

# STUDI OPSI DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS REAKTOR PWR DAN CANDU

Djati H. Salimy, Ida N. Finahari

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

## ABSTRAK

### **STUDI OPSI DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS REAKTOR PWR DAN CANDU.**

Telah dilakukan studi opsi daur bahan nuklir berbasis reaktor PWR dan CANDU. Ada 5 jenis opsi daur berbasis PWR dan CANDU, yaitu: opsi PWR-OT, PWR-MOX, CANDU-OT, DUPIC, dan PWR-CANDU-OT. Sedang parameter yang ditinjau dalam studi ini adalah kebutuhan bahan bakar, volume limbah dan total plutonium yang dihasilkan. Dari hasil studi diperoleh bahwa opsi DUPIC membutuhkan bahan bakar yang paling sedikit untuk membangkitkan listrik dalam jumlah yang sama. Untuk volume limbah, opsi PWR-MOX menghasilkan limbah yang paling sedikit, namun jumlah limbah level tinggi yang dihasilkan dua kali lebih banyak dibanding opsi DUPIC. Sedang untuk total plutonium, opsi PWR-MOX menghasilkan total plutonium yang paling sedikit, tetapi opsi DUPIC menghasilkan plutonium fisil yang paling sedikit. Dengan kata lain efektivitas pemanfaatan plutonium pada daur DUPIC lebih baik dibanding opsi yang lain.

Kata Kunci: opsi daur, PWR, CANDU, DUPIC, plutonium, limbah

## ABSTRACT

### **THE STUDY OF NUCLEAR FUEL CYCLE OPTIONS BASED ON PWR AND CANDU REACTORS.**

The study of nuclear fuel cycle options based on PWR and CANDU type reactors have been carried out. There are 5 cycle options based on PWR and CANDU reactors, i.e.: PWR-OT, PWR-OT, PWR-MOX, CANDU-OT, DUPIC, and PWR-CANDU-OT options. While parameters which assessed in this study are fuel requirement, generating waste and plutonium from each cycle options. From the study found that the amount of fuel in the DUPIC option needs relatively small compared the other options. From the view of total radioactive waste generated from the cycles, PWR-MOX generate the smallest amount of waste, but produce twice of high level waste than DUPIC option. For total plutonium generated from the cycle, PWR-MOX option generates smallest quantity, but for fissile plutonium, DUPIC options produce the smallest one. It means that the DUPIC option has some benefits in plutonium consumption aspects.

Keywords: cycle option, PWR, CANDU, DUPIC, plutonium, waste.

## 1. PENDAHULUAN

Dalam teknologi daur bahan bakar nuklir, dikenal istilah daur dengan olah ulang dan daur sekali pakai (once through). Daur dengan olah ulang adalah suatu sistem daur bahan bakar nuklir dengan melakukan proses olah ulang bahan bakar bekas untuk memungut uranium sisa (*recovered uranium*) dan bahan fisil plutonium untuk diumpankan kembali sebagai bahan bakar. Sedang pada sistem daur sekali pakai, tidak dilakukan proses olah ulang. Bahan bakar bekas setelah habis masa pakainya disimpan pada penyimpanan sementara untuk suatu

saat dikirim ke fasilitas penyimpanan lestari. Juga dikenal sistem daur terbuka yang berarti *wait and see*, masih terbuka untuk pilihan apakah memilih daur dengan olah ulang atau daur tanpa olah ulang. Pada kenyataannya banyak negara yang mengoperasikan PLTN, pada awalnya menganut sistem yang bersifat *wait and see*. Hal ini mengingat sejak saat bahan bakar habis masa pakainya di reaktor sampai proses olah ulang atau penyimpanan lestari dibutuhkan waktu yang relatif cukup lama.

Fakta bahwa dalam bahan bakar bekas masih mengandung bahan fisil uranium dan plutonium, mendorong berbagai litbang di negara maju untuk memungut bahan fisil tersebut guna dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar nuklir<sup>[1]</sup>. Teknologi olah ulang yang sudah ada sampai saat ini merupakan warisan teknologi militer untuk memisahkan plutonium untuk digunakan sebagai hulu ledak senjata nuklir. Teknologi ini dianggap rentan terhadap proliferasi nuklir, mengingat dengan teknologi tersebut dimungkinkan pemungutan bahan plutonium fisil. Karena itu, berbagai penelitian proses olah ulang yang dianggap lebih aman terus dilakukan. Salah satunya adalah teknologi OREOX (*Oxidation and Reduction of Oxide Fuel*) yang dikembangkan di Korea Selatan dan Kanada sejak awal dasawarsa 1990<sup>[2]</sup>. Teknologi OREOX merupakan proses oksidasi dan reduksi kering berbasis proses termal dan mekanik untuk memanfaatkan bahan-bahan fisil yang ada dalam bahan bakar bekas reaktor PWR, guna difabrikasi sebagai bahan bakar reaktor CANDU. Teknologi ini merupakan kunci opsi daur DUPIC (*direct use of PWR spent fuel in CANDU*) yang bertujuan untuk menghemat pemakaian uranium alam sekaligus mereduksi jumlah limbah radioaktif yang berasal dari bahan bakar bekas.

Dalam makalah ini akan dibahas berbagai opsi daur bahan bakar berbasis teknologi reaktor PWR dan CANDU, dua jenis reaktor yang saat ini banyak dioperasikan di dunia dan diramalkan di masa yang akan datang juga masih akan banyak dipakai. Kedua jenis reaktor ini juga banyak dikaji di Indonesia dan sangat potensial menjadi kandidat reaktor daya pertama yang akan beroperasi di Indonesia. Tujuan dari studi adalah mempelajari karakteristik berbagai aspek implementasi opsi daur bahan bakar nuklir berbasis teknologi reaktor PWR dan CANDU. Hasil studi diharapkan dapat menjadi masukan dalam melakukan pemilihan sistem daur bahan bakar nuklir yang akan diterapkan di Indonesia di masa yang akan datang.

## 2. DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR DAN KARAKTERISTIKA REAKTOR

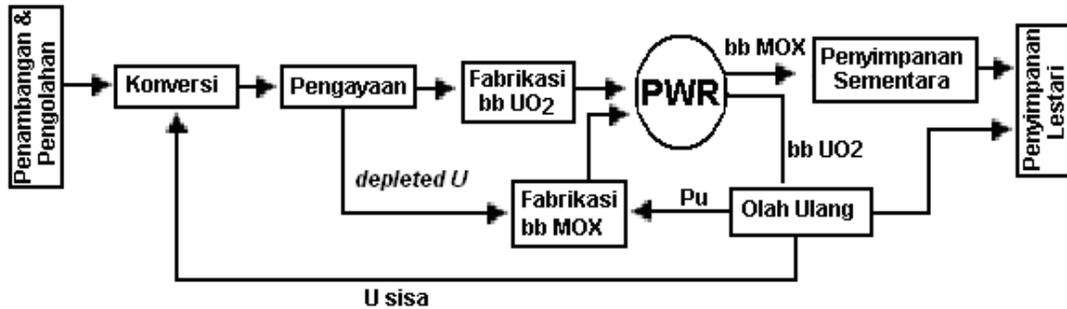
### 2.1 Opsi Daur Bahan Bakar Nuklir

Secara umum, opsi daur bahan bakar berbasis reaktor PWR dan CANDU dikelompokkan menjadi 5 opsi daur seperti terlihat berturut-turut pada Gambar 1, 2, 3, 4, dan 5. Gambar 1 menunjukkan opsi daur berbasis reaktor PWR yang paling sederhana, yaitu daur sekali pakai (*once through*), tanpa melakukan proses olah ulang terhadap bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas, setelah habis masa pakainya dalam reaktor, disimpan pada fasilitas penyimpanan sementara, untuk selanjutnya disimpan ke penyimpanan lestari.



Gambar 1. Opsi Daur PWR-OT<sup>[3,4,5]</sup>

Sedang Gambar 2 merupakan opsi daur berbasis reaktor PWR dengan proses olah ulang. Olah ulang dilakukan untuk memungut uranium sisa dan bahan fisil plutonium, guna di fabrikasi menjadi bahan bakar MOX. Uranium sisa dari bahan bakar bekas dikembalikan ke proses konversi dicampur dengan uranium alam, kemudian melewati proses pengayaan dan fabrikasi bahan bakar uranium oksida. Sedangkan uranium yang dibutuhkan untuk fabrikasi bahan bakar MOX diambil dari uranium susut kadar (*depleted uranium*) luaran dari proses pengayaan. Bahan bakar MOX digunakan sebagai bahan bakar reaktor PWR bersama-sama dengan bahan bakar konvensional uranium oksida pengayaan rendah.



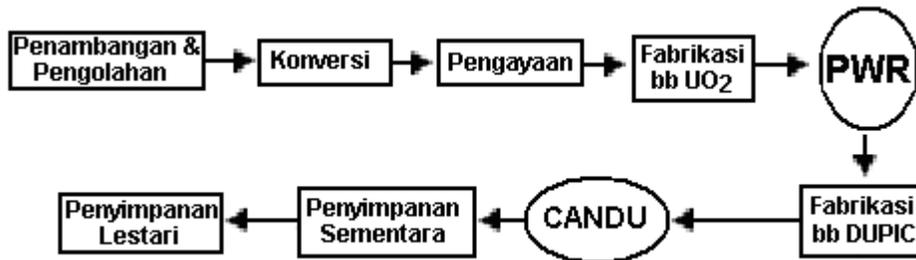
Gambar 2. Opsi Daur PWR-MOX<sup>[3,4,5]</sup>

Gambar 3 adalah daur bahan bakar sekali pakai berbasis reaktor tipe CANDU. Berbeda dengan reaktor PWR, reaktor CANDU dioperasikan dengan bahan bakar tipe uranium dioksida tanpa pengayaan (uranium alam).



Gambar 3. Opsi Daur CANDU-OT<sup>[3,4,5]</sup>

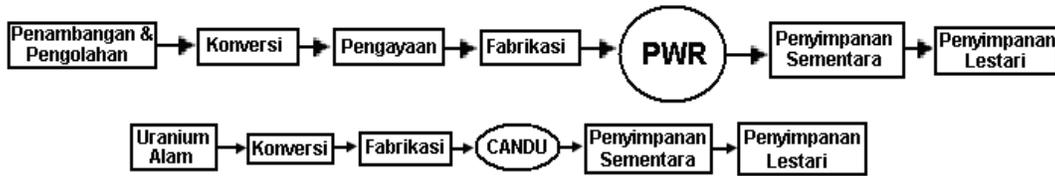
Gambar 4 adalah opsi daur bahan bakar DUPIC (*direct use of PWR spent fuel in CANDU*). Konsep daur DUPIC dikembangkan sejak awal 1990 an. Ide dasarnya adalah memanfaatkan kandungan uranium sisa pada bahan bakar bekas PWR yang kadar U-235 nya masih lebih tinggi daripada uranium alam, tanpa memungut plutonium fisil yang ada dalam bahan bakar bekas. Studi sangat intensif dilakukan di Kanada, Korea Selatan dan Jepang untuk mewujudkan konsep daur DUPIC.



Gambar 4. Opsi Daur DUPIC<sup>[3,4,5]</sup>

Pada Gambar 5 disajikan daur sekali pakai berbasis reaktor PWR dan CANDU yang saling terpisah. Diasumsikan sebuah negara mengoperasikan reaktor PWR dan CANDU,

dengan masing-masing reaktor mempunyai daur sendiri-sendiri. Model ini digunakan sebagai perbandingan dengan konsep daur DUPIC.



Gambar 5. Opsi Daur PWR – CANDU - OT<sup>[3,4,5]</sup>

## 2.2 Karakteristika Reaktor dan Bahan Bakar

Untuk menganalisis aliran bahan bakar pada masing-masing opsi daur, diasumsikan semua opsi daur berbasis pada reaktor PWR dan CANDU yang sama. Untuk keperluan analisis ditentukan PWR dan CANDU dengan masing-masing daya listrik sebesar 950 MWe dan 713 MWe, sebagai basis reaktor yang dioperasikan. Karakteristik masing-masing reaktor dapat dilihat pada Tabel 1. Pada tabel tersebut, jumlah bahan bakar yang dimuatkan per reaktor (*loading per core*) diprediksi menggunakan sejumlah parameter penting, mengikuti rumus.

$$G = \frac{P \times 100}{\varepsilon \times SH} \quad (1)$$

dengan G adalah jumlah pemuatan bahan bakar per teras (MTU), P daya listrik (MWe), SH adalah panas spesifik (MWt/MTHM), dan  $\varepsilon$  efisiensi termal konversi listrik (%).

Tabel 1. Karakteristik Reaktor<sup>[3,4]</sup>

| Parameter Reaktor                        | PWR   | CANDU |
|--|-------|-------|
| Daya listrik, MWe                        | 950   | 713   |
| Daya termal, MWt                         | 2.794 | 2.161 |
| Efisiensi termal, %                      | 34    | 33    |
| Daya spesifik, MWt/tU                    | 40,2  | 25,5  |
| Faktor beban                             | 0,8   | 0,9   |
| Panjang siklus ( <i>full power day</i> ) | 290   | -     |
| Jumlah bundle bahan bakar per teras      | 157   | 4560  |
| Jumlah penggantian bahan bakar, kali     | 3     | -     |
| Pemuatan per teras, MTU                  | 69,5  | 84,7  |

Pada Tabel 2 ditunjukkan kebutuhan bahan bakar untuk masing-masing opsi daur bahan bakar nuklir. Pada tabel tersebut diasumsikan bahwa bahan bakar uranium oksida pengayaan rendah dan bahan bakar MOX untuk PWR mempunyai nilai *burn-up* yang sama sekitar 35.000 MWd/MTU, meskipun pada kenyataannya nilai *burn-up* bahan bakar PWR saat ini biasanya di atas 40.000 MWd/MTU. Nilai *burn-up* sebesar 35000 MWd/MTU diambil untuk menyesuaikan dengan *burn-up* bahan bakar uranium oksida pengayaan rendah untuk PWR yang bahan bakar bekasnya diasumsikan sebagai sumber bahan bakar reaktor CANDU, dalam

opsi daur DUPIC. Kebutuhan bahan bakar tahunan yang terlihat pada Tabel 2 dihitung dengan rumus:

$$G_t = \frac{P \times 365 \times C}{\varepsilon \times BU} \quad (2)$$

dengan  $G_t$  adalah jumlah pemuatan bahan bakar per teras (MTU) per tahun,  $P$  daya listrik (MWe),  $C$  faktor kapasitas,  $\varepsilon$  efisiensi termal konversi listrik (%), dan  $BU$  menyatakan *burn-up* bahan bakar dalam (MWd/MTHM).

**Tabel 2. Karakteristik Reaktor dan Bahan Bakar<sup>[3,4]</sup>**

| Parameter  | Opsidaur |                                  |          |                       |
|--|----------|----------------------------------|----------|-----------------------|
|  | PWR-OT   | PWR-MOX                          | CANDU-OT | CANDU-DUPIC           |
| Reaktor  |          |                                  |          |                       |
| - Pemuatan per teras (MTU)                               | 69,5     | 69,5<br>MOX: 10,22<br>LEU: 59,28 | 84,7     | 84,7                  |
| - Kebutuhan bahan bakar tahunan (MTU)                    | 23,31    | 23,31<br>MOX: 3,43<br>LEU: 19,88 | 94,63    | 46,09                 |
| Bahan bakar  |          |                                  |          |                       |
| - Pengayaan awal   | 3,5%     | MOX: 5%<br>Puf                   | U-alam   | Bahan bakar bekas PWR |
| - Jumlah batang bahan bakar per bundel                   | 264      | LEU: 3,5%<br>264                 | 37       | 43                    |
| - <i>Burn-up</i> (MWD/kgHM)                              | 35       | 35                               | 7,5      | 15,4                  |
| Jumlah bahan bakar untuk produksi listrik 1 GWe-yr (MTU) | 24,54    | 24,54<br>MOX: 3,61<br>LEU: 20,93 | 132,73   | 64,64                 |

### 3. PEMBAHASAN

Dalam studi ini opsi daur dibatasi hanya untuk reaktor PWR dan CANDU dengan pertimbangan 2 jenis reaktor tersebut merupakan reaktor yang saat ini banyak dipakai, dan diprediksi masih akan dipakai pada masa yang akan datang. Dengan karakteristik reaktor dan bahan bakar yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2, sejumlah pemodelan dan simulasi yang dilakukan oleh para peneliti Korea Selatan dan Kanada memberikan hasil perkiraan kebutuhan bahan bakar, volume limbah dan jumlah plutonium yang dihasilkan dari masing-masing opsi daur.

#### 3.1 Kebutuhan Bahan Bakar

Kebutuhan bahan bakar untuk masing-masing opsi daur ditunjukkan pada Tabel 3. Terlihat pada tabel tersebut bahwa kebutuhan bahan bakar untuk opsi daur DUPIC hanya sekitar 17,6 MTHM/GWe-yr, jauh lebih kecil dibandingkan opsi daur yang lain. Sementara kebutuhan bahan bakar untuk opsi daur PWR-OT, CANDU-OT, PWR-MOX, dan PWR-CANDU-OT masing-masing adalah 24,54 MTHM/GWe-yr, 132,73 MTHM/GWe-yr, 24,54 MTHM/GWe-yr

dan 54,1 MTHM/GWe-yr. Rendahnya kebutuhan bahan bakar untuk opsi DUPIC bisa dipahami karena bahan bakar DUPIC sepenuhnya difabrikasi dari bahan bakar bekas reaktor PWR.

**Tabel 3. Kebutuhan Bahan Bakar untuk masing-masing Opsi<sup>[2,4]</sup>**

| Tipe Bahan Bakar | Kebutuhan Bahan Bakar (MTHM/GWe-yr) |         |          |              |       |
|------------------|-------------------------------------|---------|----------|--------------|-------|
|                  | PWR-OT                              | PWR-MOX | CANDU-OT | PWR-CANDU-OT | DUPIC |
| PWR              | 24,54                               | 20,93   | -        | 17,84        | -     |
| CANDU            | -                                   | -       | 132,73   | 36,26        | -     |
| MOX              | -                                   | 3,61    | -        | -            | -     |
| DUPIC            | -                                   | -       | -        | -            | 17,66 |

### 3.2 Volume Limbah

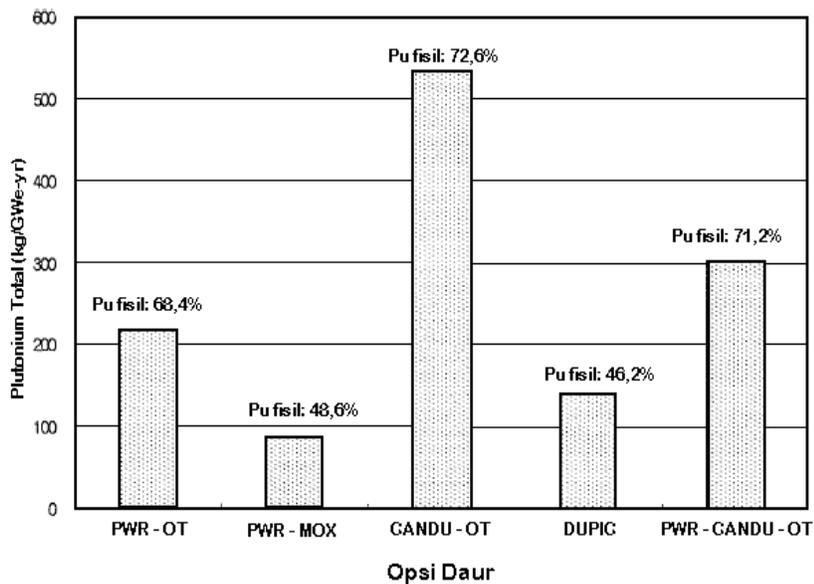
Pada Tabel 4 ditunjukkan volume limbah yang dihasilkan untuk masing-masing opsi daur. Limbah level tinggi dihasilkan hanya dari proses olah ulang bahan bakar bekas, sehingga limbah jenis ini hanya muncul pada opsi daur DUPIC dan PWR-MOX. Pada Tabel 4 terlihat bahwa proses olah ulang OREOX yang berbasis proses kering pada opsi DUPIC hanya menghasilkan limbah level tinggi hanya setengahnya dibanding proses basah konvensional yang digunakan untuk memungut plutonium dan uranium sisa pada opsi PWR-MOX. Volume limbah bahan bakar bekas paling banyak adalah untuk opsi daur CANDU-OT, sedang yang paling sedikit adalah opsi PWR-MOX. Secara umum total volume limbah opsi DUPIC lebih rendah dibanding opsi PWR-OT, CANDU-OT, dan PWR-CANDU-OT, tetapi sedikit lebih banyak jika dibanding opsi PWR-MOX.

**Tabel 4. Volume Limbah yang dihasilkan, m<sup>3</sup>/Gwe-yr<sup>[2,3]</sup>**

| Opsi Daun    |        | Jenis Limbah |           |           |       |     |
|--------------|--------|--------------|-----------|-----------|-------|-----|
|              |        | Tailing      | LLW       | ILW       | HLW   | BBB |
| PWR-OT       | Volume | 52.578       | 434 – 610 | 17 – 49   |       | 37  |
|              | (%)    | 137          | 92 – 102  | 76 – 91   |       | 138 |
| PWR-MOX      | Volume | 36.576       | 466 – 649 | 42 – 94   | 4 – 6 | 5   |
|              | (%)    | 95           | 99 – 108  | 188 – 176 |       | 20  |
| CANDU-OT     | Volume | 40.386       | 534 – 627 | 54 – 85   |       | 200 |
|              | (%)    | 105          | 113 – 105 | 241 – 159 |       | 751 |
| DUPIC        | Volume | 38.354       | 471 – 599 | 22 – 53   | 2     | 27  |
|              | (%)    | 100          | 100 – 100 | 100 – 100 |       | 100 |
| PWR-CANDU-OT | Volume | 49.378       | 453 – 605 | 27 – 58   |       | 81  |
|              | (%)    | 129          | 96 – 101  | 120 – 108 |       | 306 |

### 3.3 Plutonium dalam Bahan Bakar Bekas

Pada Gambar 6 ditunjukkan total plutonium yang dihasilkan dari setiap produksi listrik sebesar 1 GWe-yr. Nampak pada Gambar 6 tersebut bahwa opsi PWR-MOX menghasilkan plutonium yang paling sedikit (88 gPu/GWe-yr), sementara opsi CANDU menghasilkan plutonium yang terbanyak (535 gPu/GWe-yr). Ini berarti bahwa opsi PWR-MOX memberikan keuntungan yang lebih baik, karena aspek konsumsi plutoniumnya yang paling besar. Sedang untuk opsi daur DUPIC, jumlah plutonium yang dihasilkan adalah 141 gPu/GWe-yr, sedikit lebih besar dibanding opsi PWR-MOX. Tetapi jika ditinjau dari jumlah plutonium fisis yang dihasilkan, opsi daur DUPIC paling sedikit dibanding opsi daur yang lain.



Gambar 6. Total plutonium yang dihasilkan dari opsi daur<sup>[3,4,5]</sup>

### 3.4 Perkembangan teknologi daur dan prediksi keekonomian

Secara umum perkembangan teknologi daur bahan bakar nuklir terbagi dalam 3 katagori, yaitu: yang saat ini digunakan, yang segera diimplementasikan dalam waktu kurang dari 25 tahun, dan yang akan diimplementasikan dalam kurun waktu 25-50 tahun. Pada Tabel 5 disajikan jenis-jenis daur bahan bakar nuklir, berdasarkan status implementasinya. Pada studi ini, pembahasan dibatasi pada daur yang saat ini digunakan dan daur DUPIC sebagai alternatif yang segera diimplementasikan.

Tabel 5. Status Daur Bahan Bakar Nuklir<sup>[5]</sup>

|  |
|--|
| Yang digunakan saat ini<br>Daur LWR-OT<br>Daur CANDU-OT<br>Daur PWR-MOX ( <i>monocycling</i> )                             |
| Yang Potensial Komersial < 25 tahun<br>Daur DUPIC<br>Daur HTGR<br>Daur PWR <i>multicycling</i><br>LWR-Pu+MA                |
| Yang Potensial Komersial 25 – 50 tahun<br>Daur <i>Mixed</i> LWR-FR<br>Daur FR 100%<br>Daur Dobel Strata P&T<br>Daur Torium |

Catatan: HTGR: *High Temperature Gas cooled Reactor*, MA: *minor actinide*, FR: *Fast neutron breeder Reactor*, P&T: *Partition and Transmutation*, *monocycling*: daur ulang plutonium, *multicycling*: daur ulang plutonium dan uranium

Terlihat pada Tabel 5, bahwa evolusi teknologi daur bahan bakar nuklir didasari pada kesadaran bahwa uranium bukanlah bahan bakar terbarukan. Tujuan pengembangan teknologi daur, adalah untuk menghemat cadangan uranium agar umur pemanfaatan teknologi nuklir selama mungkin, dan menurunkan laju akumulasi volume limbah. Daur PWR-MOX (*monocycling*) yang sudah digunakan di sejumlah negara maju, merupakan daur ulang terbatas hanya plutonium untuk bahan bakar MOX pada reaktor PWR. Periode berikutnya (25 tahun ke depan), daur ulang juga dilakukan terhadap uranium sisa (*multicycling*) yang masih terkandung dalam bahan bakar bekas, untuk bahan bakar MOX atau DUPIC. Juga dimanfaatkan daur berbasis HTGR yang memungkinkan pemanfaatan torium sebagai bahan bakar. Di samping itu, studi pemanfaatan plutonium dan aktinida minor (Pu+MA) juga dipertimbangkan. Sedang periode 25-50 tahun berikutnya, teknologi reaktor pembiak berbasis neutron cepat diharapkan dapat meningkatkan pemanfaatan bahan bakar nuklir lebih optimal lagi. Pada periode ini, sistem daur gabungan berbasis LWR dan FR, atau dobel strata antara LWR dan sistem P&T berbasis teknologi ADS (*Accelerator Driven System*) juga bertujuan mengoptimalkan pemanfaatan bahan bakar nuklir. Di samping uranium, torium yang kelimpahannya 4 kali lebih banyak daripada uranium, dimanfaatkan sebagai bahan bakar baik pada reaktor pembiak cepat (FR), maupun reaktor HTGR.

Daur DUPIC (Gambar 4) maupun daur PWR-MOX (Gambar 2), secara teknologi dianggap cukup layak untuk diimplementasikan. Tapi kajian ekonomi masih menunjukkan bahwa daur dengan olah ulang masih relatif lebih mahal atau kurang kompetitif dibanding daur sekali pakai. Meskipun begitu, daur dengan olah ulang dianggap cukup menarik karena aplikasi daur ini akan memberi keuntungan dari sisi penghematan cadangan uranium alam dan penurunan limbah bahan bakar bekas dari operasi PLTN. Studi daur DUPIC di Korea Selatan<sup>[6]</sup> menunjukkan bahwa daur DUPIC akan mampu menghemat cadangan uranium alam sebesar 5% jika rasio daya antara PWR dan CANDU sebesar 7. Sedangkan jika rasio daya antara PWR dan Candu sebesar 2, penghematan cadangan uranium bisa mencapai 30%. Penurunan jumlah limbah bahan bakar bekas juga cukup signifikan, yaitu 16% dan 44%, masing-masing untuk rasio daya PWR terhadap CANDU sebesar 7 dan 2. Ini mengindikasikan semakin banyak bahan bakar bekas reaktor PWR yang diproses ulang untuk bahan bakar DUPIC, akan semakin besar penghematan yang diperoleh.

Berdasarkan studi di beberapa negara<sup>[6]</sup>, biaya fabrikasi bahan bakar DUPIC adalah sekitar 430-800 USD/kgHM. Biaya ini sama dengan biaya fabrikasi bahan bakar MOX, atau biaya olah ulang dan *conditioning* bahan bakar bekas. Jika dibandingkan biaya fabrikasi bahan bakar PWR atau CANDU, biaya fabrikasi DUPIC atau MOX sekitar 10 kali lebih mahal. Meskipun begitu, simulasi biaya daur di Korea Selatan menunjukkan bahwa biaya daur DUPIC akan lebih murah atau kompetitif dibanding daur PWR-CANDU-OT (Gambar 5), jika rasio daya LWR dan CANDU semakin kecil<sup>[7]</sup>. Sedang untuk daur ulang plutonium untuk bahan bakar MOX reaktor LWR, studi di Amerika<sup>[8]</sup> memprediksi biaya daur akan sangat kompetitif jika harga uranium alam cukup mahal, yaitu di atas 300 USD/kg.

#### 4. KESIMPULAN

Dari uraian di atas dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk membangkitkan listrik dalam jumlah yang sama opsi daur DUPIC membutuhkan bahan bakar yang paling sedikit dibanding opsi daur yang lain.

2. Opsi daur PWR-MOX menghasilkan total limbah yang paling rendah, tetapi dibanding opsi DUPIC, jenis limbah level tinggi yang dihasilkan 2 kali lebih banyak.
3. Opsi daur PWR-MOX menghasilkan plutonium total paling sedikit dibanding opsi daur yang lain, tetapi untuk plutonium fisil opsi DUPIC adalah yang paling rendah.
4. Meskipun secara ekonomi daur dengan olah ulang belum bisa bersaing, tapi daur ini menarik ditinjau dari sisi penghematan cadangan uranium alam dan penurunan volume limbah bahan bakar bekas.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. OECD/NEA, *The Economics of the Nuclear Fuel Cycle*, Organization for Economic Cooperation and Development/Nuclear Energy Agency, 1994.
- [2]. SULLIVAN, J. D., Ryz, M. A., LEE, J. W., Fabrication of CANDU DUPIC Fuel, IAEA Technical Committee Meeting on Fuel Cycle Options for LWRs and HWRs, Victoria, Canada, April 28 – May 1, 1998.
- [3]. KO, W. I., KIM, H. D., YANG, M. S., Radioactive Waste Arisings from Various Fuel Cycle Options, *Journal of Nuclear Science and Technology*, Vol. 39, No. 2, Feb. 2002.
- [4]. 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.
- [5]. ALLAN, C. J., BAUMGARTNER, P., Back-end of the Nuclear Fuel Cycle: A Comparison of the Direct Disposal and Reprocessing Options, *Proceeding of the 10<sup>th</sup> Pacific Basin Nuclear Conference*, Kobe, Japan, 20-25 Oct., 1996.
- [6]. OECD/NEA, *Trends in the Nuclear Fuel Cycle: Economic, Environmental and Social Aspects*, OECD Publ., Paris 2001.
- [7]. YANG, M. S., et.al., The Status and Prospect of DUPIC Fuel Technology, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 8, No. 4, June 2006.
- [8]. -----, *The Economic of Reprocessing vs. Direct Disposal of spent nuclear Fuel*, Belfer Center for Science & International Affairs, Harvard University, 2003.  
<http://belfercenter.ksg.harvard.edu/publication/2089/>