekas alternatif, selain menyimpan adalah dengan cara melakukan proses olah ulang terhadap bahan bakar bekas untuk mengambil uranium yang tidak terbakar dan bahan fisil plutonium yang terbentuk selama iradiasi dalam reaktor untuk difabrikasi ulang menjadi bahan bakar oksida atau bahan bakar campuran (MOX). Jenis reaktor yang umum menggunakan bahan bakar MOX adalah LWR (*Light Water Reactor*), dan Reaktor Pembiak Cepat (*Fast Breeder Reactor*). Skema daur bahan bakar tertutup ini ditunjukkan pada Gambar 3.

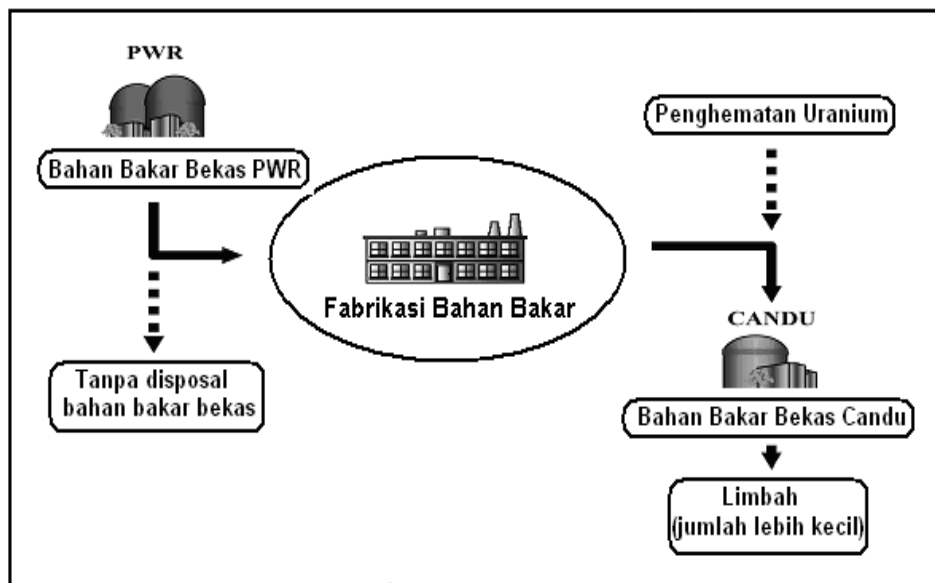


Gambar 3. Daur bahan bakar dengan olah ulang^[3]

Selain 2 jenis daur bahan bakar nuklir tersebut, masih ada daur bahan bakar lain yaitu daur terbuka (*open cycle*). Pengertian daur terbuka adalah *wait and see*, karena belum memutuskan sistem daur yang paling cocok bagi negaranya, menunggu dan atau mengembangkan teknologi olah ulang yang lebih aman terhadap proliferasi nuklir. Hal ini mengingat teknologi olah ulang bahan bakar bekas yang ada saat ini merupakan teknologi yang pada awalnya dikembangkan untuk memungut plutonium sebagai hulu ledak nuklir. Di samping teknologi ini terbatas hanya dimiliki sejumlah kecil negara, juga sangat rentan terhadap penyelewengan untuk persenjataan nuklir.

4. DAUR BAHAN BAKAR DUPIC

DUPIC adalah teknologi yang memungkinkan pemanfaatan langsung bahan bakar bekas reaktor daya PWR melalui proses olah ulang dan fabrikasi ulang menjadi bahan bakar DUPIC dan dipakai sebagai bahan bakar reaktor Candu. Teknologi ini telah dikembangkan di Kanada, Korea Selatan dan Amerika sejak tahun 1991. Karena kadar bahan fisil pada bahan bakar bekas reaktor PWR masih sekitar 2 kali kadar bahan fisil pada bahan bakar reaktor Candu, maka *burn-up* bahan bakar DUPIC juga dapat mencapai 2 kali lebih besar *burn-up* bahan bakar reaktor Candu^[4]. Pada Gambar 4 disajikan skema diagram daur bahan bakar berbasis teknologi DUPIC. Pada daur bahan bakar DUPIC tersebut tidak dilakukan penyimpanan sementara atau lestari bahan bakar bekas reaktor PWR, dan diperoleh penghematan cadangan uranium alam. Akumulasi bahan bakar bekas dari sistem daur dapat dikurangi sehingga hanya tinggal separohnya.

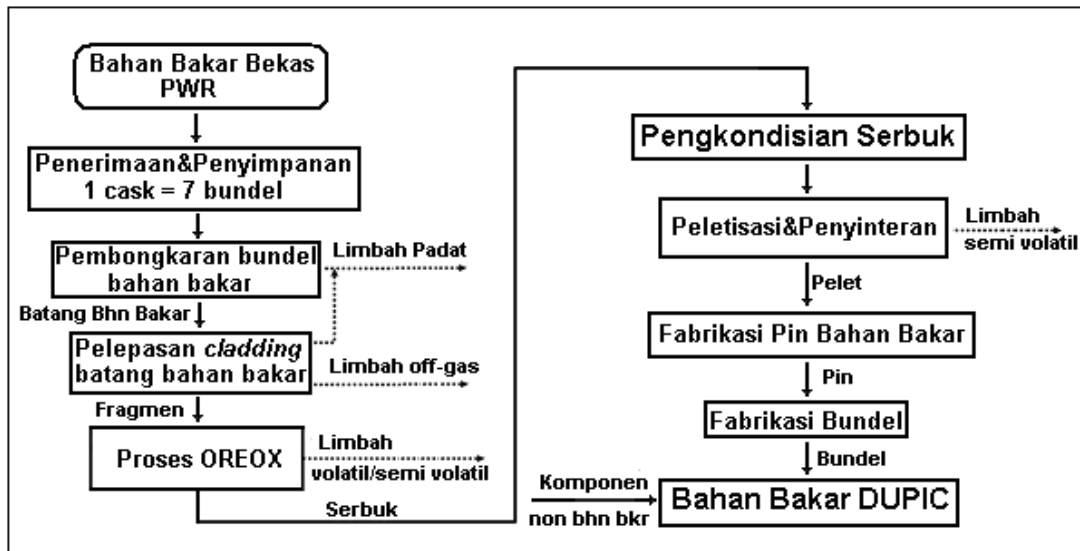


Gambar 4. Sistem Daur Bahan Bakar DUPIC^[4]

Reaktor CANDU merupakan jenis reaktor yang memiliki konsep ekonomi neutron yang tinggi sehingga dapat beroperasi dengan bahan bakar oksida dari uranium alam dengan kandungan bahan fisil U-235 0,7%, serta menggunakan moderator dan pendingin air berat (D₂O). Kebutuhan bahan fisil dengan kadar U-235 yang rendah ini mendasari kemungkinan pemanfaatan secara sinergi antara reaktor PWR dan CANDU, sebab kandungan bahan fisil yang terdapat dalam bahan bakar bekas PWR relatif masih tinggi (1,5%), sehingga dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar reaktor CANDU tanpa melalui proses pengayaan^[4,5]. Berbasis pada sinergi tersebut, dikembangkan daur bahan bakar DUPIC di mana pada daur ini, bahan bakar bekas PWR digunakan secara langsung hanya melalui proses pemisahan cara kering untuk memindahkan bahan fisil maupun produk fisi yang dikenal proses OREOX (oxidation and Reduction of Oxide Fuel) dan merupakan proses inti dalam proses fabrikasi bahan bakar CANDU. Berdasarkan hal itu, daur bahan bakar DUPIC tersebut dapat dijadikan sebuah alternatif terhadap opsi pengelolaan bahan bakar bekas konvensional yaitu penyimpanan langsung atau mendaur ulang plutonium menggunakan proses olah ulang cara basah (*wet reprocessing*).

Diagram alir proses fabrikasi bahan bakar DUPIC ditunjukkan pada Gambar 5. Proses fabrikasi dimulai dengan tahap penerimaan dan penyimpanan, selanjutnya dilakukan proses pembongkaran dan pelepasan kelongsong, setelah itu dilakukan proses pemisahan cara kering (*dry processing*) yang disebut sebagai proses OREOX. Proses ini merupakan inti dari proses bahan bakar DUPIC yaitu dengan proses oksidasi (temperatur ± 500°C) dan reduksi kering (temperatur ± 700°C) dengan tujuan selain untuk mengkonversi pelet bahan bakar bekas menjadi serbuk, juga untuk menguapkan produk fisi yang bersifat volatil (mudah menguap). Pada kondisi reduksi, UO₂ mempunyai bentuk stabil, sedang pada kondisi oksidasi fase stabilnya dalam bentuk U₃O₈. Dalam mentransformasi UO₂ menjadi U₃O₈, matriks mengalami perubahan masa (dari *cubic* menjadi *orthorombic*) disertai dengan perubahan densitas, dan akhirnya terjadi perubahan volume (± 32%). Perubahan volume ini menyebabkan matriks mengembang dan terjadi retak (*microcracks*). Selanjutnya proses oksidasi-reduksi yang berlangsung secara terus menerus menyebabkan pecahnya pelet menjadi serbuk. Hasil proses oksidasi – reduksi kering yang berupa serbuk kemudian

dilakukan penyinteran dan dipress untuk dibuat pelet bahan bakar dan dirakit ulang untuk dijadikan bahan bakar CANDU. Daur bahan bakar DUPIC ini mempunyai beberapa kelebihan, diantaranya : lebih sederhana dibanding dengan teknik proses olah ulang dengan cara basah, lebih murah dan tidak mudah diselewengkan untuk persenjataan nuklir sebab produk-produk fisi yang sangat radioaktif maupun bahan fisil tidak dipisahkan. Selanjutnya karena beban panas dari bahan bakar DUPIC bekas ini sama dengan bahan bakar bekas PWR awal, sehingga kebutuhan penyimpanan akhir (*disposal*) tidak meningkat.



Gambar 5. Diagram Alir Proses DUPIC^[4]

5. PEMBAHASAN

Pada sistem daur bahan bakar nuklir konvensional, proses olah ulang merupakan alternatif yang menguntungkan ditinjau dari sisi penghematan cadangan uranium alam, dengan cara memanfaatkan bahan fisil yang masih ada dalam bahan bakar bekas. Namun sejauh ini teknologi yang tersedia merupakan teknologi warisan era pengembangan senjata nuklir. Prosesnya merupakan jenis proses basah (*wet processing*) yang disebut dengan proses PUREX (*plutonium uranium extraction*). Karena pada awalnya Purex dikembangkan untuk persenjataan nuklir, namun teknologi memungkinkan dipungutnya plutonium fisil *weapon grade* yang mudah diselewengkan penggunaannya. Mengacu pada *Nuclear Proliferation Treaty*, hanya negara-negara tertentu saja yang boleh mengoperasikan dan membangun fasilitas olah ulang berbasis proses PUREX. Hal ini menjadi salah satu alasan mengapa hanya sejumlah kecil negara yang memutuskan untuk menggunakan sistem daur bahan bakar dengan olah ulang. Kebanyakan negara yang memanfaatkan PLTN, lebih memilih sikap *wait and see*, sambil mengembangkan teknologi olah ulang bahan bakar bekas yang lebih aman terhadap penyelewengan proliferasi nuklir. Konsep teknologi ADS (*Accelerator Driven System*) yang merupakan salah satu konsep untuk mentransmutasi unsur-unsur transurium dan aktinida umur paruh panjang yang terdapat dalam limbah nuklir menjadi nuklida berumur paruh pendek serta DUPIC merupakan teknologi alternatif yang bisa menjadi kandidat penting dalam penanganan bahan bakar bekas.

Pada teknologi DUPIC, proses olah ulang yang dilakukan adalah cara kering (*dry processing*) seperti *pyroprocessing* dan proses mekanik-termal yang dilakukan untuk fabrikasi bahan bakar DUPIC. Ditinjau dari segi teknologi, proses fabrikasi bahan bakar DUPIC lebih

sederhana dibandingkan dengan fabrikasi bahan bakar MOX dari bahan bakar bekas PWR yang proses olah ulangnya berbasis proses PUREX. Pada pemrosesan bahan bakar DUPIC hanya dilakukan proses pemisahan cara kering dengan cara mekanik – termal melalui proses oksidasi – reduksi pada temperatur tinggi dengan tujuan selain membuat pelet bahan bakar bekas menjadi serbuk juga untuk menguapkan produk fisi yang bersifat volatil. Pada umumnya kandungan produk fisi pada bahan bakar bekas setelah proses fabrikasi bahan bakar DUPIC lebih kecil dibanding sebelum dilakukan proses fabrikasi bahan bakar DUPIC. Berbeda dengan proses PUREX, pada proses OREOX yang menjadi inti proses fabrikasi bahan bakar DUPIC tidak memungkinkan dipungutnya plutonium fisil, karena proses OREOX tidak melibatkan proses pemisahan isotop. Meskipun sistem daur DUPIC masih dalam tahap litbang, sejumlah analisis ekonomi telah dilakukan untuk memperkirakan besarnya biaya daur bahan bakar DUPIC dibandingkan daur sekali pakai. Studi yang dilakukan oleh *Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency* (OECD/NEA) pada tahun 1993 menunjukkan bahwa biaya daur DUPIC sedikit lebih murah dibanding biaya daur sekali pakai. Analisis ekonomi tersebut berdasarkan studi bahwa daur DUPIC akan efisien jika 2 unit reaktor PWR masing-masing berdaya 950 MWe disinergikan dengan 1 unit reaktor Candu dengan daya 713 MWe. Perbandingan biaya daur DUPIC dan daur sekali pakai dapat dilihat pada Tabel 1. Total biaya daur DUPIC sebesar 6,346 mill\$/kwh, lebih rendah sekitar 0,073 mill\$/kwh dibanding biaya daur sekali pakai yaitu 6,419 mill\$/kwh^[4,6]. Perhitungan ini dilakukan dengan pendekatan bahwa masing-masing sistem daur memproduksi listrik dengan total kapasitas sama. Dari sisi neraca masa, daur DUPIC akan menghemat total kebutuhan uranium alam (hanya untuk bahan bakar PWR) sampai sekitar 20%, dan mengurangi akumulasi bahan bakar bekas sampai 65%.

Tabel 1. Perbandingan Biaya *Levelized* Daur Sekali Pakai dan DUPIC (mill\$/ kWh)^[4,6]

Komponen	Daur Sekali Pakai		Daur DUPIC
	PWR	CANDU	
PWR			
Uranium (U ₃ O ₈)	1,289		1,289
Konversi	0,229		0,229
Pengayaan	2,084		2,084
Fabrikasi	1,057		1,057
Transportasi	-		0,099
Transportasi dan penyimpanan	0,453		-
Disposal	0,367		-
Candu			
Penanganan bahan bakar DUPIC		-	0,019
Uranium (U ₃ O ₈)		0,212	-
Konversi		0,078	-
Fabrikasi		0,301	1,197
Transportasi		-	0,076
Transportasi dan penyimpanan		0,199	0,156
Disposal		0,150	0,140
TOTAL	6,419		6,346

Studi daur DUPIC juga dilakukan sangat intensif di Korea Selatan. Pada tahun 2005, Korea Selatan mengoperasikan 16 unit reaktor PWR dan 4 unit reaktor CANDU, dengan total daya 15 Gwe, dan diharapkan terus berkembang dengan proyeksi total daya mencapai

25 Gwe pada tahun 2015. Hasil studi di Korea Selatan menunjukkan bahwa jika pada tahun 2015, 4 unit reaktor CANDU sepenuhnya memanfaatkan bahan bakar DUPIC dari bahan bakar bekas reaktor PWR, maka diperkirakan akan diperoleh penghematan penggunaan uranium alam seharga 20 juta dolar. Untuk kondisi keseimbangan daur DUPIC, bahan bakar bekas dari 8 unit reaktor PWR cukup untuk memasok kebutuhan bahan bakar DUPIC 4 unit reaktor CANDU. Jika pemanfaatan bahan bakar DUPIC secara penuh dilakukan pada tahun 2015, maka umur reaktor CANDU masih 20 tahun lagi. Total produksi listrik dari 12 reaktor (8 unit PWR dan 4 unit CANDU) yang dioperasikan secara sinergi dengan daur DUPIC adalah sebesar $1,2 \times 10^{12}$ kwh. Pemanfaatan daur DUPIC dapat menghemat biaya daur sebesar 0,073 mill\$/kwh, maka penghematan total yang dapat diperoleh selama 20 tahun diperkirakan mencapai 86 juta dollar^[7,8].

Berbagai keuntungan yang dapat diperoleh dari penggunaan daur bahan bakar DUPIC seperti yang telah dijabarkan sebelumnya, fabrikasi bahan bakar DUPIC juga menghadapi sejumlah tantangan meliputi pengembangan teknologi peletisasi untuk memproduksi pelet dengan densitas tinggi, pengembangan peralatan fabrikasi menggunakan *remote* yang akan digunakan dalam *hot cell* karena beroperasi dengan material radioaktivitas tinggi selama proses.

5. KESIMPULAN

Dari studi yang dilakukan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

- a. Teknologi bahan bakar DUPIC dapat menjanjikan penutupan sistem daur bahan bakar nuklir yang lebih aman terhadap proliferasi nuklir.
- b. Dibanding daur sekali pakai berbasis reaktor PWR dan CANDU, daur DUPIC menguntungkan karena dapat menghemat penggunaan uranium alam sampai 20%, dan mengurangi laju akumulasi bahan bakar bekas sampai 65%.
- c. Evaluasi ekonomi biaya daur bahan bakar mengindikasikan bahwa daur DUPIC akan lebih murah sekitar 0,073 mill/kwh dibanding daur sekali pakai. Operasi 12 unit reaktor PWR dan CANDU dengan rasio 2:1, dengan total produksi listrik sebesar $1,2 \times 10^{12}$ kwh, akan menghemat biaya daur mencapai 86 juta dolar selama 20 tahun.

PUSTAKA

- [1]. JERNKVIST, L. O., *et.al*, Evaluation of fission product gas release and the impact of fuel microstructure at high burnup, Storefjell, Gol, Norway , September 8-13, 2002.
- [2]. RYSKAMP, J. M., Nuclear Fuel Cycle Closure, IEEPower Engineering Society Meeting, April 28, 2003.
- [3]. GRAVES, H. W. Jr., Nuclear Fuel Management, Jhon Wiley & Sons, New York, 1979.
- [4]. YANG, M. S., *et. al.*, "The Status and Prospect of DUPIC Fuel Technology" , Nuclear Engineering and Technology, Vol. 8, No. 4, June 2006
- [5]. CANDU reactor . [Http://en.wikipedia.org/wiki/CANDU](http://en.wikipedia.org/wiki/CANDU), CANDU reactor, 2006.
- [6]. OECD/NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*, Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, 1993.
- [7]. KO, W. I., CHOI, H., YANG, M. S., Economic Analysis on Direct Use of Spent Pressurized Water Reactor Fuel in CANDU Reactors - IV: DUPIC Fuel Cycle Cost, *Nuclear Technology*, **134**, 167, 2001.
- [8]. KO, W. I., KIM, H. D., Analysis of Nuclear Proliferation Resistance of DUPIC Fuel Cycle, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 38, No. 9, Sept. 2001.