

KEBUTUHAN BAHAN BAKAR PADA BEBERAPA JENIS DAUR BAHAN BAKAR

Sudjatmi K. Alfa

Pusat Teknologi Nuklir Bahan dan Radiometri, BATAN, Jl. Tamansari 71, Bandung, 40132

ABSTRAK

KEBUTUHAN BAHAN BAKAR PADA BEBERAPA JENIS DAUR BAHAN BAKAR. Telah dilakukan pengkajian tentang kebutuhan uranium pada daur bahan bakar PWR-sekali-pakai, PHWR-CANDU-sekali-pakai dan DUPIC. Hasil pengkajian menunjukkan bahwa PHWR-CANDU membutuhkan uranium paling sedikit, yaitu hanya 176 ton U_3O_8 untuk membangkitkan energi 1GW-tahun. PWR dan DUPIC membutuhkan uranium yang lebih banyak. Pada daur bahan bakar PHWR-CANDU cadangan uranium di Kalimantan Barat dapat dipakai untuk membangkitkan energi sebesar 161 GW-tahun.

Kata kunci: daur bahan bakar, PWR, PHWR, CANDU, DUPIC

ABSTRACT

URANIUM CONSUMPTION IN VARIOUS FUEL CYCLES OPTION. Uranium consumption for PWR- once-through, PHWR-CANDU-once-through and for DUPIC fuel cycles has been studied. The results show that uranium requirement in the PHWR-CANDU is minimum, that is only 176 ton U_3O_8 to generate 1GW-year energy. PWR and DUPIC use more uranium. In the PHWR-CANDU fuel cycle uranium deposit in West Kalimantan can generate 161 GW-year energy.

Key words: fuel cycle, PWR, PHWR, CANDU, DUPIC

1. PENDAHULUAN

Persediaan uranium sebagai bahan bakar nuklir di Indonesia tidaklah terlalu banyak. Data Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral menunjukkan bahwa sumber daya uranium di Kalimantan Barat (satu-satunya sumber uranium Indonesia yang dicatat) hanyalah sekitar 24.112 ton [1]. Agar sumber daya yang terbatas ini dapat digunakan seefisien mungkin, maka perlu dilakukan pengkajian jenis daur bahan bakar yang akan digunakan dalam pembangunan PLTN.

Telah diketahui bahwa kebutuhan bahan bakar nuklir pada pengoperasian reaktor daya (PLTN) sangat tergantung pada jenis daur bahan bakar. Pada saat ini, ada beberapa jenis daur bahan bakar yang umum dilakukan orang, daur bahan bakar sekali pakai PWR, daur sekali

pakai PHWR-CANDU, daur ulang bahan bakar MOX dan daur ulang bahan bakar DUPIC [2]. Strategi daur ulang ini terutama ditentukan oleh jenis reaktor daya yang dipakai, apakah LWR atau PHWR- CANDU. Dengan demikian pemilihan opsi daur ulang ini harus menjadi salah satu pertimbangan dalam menentukan jenis reaktor daya yang akan dioperasikan di Indonesia.

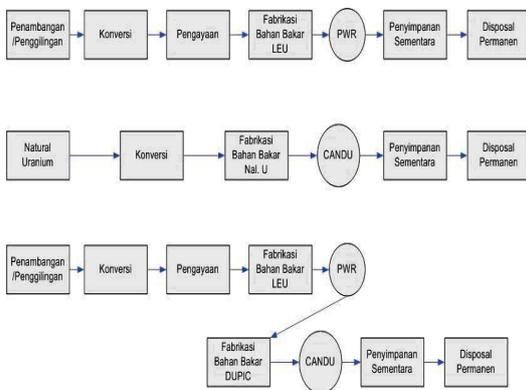
2. MODEL-MODEL DAUR BAHAN BAKAR

Jenis-jenis daur bahan bakar yang diperhatikan dalam kajian ini ditunjukkan dalam Gambar 1.

Gambar pertama menunjukkan daur pada PWR sekali pakai. Dalam daur ini, uranium

alam harus diperkaya menjadi sekitar 3-4 % sebelum difabrikasi menjadi bahan bakar. Setelah dipakai, bahan bakar bekas langsung disimpan dalam penyimpanan sementara (TPS, *interim storage*), sebelum dibuang ke tempat pembuangan akhir (TPA, *final disposal*). Kandungan uranium dalam bahan bakar bekas ini relatif masih tinggi, lebih tinggi dari pada kandungan uranium alam. Selain itu masih ada bahan fisil plutonium yang sebenarnya masih bisa dimanfaatkan.

Daur ulang sekali pakai reaktor PHWR-CANDU ditunjukkan pada gambar kedua. Dalam daur ini, uranium alam langsung dipakai dalam reaktor, tidak perlu diperkaya lebih dulu. Bahan bakar bekas, sama seperti daur sekali pakai LWR, langsung ditempatkan ke tempat penyimpanan sementara. Bahan fisil uranium dalam bahan bakar bekas relatif sedikit, tetapi kandungan plutonium fisil relatif tinggi. Daur ulang ketiga adalah daur ulang DUPIC (gambar ke 3). Daur ulang ini merupakan kombinasi dari daur pertama dan kedua. Dalam daur ulang ini bahan bakar bekas dari PWR sesudah disimpan dalam TPS kemudian dimanfaatkan kembali dalam reaktor PHWR-CANDU. Sesudah digunakan dalam reaktor CANDU bahan bakar ini kemudian ditempatkan dalam TPS dan kemudian ke TPA.



Gambar 1. Jenis-jenis daur bahan bakar dan aliran massanya

3. REAKTOR DAN BAHAN BAKAR ACUAN

Untuk menghitung aliran bahan dari tiap daur, maka kita harus membuat reaktor acuan dan menentukan sifat-sifat bahan bakarnya.

Tabel 1. Reaktor acuan

Parameter Reaktor	PWR	PHWR dengan Uranium alam	PHWR dengan bahan bakar DUPIC
Daya listrik (MWe)	1000	1000	1000
Efisiensi Termal (%)	34	33	33
Pengayaan BB (%)	3,5%	0,711%	0,795% ²³⁵ U 0,878% Pu
Burnup keluar (MWd/kg HM)	35	7,5	15

Sifat-sifat reaktor dalam kolom 2 dan kolom 3 diambil secara sembarang dengan melihat data reaktor yang sekarang umum beroperasi. Untuk PHWR dengan bahan bakar DUPIC (kolom 4), kandungan bahan fisil tergantung dari pemakaian dalam reaktor PWR. Kandungan ini dihitung dengan modul komputer ORIGEN-S [3]. Dengan data PWR seperti dalam kolom 1 dan peluruhan selama 10 tahun, maka kandungan ²³⁵U dan Pu dalam bahan bakar bekas PWR adalah masing-masing 0,795% dan 0,878%. Dengan memperhatikan pengayaan dan burnup PWR dan PHWR, maka masuk akal jika kita mengandaikan bahwa burnup yang ke luar dari PHWR dengan bahan bakar DUPIC adalah 15 MWd/kg-HM.

4. ANALISIS ALIRAN BAHAN BAKAR

4.1. Analisis Aliran Bahan Bakar

Untuk reaktor PWR aliran bahan nuklir mulai dari penambangan sampai pemakaian dalam reaktor dapat digambarkan seperti dalam Gambar 2.

Daya termis yang dihasilkan dihitung dengan persamaan

$$P_{th} = \frac{P_e}{\varepsilon}$$

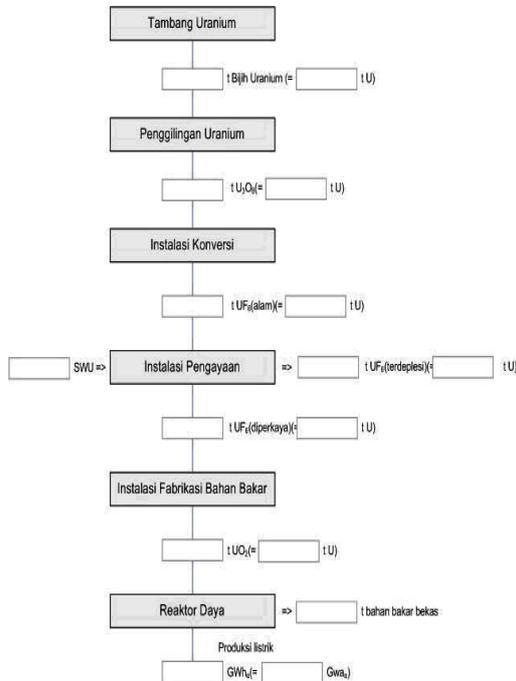
dimana :

P_e = daya listrik

ε = efisiensi termis

Kebutuhan bahan bakar U untuk menghasilkan daya termis sebesar P_{th} selama 1 tahun dihitung dengan :

$$M_{bb} = \frac{P_{th} \times 365,25}{BU} \frac{MWD}{MWD/ton}$$



Gambar 2. Aliran bahan nuklir

Kebutuhan UO_2 dihitung dengan

$$M_{UO_2} = \frac{238 + 2 \times 16}{238} \times M_{bb}$$

Kehilangan dalam fabrikasi bahan bakar dianggap 1 %. Jumlah SWU (*Separative Work Unit*) yang diperlukan untuk memperkaya ^{235}U dihitung dengan

$$SWU = M_p V_p + M_t V_t - M_f V_f$$

dengan M_p = massa uranium diperkaya yang diperlukan untuk bahan bakar reaktor
 = massa produk dari instalasi pengayaan
 M_t = massa uranium buntut (*tail*) terdepleksi dari instalasi pengayaan
 M_f = massa uranium yang harus diumpankan ke instalasi pengayaan

$$\text{Sedang : } V_x = (2e_x - 1) \ln \frac{e_x}{(1 - e_x)}$$

dengan x = subskript pengganti untuk f, p atau t.
 e_x = fraksi ^{235}U dalam uranium produk (misalnya : 0,035)
 e_t = fraksi ^{235}U dalam uranium buntut (misalnya : 0,0025)
 e_f = fraksi ^{235}U dalam uranium umpan atau sama dengan uranium alam (misalnya : 0,00711)

Selanjutnya jika massa bahan bakar uranium yang dibutuhkan (M_p) diketahui, maka massa uranium yang perlu diumpankan ke dalam instalasi pengayaan dapat dihitung dengan persamaan :

$$M_t = M_p \frac{(e_p - e_t)}{(e_f - e_t)}$$

sedangkan massa uranium terdepleksi yang keluar dari instalasi pengayaan adalah :

$$M_t = M_f - M_p$$

Secara ringkas kebutuhan sumber daya alam uranium U_3O_8 adalah :

$$M_{U_3O_8} = M_R \frac{(e_p - e_t)}{(e_f - e_t)} (1 + \ell_2) \frac{W_{U_3O_8}}{W_{U_3}} (1 + \ell_1)$$

dengan :

M_R = massa U yang dimasukkan ke dalam reaktor

W = berat molekul

$$\frac{W_{U_3O_8}}{W_{U_3}} = \frac{3 \times 238 + 8 \times 16}{3 \times 238}$$

dengan ℓ_1 dan ℓ_2 masing-masing adalah kehilangan dalam proses fabrikasi bahan bakar dalam konversi U_3O_8 menjadi UF_6 dan UF_6 menjadi UO_2 . ℓ_1 dan ℓ_2 masing-masing dimisalkan 1% dan 0,5%.

Persamaan-persamaan yang dituliskan di atas digunakan untuk menghitung kebutuhan bahan bakar pada PWR atau PHWR – CANDU

agar dapat menghasilkan listrik sebesar 1000 MW selama 1 tahun.

Pada daur DUPIC kita menggunakan dua reaktor PWR dan PHWR. Kita perlu menghitung proporsi masing-masing reaktor (PWR dan PHWR) dalam menghasilkan jumlah energi yang sama.

Kita andaikan bahwa dalam daur ini, seluruh bahan bakar bekas dari PWR harus dapat digunakan dalam PHWR. Maka proporsi pembangkit daya oleh PWR dapat dihitung dengan:

$$E_{PWR} = \frac{R_c}{R_c + 1}$$

$$\text{dengan : } R_c = \frac{M_{DUPIC} \times (1 + L_{DUPIC})}{M_{PWR}}$$

- M_{DUPIC} = kebutuhan bahan bakar dalam daur DUPIC
 M_{PWR} = kebutuhan bahan bakar dalam daur sekali pakai pada PWR
 L_{DUPIC} = kehilangan bahan dalam fabrikasi bahan bakar DUPIC
 = dianggap 1%

Aliran massa untuk ketiga opsi daur bahan bakar di atas ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Arus bahan dalam berbagai daur bahan bakar

	PWR sekali pakai	PHWR sekali pakai	PHWR dengan bahan bakar DUPIC	Siklus DUPIC
U_3O_8 (ton)	286,783 U_3O_8	175,785 U_3O_8	0	203,043 U_3O_8
Input ke konversi (ton)	243,18 U	-	-	172,172
Input ke pengayaan (ton)	241,970 U 357,872 UF_6	-	-	171,315
Pengayaan (ton U)	134,702	-	-	95,369
Input ke fabrikasi (ton)	31,002 U	149,062 U	-	21,949
Input ke reaktor (ton)	30,591 U 34,819 UO_2	147,572 U 167,413 UO_2	73,788 HM	21,730 HM (PWR) 21,546 HM (PHWR)

Kolom ke 3 menyatakan kebutuhan bahan

bakar untuk reaktor PHWR yang diisi dengan bahan bakar DUPIC untuk menghasilkan energi 1000 MW-tahun. Angka ini bisa digunakan untuk menghitung kolom 4, yaitu kebutuhan bahan bakar dalam suatu daur bahan bakar DUPIC dengan kriteria seperti yang tercantum dalam bagian sebelumnya yaitu seluruh bahan bakar bekas PWR digunakan dan energi total yang dibangkitkan (oleh PWR dan PHWR) adalah 1000 MW-tahun.

Mula-mula dihitung :

$$R_c = \frac{M_{DUPIC} \times (1 + L_{DUPIC})}{M_{PWR}} = \frac{73,788(1 + 0,01)}{30,692} = 2,43$$

Selanjutnya jumlah energi yang dibangkitkan oleh PWR adalah :

$$E_{PWR} = \frac{R_c}{R_c + 1} = \frac{2,43}{2,43 + 1} = 0,708$$

Jumlah energi yang dibangkitkan oleh PWR dan PHWR masing-masing adalah 70,8 % dan 29,2 %. Dengan proporsi seperti ini, maka kebutuhan bahan bakar untuk 1 GWe-tahun adalah :

$$= E_{PWR} \times M_{PWR} + E_{PHWR} \times M_{PHWR} = 0,708 \times 30,692 + 0,292 \times 73,788 = 21,739 \text{ (untuk PWR)} + 21,546 \text{ (untuk PHWR)} = 43,276 \text{ ton HM}$$

Dari jumlah ini hanya bagian PWR (21,730 ton) yang memakan sumber daya alam U_3O_8 seperti tertera dalam kolom 4.

Selanjutnya dengan menggunakan data Tabel 2 kita hitung waktu pakai uranium alam.

Tabel 3. Waktu pakai U alam untuk membangkitkan 1 GWe

	PWR sekali pakai	PHWR sekali pakai	Siklus DUPIC
Kebutuhan U (ton)	243,186	149,062	172,177
Waktu pakai U alam (tahun)	99	161	140

5. KESIMPULAN

Dari Tabel 2 terlihat bahwa PHWR-sekali-pakai, menghabiskan paling sedikit bahan bakar yaitu hanya sebesar 176 ton U_3O_8 untuk membangkitkan energi sebesar 1 GWe-tahun.

Kebutuhan U ini lebih kecil dari kebutuhan pada siklus DUPIC yang membutuhkan 203 ton U_3O_8 untuk menghasilkan jumlah energi yang sama. Kebutuhan yang paling besar adalah pada daur PWR-sekali-pakai yang menghabiskan 287 ton.

Tabel 3 menunjukkan bahwa U di Kalau dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik sebesar 161 GWe-tahun pada siklus PHWR sekali-pakai tetapi hanya 99 GWe-tahun jika digunakan pada siklus PWR.

7. DISKUSI

Putranto Ilham Y. – PTNBR BATAN :

1. Salah satu tujuan daur bahan bakar DUPIC adalah efisiensi penggunaan bahan bakar. Akan tetapi, dari perhitungan saudara terlihat justru daur ini membutuhkan bahan bakar lebih banyak dibanding dengan daur PHWR - sekali pakai. Mengapa hal ini bisa terjadi ?
2. Apa keuntungan lain siklus DUPIC ?

Sudjatmi :

1. Hal ini bisa terjadi karena untuk penggunaan bahan bakar PWR diperlukan pengkayaan 3 – 4 %, sebelum sisanya dipergunakan sebagai bahan bakar PHWR. Sedangkan pada PHWR – sekali pakai bahan bakar yang dipergunakan adalah bahan bakar yang berasal dari alam tanpa pengkayaan.
2. Keuntungan siklus DUPIC yaitu pemanfaatan elemen bakar bekas / uranium sisa, karena bahan bakar bekas PWR masih mengandung uranium > uranium alam, dan juga mengandung plutonium. Tetapi bila dibandingkan dengan PHWR – sekali pakai, maka PHWR - sekali pakai lebih menguntungkan daripada siklus DUPIC.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. **DEPARTEMEN ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL**, Blueprint Pengelolaan Energi Nasional, Jakarta, 2005.
2. **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, p200-210, Feb 2002.
3. **HERMANN OW, WESTFALL RM**, ORIGEN-S : SCALE System Module to Calculate Fuel Depletion, Actinide Transmutation, Fission Product Buildup and Decay and Associated Radiation Source Terms, ORNL, Oak Ridge, 1995.