

STRATEGI DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR UNTUK MENDUKUNG PENGOPERASIAN PLTN YANG BERKELANJUTAN

Bambang Herutomo
Pusat Reaktor Serba Guna, Badan Tenaga Nuklir Nasional
e-mail : herutomo@batan.go.id

ABSTRAK

STRATEGI DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR UNTUK MENDUKUNG PENGOPERASIAN PLTN YANG BERKELANJUTAN. Berbagai opsi daur bahan bakar yang kompatibel dengan PLTN tipe PWR telah dipelajari untuk mendapatkan sistem daur bahan bakar yang paling layak untuk pengembangan PLTN yang berkelanjutan di Indonesia. Ukuran yang digunakan untuk menilai adalah penggunaan sumber daya uranium alam, limbah radioaktif yang dihasilkan, ketahanan terhadap proliferasi, dan biaya daur bahan bakar. Apabila ketersediaan uranium alam bukan merupakan hambatan untuk mencapai keberlanjutan, sistem daur bahan bakar sekali buang dapat dikatakan paling layak diimplementasikan saat ini. Apabila ketersediaan uranium menjadi pertimbangan dan pemanfaatan uranium dalam jumlah signifikan diperlukan (dan masalah dalam manajemen bahan bakar bekas), implementasi bahan bakar MOX hasil olah ulang plutonium *mono-recycle* bahan bakar bekas UOX harus diperkenalkan. Teknologi *proven* untuk memungut plutonium dalam bahan bakar bekas UOX tersedia di pasar komersial sekarang dan mungkin jauh lebih murah di masa depan. Olah ulang plutonium *mono-recycle* dalam bahan bakar MOX cukup menarik dalam menghemat penggunaan sumber daya alam uranium. Dan juga produksi limbah per unit energi yang dihasilkan lebih rendah dari produksi limbah dari daur siklus bahan bakar UOX sekali buang. Tapi siklus bahan bakar ini menimbulkan lebih besar risiko proliferasi karena adanya persediaan plutonium terpisah. Bila diintegrasikan dengan reaktor cepat (PWR - FR strategi), daur bahan bakar ini menjadi lebih menarik di masa depan.

Kata Kunci : Daur bahan bakar nuklir

ABSTRACT

FUEL CYCLE STRATEGY TO SUPPORT OPERATION OF NPP IN SUSTAINABLE MANNER. Various fuel cycle options that are compatible with PWR-type nuclear power plants have been studied to obtain fuel cycle systems are the most viable for the sustainable development of nuclear power plants in Indonesia. Metrics used to assess are the natural uranium resources utilization, the radioactive waste generated, proliferation resistance and fuel cycle costs. If the availability of natural uranium is not an obstacle to achieving sustainability, the one through fuel cycle system can be said the most viable to be implemented at this time. If uranium availability becomes a concern and significant uranium utilization are required (and problem in the spent fuel management), the implementation of single pass plutonium recycling in MOX fuel should be introduced. Proven technology to recycle plutonium in the spent UOX fuel is available in the commercial market now and may be much cheaper in the future. The single pass recycling plutonium in MOX fuel offers modest attractive uranium resources saving. And also the waste production per unit energy generated lower than waste production in once through UOX fuel cycle. But this fuel cycle poses greater the proliferation risk due to working inventory of separated plutonium. Coupled with fast reactors (PWR – FR strategy), this fuel cycle is become more attractive in the future.

Keywords : Fuel Cycle

PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik diproyeksikan akan meningkat pesat di masa mendatang seiring dengan peningkatan kesejahteraan. Saat ini (tahun 2010) kapasitas terpasang pembangkit listrik adalah 37 GWe, dan diproyeksikan akan tumbuh hingga 400 GWe pada tahun 2050. Hal ini merupakan tantangan besar bagi negara untuk memenuhi kebutuhan tersebut karena permasalahan keterbatasan sumber daya alam yang ada saat ini. Oleh karena itu berbagai aspek dalam pemilihan pasokan energi perlu

dipertimbangkan, seperti ketersediaan dan keamanan pasokan sumber energi, teknologi, keselamatan, lingkungan, sosial dan ekonomi.

Introduksi energi nuklir (PLTN) di Indonesia dimaksudkan tidak hanya untuk mencapai bauran energi yang optimum dari segi biaya dan dampak lingkungan. Akan tetapi juga untuk mengurangi tekanan permintaan domestik terhadap minyak dan gas bumi. Peran utama PLTN adalah menstabilkan pasokan energi listrik, menjaga keberlanjutan sumber daya alam gas dan minyak bumi, dan melindungi lingkungan hidup

dari polutan berbahaya akibat pembakaran bahan bakar fosil (minyak dan batu bara). Proyeksi dan optimasi bauran energi untuk skenario pembatasan pelepasan CO₂ ke lingkungan yang dihitung dengan program MESSAGE menunjukkan bahwa energi nuklir (PLTN) dapat diintroduksi ke sistem bauran energi (pembangkit listrik) pada tahun 2024 dengan kapasitas terpasang 2000 MWe dan kemudian proyeksikan akan tumbuh hingga 36000 MWe pada tahun 2050.

Dimasukkannya energi nuklir ke dalam sistem bauran energi nasional mengharuskan dilakukan perencanaan energi yang komprehensif terkait aspek keberlanjutan introduksi PLTN di masa depan. Untuk mendukung hal ini akan dilakukan analisis terhadap berbagai opsi daur bahan bakar nuklir yang kompatibel dengan sistem PLTN yang terbukti (*proven*) saat ini, khususnya dari perspektif penggunaan sumber daya alam uranium dan akumulasi limbah radioaktif di dalam bahan bakar bekas. Aspek proliferasi terhadap bahan nuklir dan ongkos daur bahan bakar (*fuel cycle cost*) juga dipertimbangkan dalam analisis ini.

Tujuan studi ini adalah untuk menilai berbagai opsi strategi daur bahan bakar yang paling layak dalam mendukung keberlanjutan introduksi PLTN di Indonesia. Hasil penilaian dapat digunakan dalam penyusunan kebijakan nasional daur bahan bakar nuklir, untuk mengembangkan kesadaran tentang isu-isu jangka panjang program PLTN, dan untuk mendukung perencanaan strategis dan pengambilan keputusan pengembangan program PLTN secara berkelanjutan.

Sistem energi nuklir yang selamat, aman, ekonomis, dapat diterima publik, memiliki keamanan pasokan bahan bakar, efisien dalam penggunaan sumber daya alam, dan limbah yang dihasilkan minimal merupakan kondisi yang diperlukan dalam pengembangan PLTN di Indonesia yang berkelanjutan. Lima opsi daur bahan bakar nuklir yang dievaluasi untuk mendukung program tenaga nuklir (PLTN) di Indonesia yang berkelanjutan adalah:

1. *OneThrough Fuel Cycle (PWR – UOX)*. Merupakan daur bahan bakar referensi. Basis evaluasi adalah bahan bakar untuk produksi listrik 1000 MWe-y di *Pressurized Water Reactor* (PWR) dengan bahan bakar konvensional uranium oksida (UO₂) derajat bakar menengah (51 GWd/THM), dan bahan bakar bekas (*spent fuels*) langsung dibuang dalam repositori geologi.
2. *Plutonium Mono-Recycle with MOX Fuel (PWR – MOX)*. Daur bahan bakar ini melibatkan proses pemungutan Pu yang

terkandung dalam bahan bakar bekas (*spent fuels*). Pemungutan Pu dilakukan melalui proses olah ulang konvensional PUREX, dan plutonium yang dipisahkan (Pu) didaur ulang dalam bentuk bahan bakar U-Pu *mixed oxide* (MOX) untuk digunakan di PWR. Limbah radioaktif level tinggi (HLW) dari proses PUREX dan bahan bakar MOX bekas dibuang langsung dalam repositori geologi.

3. *Direct Use of PWR Spent Fuel in CANDU Reactor (DUPIC)*. Daur bahan bakar ini didasarkan pada proses kering termal dan mekanik untuk membuat bahan bakar reaktor CANDU dari bahan bakar bekas PWR tanpa memisahkan bahan fisil dan produk fisi.
4. *Synergistic Fuel Cycle of PWR – FR*. Daur bahan bakar ini memungkinkan untuk mentransformasi TRU dan mengekstrak energi pada saat yang sama. Bahan bakar bekas PWR diproses ulang (*advanced PUREX*) untuk mendapatkan TRU sebagai bahan bakar reaktor cepat (FR). Uranium sisa dari proses bahan bakar bekas PWR akan dibuang sebagai limbah radioaktif rendah dan tingkat menengah. Sisa TRU setelah pembakaran di FR akan berulang kali dipungut melalui *pyro-processing* dan didaur ulang menjadi bahan bakar FR untuk menutup daur bahan bakar.
5. *OnceThrough Th-U Fuel in PWR*. Penggunaan bahan bakar thorium dalam PWR dengandaur bahan bakar sekali buang menjadi pilihan menarik karena potensi keuntungan, seperti rasio konversi yang tinggi sehubungan dengan derajat bakar diperpanjang dan persediaan awal bahan fisil rendah. Penggunaan bahan bakar thorium dapat mengurangi aktinida minor dan radiotoksitas bahan bakar bekas.

METODOLOGI

Perbandingan berbagai opsi daur bahan bakar nuklir digunakan dalam penelitian ini. Daur bahan bakar yang digunakan sebagai pembandingan/referensi adalah daur bahan bakar sekali buang (*one through fuel cycle*). Metrik evaluasi yang digunakan adalah pemanfaatan (konsumsi) sumber daya alam uranium, akumulasi limbah radioaktif di dalam bahan bakar bekas (*spent fuel*) atau yang didisposal, risiko proliferasi, dan ongkos daur bahan bakar.

Pemanfaatan sumber daya alam diukur berdasarkan massa uranium alam atau thorium yang diperlukan per unit energi listrik yang dihasilkan per tahun (ton/GWe-y). Generasi limbah radioaktif diukur menggunakan dua metrik, yaitu massa elemen transurium (*transuranics*) dan massa produk fisi

per unit energi listrik yang dihasilkan per tahun (kg/GWe-y). Risiko proliferasi diukur berdasarkan akumulasi plutonium dan elemen transuranium per unit energi listrik yang dihasilkan (kg/GWe). Metrik ongkos daur bahan bakar (mills/kWe-h) dimaksudkan untuk mengungkapkan dampak daur bahan bakar maju terhadap daur bahan bakar referensi dari segi ongkos bahan bakar.

Perhitungan aliran massa dilakukan berdasarkan data yang tersedia dalam literatur. Untuk mempermudah, hanya kondisi kesetimbangan (ekuilibrium) yang dipakai dalam analisis. Model ekuilibrium berfokus pada studi *batch* dengan asumsi bahwa seluruh sistem dalam keadaan stabil dan bahwa aliran massadan produksi listrik di seluruh siklus bahan bakar

dalam keadaan keseimbangan yang ideal. nput data utama yang digunakan dalam penelitian ini diringkas dalam Tabel 1 untuk spesifikasi reaktor dan bahan bakar, dan Tabel 2 untuk harga satuan layanan komponen daur bahan bakar.

Untuk analisis biaya bahan bakar, model sederhana yang dikembangkan MIT telah digunakan. Dalam model ini, kuantitas setiap komponen daur (seperti: pembelian U-alam, konversi, pengkayaan, fabrikasi) dikalikan harga satuan bahan/prosesakan diperoleh biaya bahan bakar pada langkah tersebut dan dikombinasikan dengan biaya tambahan yang terkait dengan operasi. Dengan menjumlahkan biaya semua komponen daur dan kemudian dibagi dengan energi listrik yang dihasilkan, biaya total daur bahan bakar akan diperoleh.

Table 1: Data Reaktor dan Spesifikasi Bahan Bakar

| Items | PWR UOX | PWRMOX | DUPIC | FR | PWRU-Th |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|--|------------------------------------|---|
| Derajat Bakar (GWd/tHM) | 51 | 51 | 14 | 140 | *) |
| Efisiensi Thermal Reaktor | 34% | 34% | 33% | 40% | 34% |
| Komposisi <i>Fresh Fuel</i> | UO ₂ 4.3% U235 | MOX 8.1% Pu 91.9% DU | UO _x from PWR spent fuel | Metallic 33.2% TRU 66.8% U | Seed: UO ₂ (20% U235) Blanket: 87% ThO ₂ 13% UO ₂ (10% U235) |
| Komposisi <i>Spent Fuel</i> | 1.197% Pu 0.51% MA 5.264% FP 93.439% U | 5.52% Pu 0.54% MA 5.515% FP | 0.838% Pu 0.12% MA 6.709% FP 92.33% U | 59.94% U 26.46% TRU 14.1% FP | Seed: 1.97% TRU 1.56% Pu 14.45% FP Blanket: 0.51% TRU 0.45% Pu ₂ 8.8% FP |

*) Reaktor membangkitkan 1.570 GWe-yr (panjang siklus 18 bulan), bahan bakar UO₂ yang diganti setiap siklus sekitar 7.703 tHM, dan (Th-U)O₂ diganti setiap 9 siklus sekitar 58.997 tHM

Table 2: Harga Satuan Komponen Daun Bahan Bakar

| Items | PWR UOX | PWR MOX | DUPIC | FR | PWR U - Th |
|------------------------------------|---------|---------|-------|------|------------|
| Biaya Ujung Depan Daun : | | | | | |
| - Natural Uranium [\$/kgHM] | 80 | - | - | - | 80 |
| - Conversion [\$/kgHM] | 10 | - | - | - | 10 |
| - Uranium Enrichment [\$/kgSWU] | 120 | - | - | - | 120 |
| - Fuel Fabrication [\$/kgHM] | 275 | 1500 | 850 | 2500 | 275 |
| Biaya Ujung Belakang Daun : | | | | | |
| - SF Storage & Disposal [\$/kgHM] | 250 | - | 250 | - | 250 |
| - SF Reprocessing [\$/kgHM] | - | 1000 | - | - | - |
| - Advance PUREX [\$/kgHM] | - | - | - | 1000 | - |
| - Pyro-Reprocessing [\$/kgHM] | - | - | - | 2500 | - |
| - HLW Storage & Disposal [\$/kgHM] | - | 200 | - | 200 | - |

Table 2:Lanjutan

| Items | PWR UOX | PWR MOX | DUPIC | FR | PWR U - Th |
|----------------------------------|---------|---------|-------|----|------------|
| Lead Time Fuel Services | | | | | |
| - Nat. Uranium Purchase [months] | 24 | - | - | - | 24 |
| - Conversion Service [months] | 20 | - | - | - | 20 |
| - Enrichment Service [months] | 18 | - | - | - | 18 |
| - Fuel Fabrication [months] | 12 | - | 12 | 12 | 12 |
| - Reprocessing | - | 24 | - | 48 | - |
| Lag Time Fuel Services | | | | | |
| - SF Storage & Disposal [years] | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

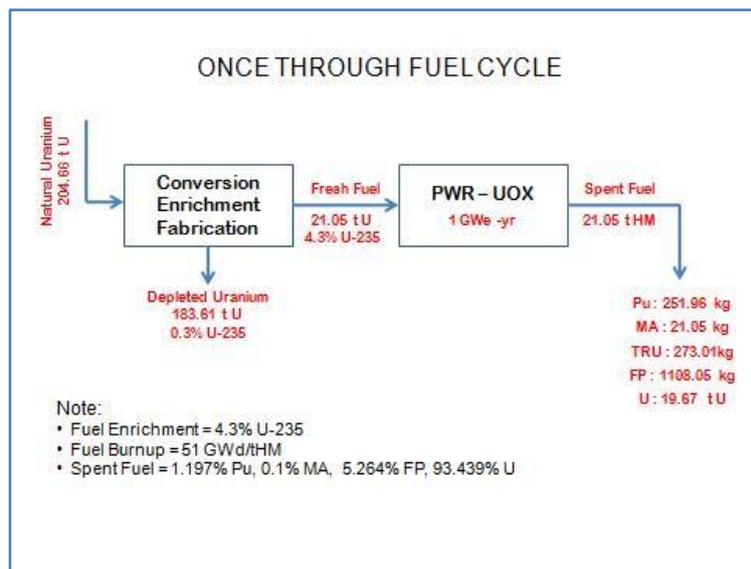
CATATAN: Kerugian dalam proses olah-ulang 0,1% diasumsikan untuk semua jenis metode olah ulang bahan bakar bekas; kandungan U-235 dalam uranium alam 0,007114; *Tail* pada proses pengayaan uranium adalah 0,3; Tidak ada kerugian material dalam konversi uranium dan fabrikasi bahan bakar; waktu pendinginan bahan bakar bekas sebelum proses olah ulang adalah 5 tahun; dan faktor biaya operasi (*carrying charge*) adalah 0,1 per tahun

HASIL DAN BAHASAN

Hasil perhitungan aliran massa dalam sistem daur bahan bakar sekali buang (*Once Through Fuel Cycle - OTFC*) pada PLTN tipe PWR disajikan dalam gambar 1. Untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 GWe-y, sumber daya alam uranium yang diperlukan adalah 204.66 ton U, dan limbah radioaktif yang dihasilkan adalah 21.06 ton HM dalam bentuk elemen bakar bekas.

Sistem daur bahan bakar OTFC memiliki karakteristik ketahanan proliferasi yang baik karena bahan fisil yang ada tidak dapat secara langsung digunakan sebagai bahan peledak nuklir. Bagian depan daur menangani uranium dengan tingkat pengayaan U-235 jauh di bawah ambang batas kekhawatiran proliferasi (20%). Pembuangan langsung bahan bakar bekas merupakan penghalang yang cukup efektif terhadap proliferasi karena masih bercampurnya bahan fisil plutonium atau aktinida dengan produk fisi radioaktif aktivitas tinggi berumur panjang.

Biaya total bahan bakar per-satuan energi listrik yang dibangkitkan adalah 6.347 mills/kWh (1mills = 0.001 USD). Biaya ini terdiri atas biaya pembelian uranium alam sebesar 2.663 mills/kWh, biaya layanan konversi UF6 sebesar 0.325 mills/kWh dari UF6, biaya layanan pengayaan sebesar 2,317 mills/kWh, biaya fabrikasi perangkat bakar sebesar 0.876 mills/kWh, biaya penyimpanan dan disposal bahan bakar bekas sebesar 0.165 mills/kWh.



Gambar 1: Aliran massa pada sistem daur bahan bakar sekali buang untuk PWR

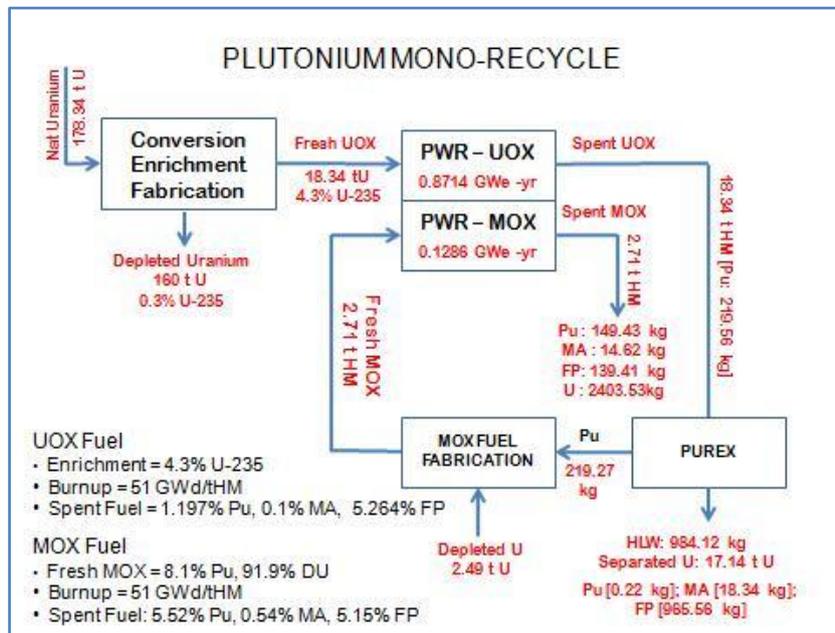
Plutonium yang terkandung dalam bahan bakar bekas dapat didaur ulang sebagai bahan fisil untuk bahan bakar nuklir baru. Daur ulang plutonium dicampur dengan uranium alam atau uranium deplesi untuk membuat bahan bakar campuran oksida atau MOX (*Mixed Oxide*). Karena adanya efek yang merugikan pada kontrol reaktor, teras reaktor PWR tidak dapat dimuati bahan bakar MOX sepenuhnya. Biasanya hanya 1/3 dari teras yang dapat dimuati dengan bahan bakar MOX. Gambar 2 menyajikan hasil perhitungan terhadap aliran massa pada sistem PWR yang menerapkan daur ulang plutonium *mono-recycle*.

Untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 GWe-y, sistem memerlukan sumber daya alam uranium sebesar 178.34 ton U atau lebih rendah sekitar 12.9% dari kebutuhan uranium alam untuk sistem daur bahan bakar sekali buang (OTFC). Limbah radioaktif yang dihasilkan adalah 2.71 ton HM berupa bahan bakar bekas MOX dan 984.12 kg berupa limbah aktivitas tinggi (HLW) dari proses PUREX (pemungutan Pu). Sistem ini juga menghasilkan uranium sebanyak 17.14 ton U.

Proses PUREX menimbulkan kekhawatiran proliferasi serius karena proses mem-produksi

plutonium terpisah. Dengan asumsi waktu penyimpanan plutonium hasil pemisahan adalah 6 bulan maka plutonium yang ada dalam penyimpanan setiap saat (*inventory*) adalah sekitar 109.78 kg/GWe mengingat aliran massa plutonium total 219.56 kg/GWe-y. Pada kenyataannya, ada masalah mendasar dengan keseimbangan material bahan bakar dalam proses fabrikasi bahan bakar campuran. Hal ini dapat menyebabkan beberapa konsekuensi yang tidak diinginkan, yaitu akumulasi plutonium dalam penyimpanan.

Total biaya untuk sistem daur bahan bakar Pu-*mono recycle* adalah 8.481 mills/kWh. Biaya ini lebih tinggi 33.6% dibandingkan biaya daur bahan bakar PWR UOx sekali buang (OTFC). Biaya daur bahan bakar PWR MOX sekitar 22.943 mills/kWh. Biaya ini tersusun atas kredit bahan bakar bekas PWR-UOx sekitar -5.793 mills/kWh, biaya pengolahan ulang bahan bakar bekas PWR-UOx sekitar 23.171 mills/kWh, biaya pembuatan perangkat bahan bakar MOX sekitar 4.776 mills/kWh, biaya penyimpanan dan pembuangan HLW proses PUREX sekitar 0.624 mills/kWh, dan biaya penyimpanan dan pembuangan bahan bakar bekas MOX sekitar 0.165 mills/kWh.



Gambar 2: Aliran massa untuk sistem daur ulang plutonium *mono-recycle* pada reaktor PWR

Penggunaan langsung bahan bakar bekas PWR untuk bahan bakar CANDU (DUPIC) dimaksudkan untuk mengekstrak lebih banyak energi dari bahan bakar PWR tanpa meningkatkan pengayaan awal. Ide dasar dari siklus

bahan bakar ini adalah bahwa bahan bakar bekas PWR masih mengandung bahan fisil yang cukup untuk dibakar dalam reaktor CANDU. Proses fabrikasi perangkat bakar CANDU dilakukan secara langsung tanpa memisahkan sisa bahan

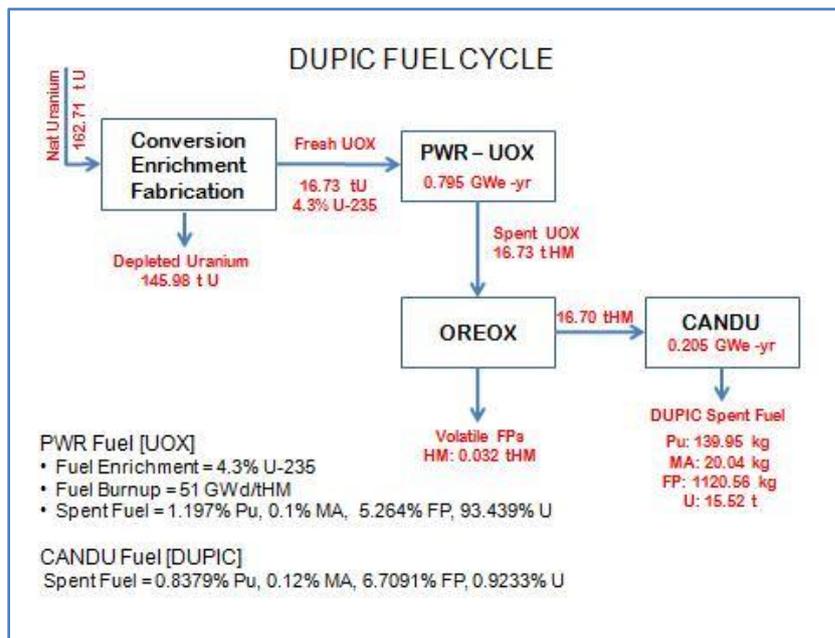
fisil yang ada dalam bahan bakar bekas PWR melalui proses daur ulang kering dikenal sebagai OREOX. Daur bahan bakar DUPIC menawarkan alternatif yang baik dari opsi daur bahan bakar konvensional lainnya, seperti plutonium *recycle* dengan bahan bakar MOX. Hasil perhitungan aliran massa dalam sistem daur bahan bakar DUPIC disajikan dalam gambar 3.

Karena ekonomi neutron yang sangat baik dalam reaktor CANDU, adalah mungkin untuk membuat bahan bakar bekas PWR yang memiliki kandungan fisil sekitar 1.5% sebagai bahan bakar CANDU sampai derajat bakar 10 hingga 20 GWd/THM. Untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 GWe-y, sistem daur bahan bakar DUPIC memerlukan sumber daya alam uranium sebesar 162.71 ton U atau lebih rendah sekitar 20% dibanding daur bahan bakar sekali buang pada PWR. Adapun limbah radioaktif yang dihasilkan adalah 16.7 ton HM dalam bentuk

perangkat bakar bekas CANDU. Jumlah ini lebih rendah 20% dibanding limbah radioaktif bahan bakar bekas sistem daur bahan bakar sekali buang.

Karena pengolahan ulang bahan bakar bekas PWR tidak melalui pelarutan dan tidak ada komponen bahan bakar yang diambil selain produk fisi volatil, daur bahan bakar DUPIC menyajikan risiko proliferasi minimal. Selain itu, massa plutonium per unit energi yang dihasilkan dalam bahan bakar teriradiasi DUPIC juga lebih rendah dibandingkan di dalam daur bahan bakar sekali buang pada PWR.

Biaya siklus bahan bakar dari sistem energi nuklir DUPIC (79,5% PWR dan 20,5% CANDU/PHWR) adalah sekitar 6.648 mills/kWh. Biaya ini lebih tinggi sekitar 5% dibandingkan dengan biaya bahan bakar sistem daur bahan bakar sekali buang pada PWR – UOx.



Gambar 3. Aliran massa untuk sistem daur bahan bakar DUPIC

Untuk skema daur bahan bakar sinergistik antara PWR dengan FR (*Fast Reactor*), bahan bakar bekas dari PWR yang diproses ulang (PUREX maju) untuk mendapatkan TRU sebagai bahan bakar FR. Uranium sisa yang telah dipartisi dari bahan bakar bekas PWR akan dibuang sebagai limbah radioaktif tingkat rendah - menengah. Untuk menutup daur bahan bakar (*closed fuel cycle*), bahan bakar TRU setelah terbakar di FR berulang kali diproses melalui *pyro-processing*, dan TRU-nya didaur ulang kembali menjadi bahan bakar FR untuk menutup siklus bahan bakar. Hasil perhitungan aliran

massa untuk sistem daur bahan bakar ini disajikan pada gambar 4.

Menggunakan persamaan neraca massa dapat diperoleh bahwa daya listrik berasal dari PWR-UOx adalah 61.65% dan daya listrik yang berasal dari bahan bakar FR-TRU adalah 38.35%. Massa bahan bakar yang diperlukan untuk menghasilkan energi listrik sebesar 1 GWe-y adalah 12.98 ton bahan bakar PWR-UOX (diperkaya hingga 4.3% U-235) dan 2.5 ton bahan bakar FR - TRU. Uranium alam yang diperlukan dari sistem energi nuklir ini adalah

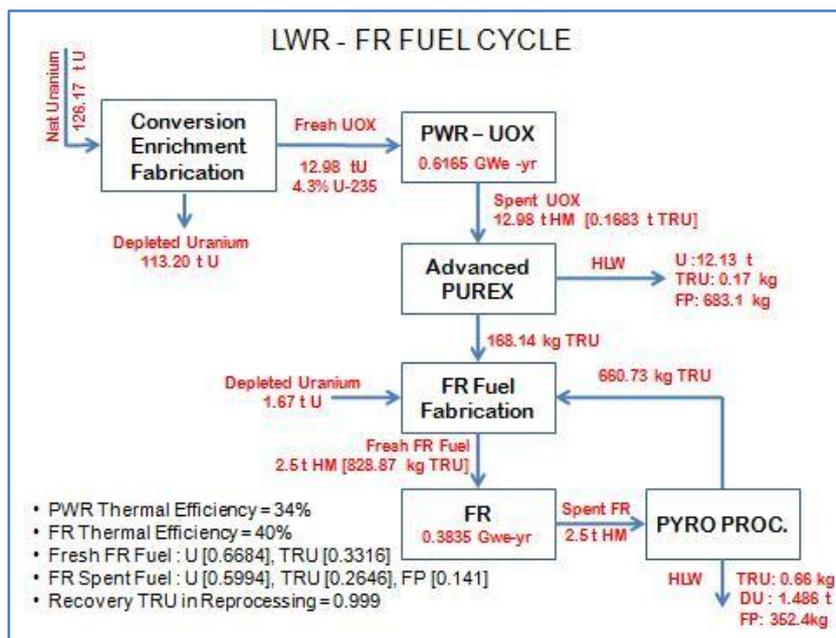
126.17 ton. Jumlah SWU untuk proses pengayaan adalah 75.84 ton dan uranium deplesi adalah 113.2 ton. Fabrikasi bahan bakar TRU membutuhkan 828.87 kg TRU, dan 1.67 ton uranium.

Jika dibandingkan dengan daur bahan bakar sekali buang pada PWR-UO_x, sistem energi nuklir ini dapat menghemat hingga 38.4% uranium alam diperlukan.

Limbah dari sistem energi nuklir PWR – FR berasal dari pengolahan ulang bahan bakar bekas PWR - UO_x (*Advanced PUREX*) dan pengolahan ulang dari bahan bakar bekas FR - *Metallic* TRUs (*Pyro-processing*). Limbah aktivitas tinggi (HLW) berupa elemen *transuranic* adalah 0.83 kg/GWe-y, produk fisi sekitar 1.036 kg/GWe-y, uranium sekitar 12.13 ton/GWe-y, dan uranium deplesi sekitar 1.486 kg/GWe-y. Jika dibandingkan dengan daur bahan bakar sekali buang pada PWR, sistem energi nuklir PWR - FR mampu mengurangi kandungan TRU di limbah aktivitas tinggi hingga 99.7%.

Total massa bahan bakar bekas yang diolah kembali dalam sistem energi nuklir PWR – FR sekitar 15.48 ton HM/GWe-y. Meskipun tidak ada plutonium terpisah yang diproduksi dalam sistem daur bahan bakar PWR - FR, tetapi cukup banyak *transuranics* yang harus diadakan dalam persediaan antara pengolahan kembali dan fabrikasi bahan bakar. Dengan asumsi waktu penyimpanan 6 bulan, diperlukan persediaan kerja sekitar 414.44 kg. Kuantitas *transuranics* akan dibuang dalam limbah sekitar 0.83 kg/GWe-y. Dengan asumsi bahwa 85% dari jumlah ini adalah plutonium maka plutonium yang dibuang untuk sistem energi nuklir ini adalah 0.706 kg/GWe-y.

Biaya daur bahan bakar sinergistik sistem energi nuklir PWR - FR (pembangkitan energi listrik 61.65% dari PWR dan 38.35% dari FR) adalah 7.699 mills/kWh. Biaya ini lebih tinggi hingga 20% dibandingkan dengan daur bahan bakar sekali buang pada PWR



Gambar 4. Aliran massa untuk sistem daur bahan bakar PWR – FR

Untuk penggunaan thorium di PWR dalam studi ini digunakan skema daur bahan bakar U-Th sekali buang (OTFC), dan teras reaktor dibagi menjadi dua wilayah, yaitu wilayah benih (*seed*) yang berisi bahan fisi U-235 dan wilayah selimut (*blanket*) yang berisi bahan fertile Th-232. Masing-masing wilayah menggunakan skema manajemen bahan bakar teras (*in-core fuel management*) yang berbeda. Selimut akan tetap berada di teras untuk jangka waktu yang panjang untuk memungkinkan kembang biak signifikan dan pembakaran in-situ

U-233, sedangkan benih akan diganti lebih sering untuk mempertahankan reaktivitas. Konsep perangkat bakar tunggal yang sekaligus berisi benih dan selimut (*whole assembly seed and blanket - WASB*) digunakan.

Konsep WASB didasarkan pada PWR Westinghouse 1150 MWe. Dalam hal ini, elemen bakar benih mengandung oksida uranium diperkaya sampai 20% U-235, dan elemen bakar selimut mengandung 87% thorium oksida dan 13% oksida uranium yang diperkaya sampai 10%

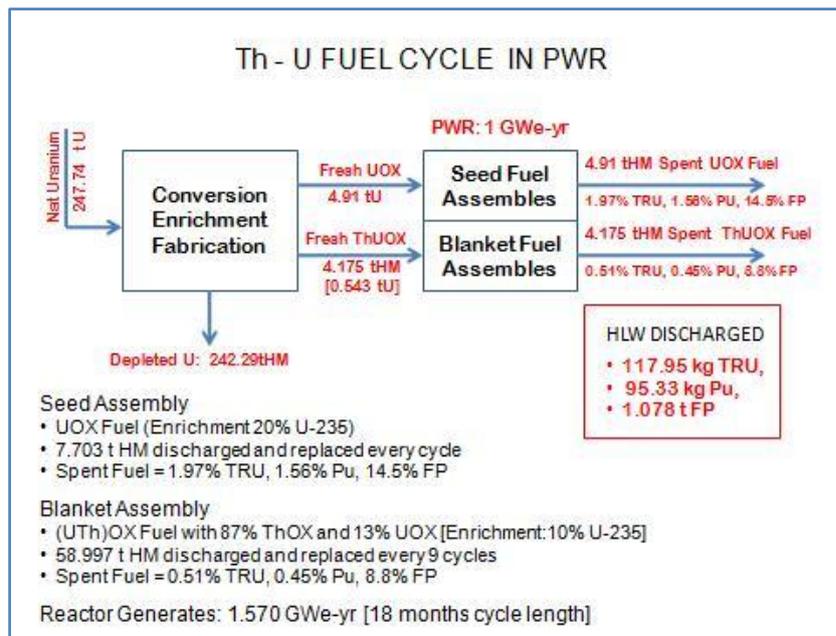
U-235. Skema manajemen teras yang diusulkan WASB adalah sepertiga dari perangkat bakar benih (7,703 THM) dibuang dan diganti setiap siklus, sedangkan selimut (58.997 THM) akan dibuang dan diganti hanya sekali setiap 9 siklus. Durasi siklus adalah 18 bulan dan reaktor akan menghasilkan energi listrik 1570 GWe-y (faktor kapasitas diasumsikan 91%).

Hasil perhitungan aliran massasistem daur bahan bakar U-Th sekali buang (OTFC) di PWR secara lengkap disajikan dalam gambar 5. Untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1 GWe-y, bahan bakar benih yang dibutuhkan adalah 4.91 tHM uranium oksida diperkaya 20% U-235, dan bahan bakar selimut yang dibutuhkan adalah 0.543 tHM uranium oksida diperkaya 10% U-235. Sumber daya alam yang dibutuhkan adalah 247.74 tHM uranium alam dan 3.622 tHM thorium oksida. Adapun jumlah limbah radioaktif yang dihasilkan 9.085 tHM dalam bentuk bahan bakar bekas. Limbah bahan bakar bekas

mengandung 95.33 kg plutonium, 117.95 kg transuranium dan 1.078 t produk fisi.

Terlihat bahwa sistem daur bahan bakar ini memiliki kandungan plutonium dan transuranium lebih rendah sekitar 3 kali dibanding sistem daur bahan bakar konvensional (UO₂) sekali buang. Hal ini juga menunjukkan bahwa sistem daur bahan bakar U-Th yang ditinjau memiliki ketahanan terhadap proliferasi yang lebih baik dibanding sistem daur bahan bakar konvensional sekali buang. Selain itu, elemen bakar U-Th bekas, baik elemen bakar benih ataupun elemen bakar selimut, memiliki laju pembangkitan panas yang lebih tinggi dibanding sistem daur bahan bakar UO₂.

Dari segi biaya bahan bakar, pembangkitan energi listrik dari PWR yang menggunakan sistem daur bahan bakar U-Th sekali buang lebih tinggi sekitar 26.9% dibandingkan bila menggunakan sistem daur bahan bakar konvensional sekali buang.



Gambar 5. Aliran massa untuk sistem daur bahan bakar U-Th pada PWR

Berdasarkan data hasil analisis aliran massa terhadap seluruh sistem daur bahan bakar yang ditinjau menunjukkan bahwa reaktor PWR yang menggunakan sistem daur bahan bakar UO₂ sekali buang menggunakan sumber daya alam uranium paling buruk dibandingkan sistem daur bahan bakar Pu *mono-recycle*, DUPIC, dan daur bahan bakar *synergistic* PWR – FR. Sementara sistem bahan bakar U-Th sekali buang di PWR mengkonsumsi sumber daya alam uranium yang lebih tinggi dibandingkan dengan siklus bahan bakar lainnya. Sistem daur bahan bakar PWR - FR

menunjukkan yang paling efisien dalam menggunakan sumber daya alam uranium dibandingkan sistem daur bahan bakar lainnya. Karena reaktor CANDU dalam siklus DUPIC memiliki ekonomi neutron yang lebih baik dibandingkan dengan reaktor PWR maka sistem bahan bakar DUPIC mengkonsumsi bahan fisil yang lebih efisien dibandingkan PWR. Tapi daur bahan bakar DUPIC (dan juga PWR - FR) sampai saat ini masih dalam taraf pengembangan sehingga belum tersedia di pasar komersial.

Berdasarkan tingkat konsumsi sumber daya alam uranium, dapat disimpulkan sampai pertengahan abad 21 (2050) sistem daur bahan bakar UO_2 sekali buang di PWR adalah pilihan yang paling layak untuk mendukung program introduksi PLTN di Indonesia secara berkelanjutan. Jika ketersediaan uranium menjadi perhatian dan konsumsi uranium yang signifikan diperlukan, penerapan daur bahan bakar MOX dengan plutonium *mono-recycled* dapat diintroduksi. Teknologi yang *proven* untuk mendaur ulang plutonium dalam bahan bakar bekas UOX tersedia di pasar komersial sekarang dan mungkin jauh lebih murah di masa depan.

Penurunan yang signifikan dari permintaan uranium alam bisa dilakukan dengan memasukkan reaktor cepat ke dalam sistem. Pengurangan akan sesuai kira-kira dengan persentase reaktor cepat dalam sistem. Mengingat stok uranium deplesi yang ada saat ini, setiap reaktor cepat yang dapat dibangun di abad ini tidak akan tergantung pada ketersediaan uranium alam.

Dampak limbah nuklir di lingkungan sulit dievaluasi. Dampak jangka panjang terhadap lingkungan dan masyarakat dari repositori limbah nuklir terutama disebabkan oleh isotop radioaktif yang memiliki mobilitas tinggi di lingkungan geologi dari repositori. Secara umum, radiotoksitas produk fisi menurun hingga 2 orde di bawah radiotoksitas aktinida setelah beberapa ratus tahun, tetapi mobilitasnya jauh lebih tinggi. Akibatnya, dosis untuk umum dari repositori limbah nuklir didominasi oleh produk fisi untuk 1 juta tahun pertama atau lebih setelah penutupan.

Dari sudut pandang produksi limbah, skenario daur bahan bakar sinergistik PWR-FR adalah pilihan terbaik di antara daur bahan bakar yang dipertimbangkan. Daur bahan bakar ini menghasilkan elemen transurium dan produk fisi pada tingkat yang jauh lebih rendah per unit energi listrik yang dihasilkan. Sistem DUPIC menghasilkan lebih banyak elemen transurium dan produk fisi per unit energi listrik yang dihasilkan karena derajat bakar bahan bakar UOX diperpanjang dalam reaktor CANDU.

Produk fisi yang terdapat dalam sistem daur bahan bakar sinergis PWR-FR sedikit lebih rendah dari PWR-OTFC karena reaktor cepat berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal sistem. Namun, penurunan tingkat produk fisi dengan cara meningkatkan efisiensi termal sangat terbatas karena efisiensi termal tidak mungkin melampaui 50%. Penumpukan produk fisi hanya dapat dikurangi hingga maksimum 1.5 kali dibandingkan dengan PWR saat ini.

Sistem daur bahan bakar sinergistik PWR-FR merupakan pilihan terbaik berdasarkan tingkat elemen transurium dan produk fisi yang dibuang ke lingkungan per unit energi listrik. Sistem daur bahan bakar ini juga merupakan pilihan terbaik jika pemanfaatan sumber daya alam uranium menjadi pertimbangan kuat dalam proses seleksi. Namun, jika sisa uranium (produk samping proses *advanced PUREX*) tidak dianggap sebagai sumber daya untuk reaktor cepat di masa depan, dampak radiologi jangka panjang harus dianggap sebagai bagian integral dari pengelolaan limbah. Hal ini berdasarkan fakta bahwa produk peluruhan uranium mendominasi radiotoksitas global dalam termin waktu yang lama.

Perlu dicatat bahwa tidak ada daur bahan bakar nuklir yang 100% bebas dari risiko proliferasi. Plutonium yang ada dalam bahan bakar bekas meskipun telah disimpan di repositori juga menimbulkan kekhawatiran proliferasi. Sebuah PWR yang beroperasi dengan daur bahan bakar sekali buang akan mengirimkan sekitar 251.96 kg/Gwe-y plutonium ke repositori. Kuantitas ini sangat besar dibandingkan dengan 10 kg plutonium yang dibutuhkan untuk membuat senjata nuklir.

Dari perspektif risiko proliferasi, pemisahan plutonium dari bahan bakar bekas dipandang sebagai kegiatan yang paling berbahaya yang terkait dengan sistem daur bahan bakar nuklir komersial. Sistem daur bahan bakar *single-pass* plutonium memerlukan plutonium persediaan hingga 219.27 kg/tahun. Dengan kata lain, sebuah PWR 1000 MWe akan menghasilkan jumlah plutonium yang cukup untuk membuat sekitar 22 senjata nuklir setiap tahunnya.

Siklus bahan bakar yang melibatkan *multi-pass* daur ulang transurium (PWR-FR) akan mengirim plutonium dalam jumlah yang sangat kecil ke repositori (<1 kg/GWe.y dari TRU). Plutonium yang demikian sangat encer dalam HLW, dan ekstraksi dari jumlah yang signifikan (untuk membuat bom) akan memerlukan pengolahan jumlah besar limbah radioaktif. Tentu saja hal ini merupakan tugas yang sulit bagi kelompok terlarang (*illicit*). Selanjutnya, komposisi isotop plutonium ini sangat terdegradasi karena berulang-kali diiradiasi hingga derajat bakar tinggi. Oleh karena itu, risiko proliferasi yang terkait dengan repositori daur bahan bakar PWR-FR dapat diabaikan. Namun, harus pula dipertimbangkan terhadap fakta bahwa daur bahan bakar ini memerlukan proses pemisahan aktinida sehingga menghasilkan risiko proliferasi dalam jangka pendek.

Daur bahan bakar sekali buang pada PWR berbahan bakar UOX menyajikan biaya bahan bakar terendah. Daur bahan bakar DUPIC juga relatif menarik secara ekonomi karena jenis proses daur ulang yang digunakan lebih murah daripada pengolahan kembali cara basah ataupun *pyro-processing*. Harga uranium alam merupakan faktor penting dalam biaya bahan bakar untuk daur referensi (daur bahan bakar sekali buang - OTFC), memiliki dampak yang moderat pada biaya daur bahan bakar untuk skema yang melibatkan pemrosesan kembali dan daur ulang.

Perlu dicatat bahwa biaya bahan bakar relatif kecil dibandingkan dengan total biaya pembangkitan listrik nuklir. Biaya bahan bakar berkisar dari 10 sampai 20 persen dari total dan biaya pengelolaan sampah menyumbangkan hanya 1 sampai 5 persen dari total biaya bahan bakar. Sementara biaya pengelolaan limbah bervariasi secara signifikan antara strategi, kontribusinya terhadap total biaya pembangkitan cukup kecil sehingga dapat mencegah menjadi faktor pendorong utama dalam pengambilan keputusan.

Rendahnya laju pengeluaran bahan bakar bekas dan plutonium yang terkandung serta isotop plutonium terdegradasi yang diberikan oleh penggunaan thorium di PWR tidak memberikan nilai tambah terkait manajemen limbah nuklir saat ini. Tidak ada insentif bagi operator PLTN mengeluarkan biaya berkaitan dengan pengembangan bahan bakar thorium dan *refitting core* PWR untuk mengakomodasi rakitan bahan bakar benih dan selimut. Manfaat dari daur bahan bakar ini tidak cukup untuk mengubah prospek energi nuklir.

Biaya daur bahan bakar hanyalah sebagian kecil dari total biaya pembangkitan listrik tenaga nuklir. Tenaga nuklir (PLTN) adalah teknologi padat modal dan biaya investasi, khususnya yang terkait dengan pembangunan, perbaikan dan akhirnya pembongkaran reaktor biayanya jauh lebih besar dibandingkan biaya daur bahan bakar. Oleh karena itu, dampak dari berbagai skema daur bahan bakar pada ekonomi listrik nuklir tetap marginal di bawah setiap set asumsi.

KESIMPULAN

Introduksi PLTN yang dioperasikan dengan sistem daur bahan bakar sekali buang bukan representasi penggunaan sumber daya alam uranium yang efisien. Akan tetapi daur bahan bakar ini tidak melibatkan pengolahan ulang bahan bakar nuklir bekas sehingga hanya menimbulkan risiko proliferasi minimal. Perhatian perlu diberikan pada daur bahan bakar ini karena akan mengirimkan jumlah besar

plutonium dan aktinida minor ke repositori. Hal ini juga dapat dikatakan bahwa repositori menyajikan risiko proliferasi yang signifikan karena menyimpan sejumlah besar plutonium (sebagai tambang plutonium).

Daur ulang sekali punggut plutonium (*Pu mono-recycle*) dalam sistem bahan bakar PWR-MOX menawarkan penghematan sumber daya alam uranium yang menarik. Produksi limbah nuklir per unit energi listrik yang dihasilkan juga lebih rendah dibandingkan pada daur bahan bakar UOX sekali buang. Namun, daur bahan bakar ini menimbulkan risiko proliferasi lebih besar karena sistem ini bekerja dengan persediaan plutonium terpisah (*separated Pu*). Bila diintegrasikan dengan reaktor cepat, daur bahan bakar ini dapat menjadi lebih menarik di masa depan.

Daur bahan bakar DUPIC menawarkan kemajuan yang menarik dalam pengelolaan limbah bahan bakar bekas. Massa bahan bakar bekas dibuang oleh PWR / PHWR adalah 3 kali lebih rendah bila daur bahan bakar DUPIC diimplementasikan. Hambatan yang paling signifikan untuk DUPIC adalah pengembangan proses OREOX. Perlu dicatat bahwa penyebaran DUPIC akan terbatas pada negara-negara yang mengoperasikan PLTN tipe PWR dan PHWR.

Pemrosesan kembali untuk mendaur ulang dan membakar aktinida (daur bahan bakar sinergistik PWR-FR) mengurangi volume dan toksisitas jangka panjang limbah nuklir dan dapat digunakan bersama dengan opsi lain untuk menghadapi keterbatasan kapasitas penyimpanan. Jika dibandingkan dengan daur bahan bakar sekali buang (OTFC), sistem sinergistik PWR-FR dapat mereduksi kandungan TRU di HLW hingga 99.7% dan dapat menghemat hingga 38.4% dari uranium alam yang diperlukan. *Pyro-processing* memisahkan aktinida (TRU) dari produk fisi yang ada di dalam bahan bakar bekas. Campuran aktinida (TRU) tidak dapat digunakan secara langsung untuk senjata (risiko proliferasi rendah).

Penggunaan Th-U di PWR dengan konsep selimut-benih cukup menarik karena mereduksi jumlah bahan bakar bekas dan isotop plutoniumnya terdegradasi. Namun, daur bahan bakar ini membutuhkan uranium alam lebih banyak dari sistem daur bahan bakar UOX sekali buang. Daur bahan bakar Th-U sekali buang di PWR hanya layak apabila tidak ada beban atau batasan dalam penggunaan sumber daya alam uranium.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear Energy Development in the 21st Century: Global Scenario and

- Regional Trends, IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.8, Vienna (2010).
- [2] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**, Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy System, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.4, Vienna (2012).
- [3] **NUCLEAR ENERGY AGENCY**, Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management, NEA no. 5990, OECD (2006).
- [4] **NUCLEAR ENERGY AGENCY**, Nuclear Fuel Cycle Transition Scenario Studies, NEA no. 6194, OECD (2009).
- [5] **NUCLEAR ENERGY AGENCY**, Nuclear Fuel Cycle Synergies and Regional Scenarios for Europe, NEA no. 6857, OECD (2009).
- [6] **NUCLEAR ENERGY AGENCY**, Trends Towards Sustainability in the Nuclear Fuel Cycle, NEA no. 6980, OECD (2012).
- [7] **ETIENNE PARENT**, Nuclear Fuel Cycles for Mid-Century Deployment, Thesis Submitted to Department of Nuclear Engineering, Massachusetts Institute of Technology, MIT (2003)
- [8] **DAVID VON HIPPEL**, et.al., Future Regional Nuclear Fuel Cycle Cooperation in East Asia: Energy Security Costs and Benefits, Nautilus Institute for Security and Sustainability, San Francisco (2010)

