



PERBANDINGAN ONGKOS BAHAN BAKAR PLTN YANG DIAJUKAN PEMASOK

Bambang Herutomo, Ratih Langenati
Pusat Elemen Bakar Nuklir

ABSTRAK

PERBANDINGAN ONGKOS BAHAN BAKAR PLTN YANG DIAJUKAN PEMASOK. Studi banding tentang ongkos bahan bakar PLTN yang diajukan Pemasok untuk Studi Kelayakan PLTN Pertama di Indonesia telah dilakukan. Ongkos bahan bakar dihitung berdasarkan atas metode *levelized cost - constant money* untuk satu catu bahan bakar dalam kondisi teras seimbang, baik untuk daur terbuka maupun tertutup. Studi sensitivitas juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari perubahan parameter ekonomi yang dominan terhadap ongkos bahan bakar. Hasil studi secara umum menunjukkan bahwa : (a) ongkos bahan bakar Reaktor Air Berat yang diajukan oleh AECL (PHWR dan CANDU3) lebih rendah 6 - 43% dibanding Reaktor Air Ringan yang diajukan oleh MHI/WH, NPI, WH dan GE; (b) di antara Reaktor Air Ringan, SBWR dan ABWR-1000 yang diajukan oleh GE memiliki ongkos bahan bakar 15 - 30% lebih tinggi dibanding PWR yang diajukan oleh MHI/WH, NPI dan WH; (c) PWR yang diajukan oleh NPI (Siemens dan Framatome) memiliki ongkos lebih rendah 6 - 9% dibanding PWR yang diajukan oleh MHI/WH dan WH; (d) untuk Reaktor Air Ringan, ongkos bahan bakar daur tertutup lebih tinggi 4 - 6% dibanding daur terbuka; dan (e) ongkos bahan bakar Reaktor Air Ringan lebih sensitif terhadap perubahan laju diskon dibanding dengan Reaktor Air Berat.

ABSTRACT

THE COMPARATIVE STUDY OF FUEL COST OF THE NPPs PROPOSED BY VENDORS. The comparative study on fuel cost of the NPPs proposed by Vendors in the Feasibility Study of the first NPPs in Indonesia has been performed. The fuel cost is calculated based on the levelized cost - constant money method for single fuel batch at equilibrium core condition. The sensitivity study has also been performed in order to check the effects of the dominant economic parameters on fuel cost changing. For open cycle as well as closed cycle the study results generally show that: (a) the fuel cost of the Heavy Water Reactor proposed by AECL (PHWR and CANDU3) is 6 - 43% lower compared with that of the Light Water Reactor proposed by MHI/WH, NPI, WH and GE; (b) among the Light Water Reactors, SBWR and ABWR-1000 proposed by GE have a fuel cost of 15 - 30% higher than that of PWR proposed by MHI/WH, NPI and WH; (c) PWR proposed by NPI (Siemens and Framatome) has a fuel cost of 6 - 9% lower than that of PWR proposed by MHI/WH and WH; (d) for the Light Water Reactor, the fuel cost for the closed cycle is 4 - 6% higher compared with that of the open cycle; and (e) fuel cost of the Light Water Reactor is more sensitive to discount rate change compared with that of the Heavy Water Reactor.

PENDAHULUAN

Evaluasi ekonomik daur bahan bakar nuklir telah umum digunakan sebagai salah satu parameter kelayakan untuk memilih suatu PLTN yang akan dibangun atau untuk memilih dari berbagai strategi manajemen bahan bakar di dalam teras dari suatu PLTN yang telah beroperasi. Meskipun ongkos bahan bakar hanya memiliki porsi sekitar 10 - 30% dari ongkos total pembangkitan, memilih suatu PLTN atau strategi manajemen teras yang rendah ongkos bahan bakarnya akan banyak memberikan keuntungan dalam pengoperasian PLTN itu sendiri.

Tidak seperti ongkos bahan bakar fosil, ongkos bahan bakar nuklir tidak terpaku pada satu variabel saja seperti harga *dollar per barrel* minyak. Ongkos bahan bakar nuklir meliputi ongkos mulai dari pembelian U-alam sampai dengan disposal akhir dari elemen bakar bekas yang masing-masing servis berbeda waktunya dan bisa memerlukan waktu sampai puluhan tahun. Oleh karena itu, untuk menghitung ongkos bahan bakar nuklir diperlukan suatu pengertian dan batasan yang jelas tentang hubungan antara investasi dan waktu. Selain itu, ongkos bahan bakar nuklir tidak murni proporsional dengan energi listrik yang dihasilkan dan juga tidak dapat

secara sederhana diuraikan dalam bentuk pengeluaran tahunan.

Pada prinsipnya, ongkos bahan bakar nuklir terdiri dari ongkos langsung (*direct cost*) dan ongkos bawaan (*carrying charges*). Yang termasuk ongkos langsung adalah ongkos untuk pembelian U-alam, ongkos konversi, ongkos pengayaan untuk reaktor air ringan, ongkos fabrikasi elemen bakar, ongkos penyimpanan sementara dan disposal bahan bakar bekas untuk daur terbuka, ongkos transportasi bahan bakar bekas dan olah ulang serta disposal limbahnya untuk daur tertutup, kredit uranium dan plutonium dari hasil proses olah ulang. Sedangkan yang termasuk ongkos bawaan seperti nilai uang (*return on equity and interest on debt*), pajak dan asuransi.

Makalah ini menyajikan hasil studi banding tentang ongkos bahan bakar dari berbagai jenis PLTN yang diajukan oleh para Pemasok untuk Studi Kelayakan PLTN Pertama di Indonesia. Dalam hal ini, perhitungan ongkos bahan bakar terlevelisasi yang dilakukan hanya untuk kondisi teras siklus seimbang sesuai dengan data skema bahan bakar yang dikirim oleh para Pemasok.

Perlu diketahui pula bahwa semua justifikasi dan hasil-hasil yang disajikan dalam makalah ini adalah tinjauan personal penulis dan bukan bagian dari kegiatan dan lingkup Studi Kelayakan yang telah dilakukan oleh BATAN.

METODA PERHITUNGAN

Ongkos total bahan bakar suatu PLTN adalah hasil dari penjumlahan masing-masing ongkos komponennya. Karena masing-masing komponen diadakan dan dibayar pada waktu yang berbeda, representasi yang akurat dari ongkos bahan bakar memerlukan pendiskonan terhadap berbagai pembayaran ke titik waktu yang sama, misalnya ke waktu pada saat PLTN mulai memproduksi energi listrik secara komersial. Selain itu, energi yang dihasilkan oleh bahan bakar juga terdistribusi dalam perioda waktu tertentu setelah bahan bakar tersebut dimasukkan ke dalam teras reaktor. Oleh karena itu pendapatan yang diperoleh dari penjualan energi yang dihasilkan juga harus didiskon ke waktu yang sama untuk menentukan ongkos

bahan bakar ter-levelisasi (konstan, seragam dan rata-rata) persatuan energi yang dibangkitkan. Teknik perhitungan ini secara luas dikenal sebagai metode *Levelized Cost - Constant Moeny*.^[1,6]

Data dasar yang diperlukan dalam perhitungan ongkos bahan bakar antara lain adalah data umum PLTN, data skema bahan bakar, ongkos untuk masing-masing servis daur bahan bakar, *lead and lag time*, kredit U dan Pu, serta *base date* perhitungan yang biasanya dipilih pada saat PLTN mulai komisioning untuk operasi komersial.

Dalam makalah ini, ongkos bahan bakar dari berbagai jenis PLTN yang diajukan oleh para Pemasok akan dihitung menggunakan metoda yang telah diuraikan di atas. Akan tetapi, perhitungan hanya dilakukan untuk kondisi siklus teras seimbang saja. Hal ini dikarenakan minimnya informasi tentang data skema bahan bakar yang dikirim oleh para Pemasok melalui dokumen jawaban atas *Preliminary Inquiry* yang dikirim oleh BATAN.^[2,4] Di dalam dokumen jawaban tersebut, para Pemasok hanya memberikan data skema bahan bakar untuk siklus seimbang saja dan itupun hanya berupa jumlah bahan bakar isi ulang yang diperlukan, tingkat pengayaan U-235 dan disain derajat bakarnya. Sedangkan data skema bahan bakar untuk teras transisi dan kondisi bahan bakar bekas seperti deplesi U-235 dan jumlah Pu yang terbentuk tidak disertakan. Oleh karena itu, kondisi teras transisi akan diabaikan dalam perhitungan ini, dan untuk menentukan jumlah deplesi U-235 dan Pu yang terbentuk akan diestimasi berdasarkan derajat bakar yang dicapai oleh bahan bakar.^[3]

Seperti diketahui bahwa setiap satu bahan bakar yang diisikan ulang ke dalam teras pada siklus seimbang akan membangkitkan energi yang sama. Dalam hal ini, yang dimaksud dengan satu bahan bakar adalah sejumlah bahan bakar yang dimasukkan ke dalam teras pada saat yang sama dan setelah mencapai derajat bakar yang ditentukan kemudian dikeluarkan dari teras secara bersama-sama pula. Oleh karena sifatnya yang berulang dan identik baik mengenai jumlah, tingkat pengayaan serta derajat bakarnya maka tinjauan satu satu bahan bakar dianggap cukup

representatif untuk menghitung ongkos total bahan bakar pada siklus seimbang. Ongkos bahan bakar terlevelisasi (\$ mills/kWjam) untuk satu daur bahan bakar pada siklus seimbang dapat dirumuskan secara sederhana, yaitu ^[1,5,6]:

$$L_c = \frac{[\sum_i X_i (1+d)^{Td_i} + \sum_j Y_j (1+d)^{-Tr+Tg_j}]}{[E(1-e^{-\ln(1+d)Tr})/\ln(1+d)^{Tr}]} \quad (3)$$

Dalam hal ini, L_c adalah ongkos bahan bakar terlevelisasi (mills/kWjam), X_i adalah ongkos komponen ke- i ujung depan daur, Y_j adalah ongkos komponen ke- j ujung belakang daur, Tr adalah waktu tinggal efektif satu bahan bakar di dalam teras, Td_i adalah *lead time* komponen ke- i ujung depan daur, Tg_j adalah *lag time* komponen ke- j ujung belakang daur, d adalah laju diskon, dan E adalah energi listrik yang dibangkitkan.

DATA DASAR

• Laju Diskon

Untuk keperluan pendiskonan terhadap masing-masing ongkos, dalam perhitungan yang dilakukan, laju diskon ditetapkan sebesar 10 % per tahun dengan pertimbangan bahwa laju diskon sebesar ini telah umum digunakan oleh negara-negara berkembang.^[2] Untuk mengetahui pengaruh laju diskon terhadap ongkos bahan bakar, laju diskon sebesar 5 % per tahun dan 15 % per tahun akan digunakan dalam studi sensitivitas. Sebagai dasar mata uang yang digunakan adalah *dollar* Amerika Serikat dengan pertimbangan bahwa mata uang ini secara umum digunakan di dalam dunia perdagangan internasional. Selain itu juga untuk menghindari kerancuan nilai tukar *dollar* ke rupiah yang setiap saat berubah. Untuk mempermudah perhitungan, pengeluaran karena pajak dan asuransi diabaikan.

• Data Reaktor dan Skema Bahan Bakar

Data reaktor dan skema bahan bakar untuk masing-masing PLTN yang diajukan oleh Pemasok dapat dilihat pada Tabel 1 untuk kelas 600 MWe dan Tabel 2 untuk kelas 900 - 1000 MWe.^[4] Pemasok yang dimaksud adalah konsorsium *Mitsubishi Heavy Industries* dan *Westinghouse* (MHI/WH), *Westinghouse* (WH), *Nuclear*

Power International (NPI) - *Siemens* dan *Framatome*, *General Electric* (GE), dan *Atomic Energy Canada Limited* (AECL). PLTN yang diajukan meliputi PWR, AP600, SBWR dan ABWR-1000, PHWR dan CANDU3.

• Harga Satuan dan Kehilangan Material Selama Proses

Harga satuan untuk masing-masing jasa daur bahan bakar serta prosentase material yang hilang dalam proses dapat dilihat pada Tabel 3. Harga-harga yang disajikan di dalam Tabel 3 tersebut adalah sama dengan harga yang disarankan NEWJEC dalam Studi Kelayakan PLTN Pertama di Indonesia^[2,3] kecuali untuk harga U-alam yang diambil dari acuan 6. Harga-harga tersebut ditetapkan untuk nilai dollar pada 1 Januari 1992.

• Tail Assay Proses Pengayaan

Dalam perhitungan ini, *tail assay* (kandungan U-235 dalam uranium deplesi) proses pengayaan diasumsikan sebesar 0,25% seperti yang digunakan dalam acuan 1 dan 2.

• Kredit Uranium dan Plutonium

Seperti diketahui bahwa uranium dan plutonium hasil olah ulang dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor air ringan. Nilai uranium dan plutonium hasil olah ulang umumnya dianggap sebagai kredit yang mengurangi kebutuhan akan U-alam, ongkos konversi dan ongkos pengayaan. Karena mengandung inti-inti U-236 yang merupakan penyerap neutron thermal, kredit uranium hasil olah ulang diasumsikan sebesar 80% dari nilai material dan SWU yang dikandungnya. Sedangkan kredit plutonium diasumsikan sebesar \$15/g Pu fissil sesuai dengan harga yang digunakan dalam acuan 1.

• Lead / Lag Time

Data *lead / lag time* yang digunakan dalam perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.^[3] Untuk daur terbuka, *lag time* penyimpanan sementara elemen bakar bekas ditetapkan sesuai dengan kapasitas penyimpan di area reaktor.^[4] Sedangkan untuk daur tertutup, *lag time* untuk proses olah ulang bahan bakar bekas diambil 20 tahun dengan asumsi bahwa proses olah ulang

baru lebih berperan setelah tahun 2010 mengingat estimasi kondisi pasar U-alam, yaitu permintaan akan lebih besar dari pasokan dan harga U-alam diprediksi naik. Untuk studi sensitivitas, *lag time* untuk proses olah ulang diasumsikan 5 tahun berdasarkan kondisi umum yang berlaku saat ini.

- **Studi Sensitivitas**

Suatu studi sensitivitas juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan masing-masing parameter ekonomi yang dominan seperti harga U-alam, ongkos pengayaan, ongkos fabrikasi, laju diskon, dll. terhadap ongkos bahan bakar. Pada Tabel 4 dapat dilihat parameter dan nilainya yang digunakan dalam studi sensitivitas.

HASIL DAN BAHASAN

Ongkos bahan bakar siklus seimbang untuk masing-masing PLTN yang diajukan oleh para Pemasok telah dihitung menggunakan metoda dan data dasar yang telah dibahas di atas. Untuk problema referensi, hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 5, Tabel 6, Tabel 7 dan Tabel 8. Sedangkan untuk studi sensitivitas, hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 9 dan Table 10.

Dari hasil perhitungan referensi terlihat bahwa PLTN jenis Reaktor Air Berat (PHWR, CANDU3) yang diajukan oleh AECL memiliki ongkos bahan bakar terendah, yaitu dalam kisaran 6 - 43% lebih rendah dibanding PLTN jenis Reaktor Air Ringan (PWR dan BWR). Rendahnya ongkos bahan bakar tersebut terutama disebabkan pada PLTN jenis Reaktor Air Berat menggunakan U-alam sebagai bahan bakarnya sehingga tidak diperlukan proses pengayaan U-235. Selain itu, disain elemen bakarnya juga lebih sederhana dibandingkan dengan elemen bakar untuk PLTN jenis Reaktor Air Ringan sehingga ongkos fabrikasinya juga lebih rendah. Akan tetapi, apabila ditinjau ongkos ujung belakang daur, prosentase terhadap ongkos total bahan bakar cukup tinggi, yaitu sekitar 17%. Sedangkan untuk PLTN jenis Reaktor Air Ringan dengan strategi daur terbuka, prosentase ongkos ujung belakang daur terhadap ongkos total bahan bakar kurang dari 4%. Berdasarkan hal tersebut,

secara umum dapat dikatakan bahwa ongkos bahan bakar PLTN jenis Reaktor Air Berat lebih sensitif terhadap perubahan parameter ekonomik ujung belakang daur dibanding dengan PLTN jenis Reaktor Air Ringan.

Di antara PLTN jenis Reaktor Air Ringan, BWR yang diajukan oleh GE memiliki ongkos bahan bakar tertinggi, yaitu lebih tinggi 15 - 30% dibanding PWR. Hal ini terutama disebabkan oleh tingginya inventori bahan bakar di dalam teras (sekitar 1,5 kali inventori bahan bakar di PWR) dan rendahnya derajat bakar yang dicapai oleh bahan bakarnya. Sedangkan di antara PWR, PLTN yang diajukan oleh NPI Siemens untuk kelas 600 MWe dan NPI Framatome untuk kelas 900 - 1000 MWe memiliki ongkos bahan bakar lebih rendah di-banding dengan PLTN yang diajukan oleh MHI/WH maupun WH. Kondisi ini terutama diakibatkan oleh derajat bakar yang dicapai oleh bahan bakar PLTN yang diajukan oleh NPI lebih tinggi sekitar 10 - 13% dibanding dengan derajat bakar bahan bakar PLTN yang diajukan oleh MHI/WH maupun WH.

Untuk PLTN jenis Reaktor Air Ringan dengan strategi daur tertutup, ongkos bahan bakarnya lebih tinggi 4 - 6% dibanding dengan daur terbuka. Hal ini disebabkan oleh masih mahalnya ongkos untuk proses olah ulang bahan bakar bekas. Apabila ongkos olah ulang dapat diturunkan menjadi sekitar \$750/kgHM maka daur tertutup akan dapat bersaing dengan daur terbuka seperti yang ditunjukkan dalam studi sensitivitas. Berkaitan dengan masalah ini, banyak kalangan industri nuklir khususnya di Eropa yang optimis bahwa ongkos olah ulang akan turun di masa mendatang mengingat adanya usaha-usaha untuk membangun fasilitas olah ulang berkapasitas lebih besar sehingga ekonomis. Selain itu, dengan parameter ekonomik yang sama, menunda/ meperpanjang *lag time* proses olah ulang akan menurunkan ongkos bahan bakar dibanding dengan memperpendek *lag time* proses olah ulang yang disebabkan oleh efek pendiskonan terhadap ongkos yang dikeluarkan. Hal ini bisa dilihat dari hasil studi sensitivitas, yaitu pemendekan *lag time* proses olah ulang menjadi 5 tahun telah meningkatkan ongkos bahan bakar sekitar 13 - 24% dibanding apabila proses olah ulang dilakukan dengan *lag time* 20 tahun.

Hasil studi sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan laju diskon berpengaruh besar terhadap ongkos bahan bakar khususnya untuk PLTN jenis Reaktor Air Ringan, yaitu umumnya meningkat dengan kenaikan laju diskon. Sedangkan untuk PLTN jenis Reaktor Air Berat, kenaikan laju diskon hampir tidak berpengaruh terhadap kenaikan ongkos bahan bakarnya. Hal ini terutama disebabkan adanya perbedaan proporsi ongkos ujung depan dan ujung belakang daur dari kedua jenis PLTN tersebut. Ongkos ujung depan daur cenderung naik dengan naiknya laju diskon sedangkan ongkos ujung belakang cenderung turun. Pada PLTN jenis Reaktor Air Ringan, kenaikan ongkos ujung depan daur umumnya lebih besar dibanding dengan penurunan ongkos ujung belakang daur sedangkan pada PLTN jenis Reaktor Air Berat hampir seimbang. Parameter lain yang berpengaruh besar terhadap perubahan ongkos bahan bakar adalah perubahan harga U-alam dan ongkos pengayaan untuk PLTN jenis Reaktor Air Ringan, dan perubahan harga U-alam dan ongkos fabrikasi elemen bakar untuk PLTN jenis Reaktor Air Berat. Selain itu, pemendekan *lag time* proses olah ulang bahan bakar bekas PLTN jenis Reaktor Air Ringan akan menaikkan ongkos bahan bakar seperti dibahas di atas.

SIMPULAN

Dari hasil-hasil perhitungan di atas secara umum dapat disimpulkan bahwa : (a) PLTN jenis Reaktor Air Berat yang diajukan oleh AECL (PHWR dan CANDU3) memiliki ongkos bahan bakar lebih rendah 6 - 43% dibanding PLTN jenis Reaktor Air Ringan (PWR dan BWR) yang diajukan MHI/WH, NPI, WH dan GE; (b) di antara PLTN jenis Reaktor Air Ringan, SBWR dan ABWR-1000 yang diajukan oleh GE memiliki ongkos bahan bakar lebih tinggi 15 - 30% dibanding dengan PWR yang diajukan oleh MHI/WH, NPI dan WH; (c) di antara PWR sendiri, PWR yang diajukan oleh NPI, baik Siemens maupun Framatome, memiliki ongkos bahan bakar lebih rendah 6 - 9% dibanding PWR yang diajukan oleh MHI/WH maupun WH; (d) ongkos bahan bakar daur tertutup pada PLTN jenis Reaktor Air Ringan lebih tinggi 4 - 6% dibanding daur terbuka; (e) untuk daur tertutup, penundaan/pemanjangan *lag time* proses olah ulang akan menurunkan ongkos

bahan bakar; dan (f) ongkos bahan bakar PLTN jenis Reaktor Air Ringan lebih sensitif terhadap perubahan laju diskon dibanding dengan PLTN jenis Reaktor Air Berat.

SARAN

Perhitungan yang dilakukan pada dasarnya sudah dapat digunakan untuk menilai PLTN yang dipasok siapa yang memiliki ongkos bahan bakar paling murah, walaupun evaluasi yang telah dilakukan masih sangat kasar karena hanya siklus seimbang saja yang dipertimbangkan. Agar hasil evaluasi lebih teliti, beberapa data masukan khususnya yang menyangkut keseimbangan material bahan bakar yang lengkap (jumlah bahan bakar yang dimasukkan dan tingkat perkayaannya, serta jumlah bahan bakar yang dikeluarkan dari teras yang meliputi jumlah U, jumlah Pu, baik Pu fisil maupun Pu total, kandungan U-235, dll.) dalam manajemen teras untuk setiap siklus sepanjang hidup PLTN, yaitu dari teras awal sampai dengan teras akhir, perlu diadakan (diminta ke Pemasok).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. The Economics of The Nuclear Fuel Cycle, NEA-OECD, 1985.
- [2]. Feasibility Study of The First Nuclear Power Plants at Muria Peninsula Region - Fuel Cycle Evaluation, INPB-D-002.
- [3]. Feasibility Study of The First Nuclear Power Plants at Muria Peninsula Region - Economics of Fuel Cycle, INPB-D-003.
- [4]. Feasibility Study of The First Nuclear Power Plants at Muria Peninsula Region - Plant Highlights and Main Features of Proposed Plants, Attachment to INPB-C-013.
- [5]. Expansion Planning for Electric Generating System, Appendix F, IAEA, Vienna, 1983
- [6]. Water Reactor Fuel Extended Burnup Study, TRS No. 343, IAEA, Vienna, 1992

Tabel 1 : Data reaktor dan skema bahan bakar untuk PLTN kelas 600 Mwe.

PARAMETER	P E M A S O K					
	MHI / WH	NPI Siemens	WH	GE	AECL	AECL
1. Jenis Reaktor	PWR	PWR	AP600	SBWR	PHWR	CANDU3
2. Daya Thermal , MWt	1884	1894	1933	2000	2158	1441
3. Daya Listrik, MWe	615	646	631	635	638	432
4. Inventori Teras, tonU	56	56	66.9	93,9	89	53
5. Panjang Siklus, bulan	12	12	18	24	kontinyu	kontinyu
6. Faktor Kapasitas, %	85	90	90	87	95	95
7. Isi Ulang Bahan Bakar						
- Uranium, ton	14,8	14,8	22,1	35,4	112/th	89,5/th
- U-235, %	3,8	4	3,54	3,78	U-alam	U-alam
8. Discharge Bahan Bakar						
- Derajat Bakar, MWD/kgU	41,1	45,3	40,7	38,2	7,5	6,5
- Uranium, ton	14	14	21	33,6	-	-
- U-235, %	0,9	1,1	0,9	1,0	-	-
- Pu total, kg	799,2	799,2	1060,8	1085,4	-	-
- Pu fisi, kg	115,4	124,3	163,5	279,7	-	-

Tabel 2 : Data reaktor dan skema bahan bakar untuk PLTN kelas 900-1000 Mwe

PARAMETER	P E M A S O K				
	MHI / WH	NPI Siemens	NPI Framatome	GE	AECL
1. Jenis Reaktor	PWR	PWR	PWR	ABWR1000	PHWR
2. Daya Thermal , MWt	2652	3086	2895	2900	2800
3. Daya Listrik, MWe	866	1060	994	952	881
4. Inventori Teras, tonU	72	82	72	149	112
5. Panjang Siklus, bulan	12	12	12	18	kontinyu
6. Faktor Kapasitas, %	85	90	90	87	95
7. Isi Ulang Bahan Bakar					
- Uranium, ton	20,3	24	20,3	39,7	174/th
- U-235, %	3,85	4	4,25	3,5	U-alam
8. Discharge Bahan Bakar					
- Derajat Bakar, MWD/kgU	42,2	45,2	47,7	38,4	6,5
- Uranium, ton	19,1	22,7	19,12	37,83	-
- U-235, %	0,9	1,1	1,1	0,9	-
- Pu total, kg	1197,7	1296	1177,4	1865,9	-
- Pu fisi, kg	158,34	213,6	180,67	293,78	-

Table 3 : Data satuan harga dan material hilang dalam proses

SERVIS DAUR BAHAN BAKAR	REAKTOR AIR RINGAN (LWR)		REAKTOR AIR BERAT (HWR)	
	HARGA	HILANG	HARGA	HILANG
Uranium Alam	\$ 65/kgU	-	\$ 65/kgU	-
Konversi ke UF ₆	\$ 6 / kgU	0,5%	(*)	0,5%
Pengayaan	\$ 121.5 / SWU	-	-	-
Fabrikasi Elemen Bakar	\$ 350 / kgU	1,0%	\$ 85 / kgU	0,5%
Daur Terbuka :				
• Penyimpanan Sementara	\$ 220 / kgHM	-	-	-
• Disposasi	\$ 430 / kgHM	-	\$ 75 / kgHM	-
Daur Tertutup				
• Transportasi EB bekas	\$ 300 / kgHM	-	-	-
• Olah Ulang	\$ 1000 / kgHM	3%	-	-
• Disposasi Limbah	\$ 170 / kgHM	-	-	-
• Kredit Uranium	(**)	-	-	-
• Kredit Plutonium Fissil	\$ 15 / gram	-	-	-

(*) Ongkos konversi sudah termasuk dalam ongkos fabrikasi

(**) 80% dari harga U-alam, ongkos konversi dan pengayaan.^[1]

Tabel 4 : Data lead and lag time untuk masing-masing PLTN (bulan)

	P W R				B W R		H W R	
	MHI/ WH	NPI Siemens	NPI Framato me	AP600	ABWR 1000	SBWR	PHWR	CANDU 3
	A / B	A / B	A / B	A / B	A / B	A / B	A / B	A / B
Lead Time :								
Uranium Alam	24/24	24/24	*/24	24/*	*/24	24/*	17/17	17/*
Konversi	18/18	18/18	*/18	18/*	*/18	18/*	*	*
Pengayaan U-235	12/12	12/12	*/12	12/*	*/12	12/*	*	*
Fabrikasi EBN	6/6	6/6	*/6	6/*	*/6	6/*	13/13	13/*
Lag Time :								
Daur Terbuka :⁽¹⁾								
- Simpan sementara	31/31	26/9	*/31	11/*	*/11	11/*	*	*
- Disposasi EB bekas	40/40	40/40	*/40	40/*	*/40	40/*	10/10	7/*
Daur Tertutup :⁽²⁾								
- Simpan sementara	*/*	*/9	*/*	11/*	*/11	11/*	*	*
- Transportasi	20/20	20/20	*/20	20/*	*/20	20/*	*	*
- Olah ulang	20/20	20/20	*/20	20/*	*/20	20/*	*	*
- Disposasi limbah	40/40	40/40	*/40	40/*	*/40	40/*	*	*

(1), (2) : Lead and lag time diambil berdasarkan kapasitas penyimpanan elemen bakar bekas di lokasi PLTN

A/B : Kelas 600 MWe / Kelas 900 - 1000 MWe

* : Tidak ada data

Tabel 4 : Parameter untuk studi sensitivitas

PARAMETER	PROBLEMA REFERENSI	SENSITIVITAS	
		Problema 1	Problema 2
Harga U-alam	\$ 65/kgU	\$ 50/kgU	\$ 85/kgU
Pengayaan	\$ 121,5/SWU	\$ 100/SWU	\$ 150/SWU
Fabrikasi	\$ 350/kgHM	\$ 300/kgHM ^(*)	\$ 400/kgHM ^(**)
Olah Ulang	\$ 1000/kgHM	\$ 750/kgHM	\$ 1250/kgHM
Lag Time Olah Ulang	20 tahun	5 tahun	-
Laju Diskon	10%/tahun	5%/tahun	15%/tahun

(*) \$ 79,2/kgHM untuk HWR

(**) \$ 97,14/kgHM untuk HWR

Tabel 5 : Ongkos bahan bakar untuk kelas 600 MWe daur terbuka (mills/kWjam)

	P E M A S O K					
	MHI/WH	NPI	WH	GE	A E C L	
	PWR	PWR Siemens	AP600	SBWR	PHWR	CANDU3
U - alam	2,296 (34,43%)	2,119 (34,47%)	2,183 (33,36%)	2,725 (33,73%)	1,685 (36,68%)	2,100 (36,69%)
Konversi ke UF6	0,202 (3,03%)	0,187 (3,04%)	0,192 (2,93%)	0,240 (2,97%)	-	-
Pengayaan U-235	2,733 (40,98%)	2,569 (41,79)	2,530 (38,66%)	3,238 (40,08%)	-	-
Fabrikasi Elemen Bakar	1,385 (20,77%)	1,210 (19,68%)	1,421 (21,71%)	1,653 (20,46%)	2,124 ^(*) (46,23%)	2,646 ^(*) (46,23%)
Penyimpanan Sementara Elemen Bakar Bekas	0,029 (0,44%)	0,041 (0,67%)	0,195 (2,98%)	0,199 (2,46%)	-	-
Disposal Elemen Bakar Bekas	0,024 (0,36%)	0,021 (0,34%)	0,024 (0,37%)	0,025 (0,31%)	0,785 (17,09%)	0,977 (17,07%)
TOTAL :	6,669 (100%)	6,147 (100%)	6,545 (100%)	8,079 (100%)	4,594 (100%)	5,723 (100%)

(*) Termasuk ongkos konversi

Tabel 6 : Ongkos bahan bakar untuk kelas 600 MWe daur tertutup (mills/kWjam)

	P E M A S O K					
	MHI/WH	NPI Siemens	WH	GE	A E C L	
	PWR	PWR	AP600	SBWR	PHWR	CANDU3
U - alam	2,296 (32,66%)	2,119 (32,93%)	2,183 (31,49%)	2,725 (32,17%)	-	-
Konversi ke UF6	0,202 (2,87%)	0,187 (2,91%)	0,192 (2,77%)	0,240 (2,83%)	-	-
Pengayaan U-235	2,733 (38,88%)	2,569 (39,93%)	2,530 (36,49%)	3,238 (38,22%)	-	-
Fabrikasi Elemen Bakar	1,385 (19,70%)	1,210 (18,81%)	1,421 (20,50%)	1,653 (19,51%)	-	-
Penyimpanan Sementara Elemen Bakar Bekas	-	-	0,195 (2,81%)	0,199 (2,35%)	-	-
Transportasi Elemen Bakar Bekas	0,114 (1,62%)	0,098 (1,52%)	0,113 (1,63%)	0,115 (1,36%)	-	-
Olah Ulang	0,379 (5,39%)	0,325 (5,05%)	0,376 (5,42%)	0,384 (4,53%)	-	-
Disposal Limbah	0,010 (0,14%)	0,008 (0,12%)	0,010 (0,14%)	0,010 (0,12%)	-	-
Kredit Uranium	-0,047 (-0,67%)	-0,042 (-0,65%)	-0,046 (-0,66%)	-0,048 (-0,57%)	-	-
Kredit Plutonium	-0,043 (-0,61%)	-0,040 (-0,62%)	-0,041 (-0,59%)	-0,044 (-0,52%)	-	-
TOTAL :	7,029 (100%)	6,434 (100%)	6,933 (100%)	8,471 (100%)	-	-

Tabel 7 : Ongkos bahan bakar untuk kelas 900 - 1000 MWe daur terbuka (mills/kWjam)

	P E M A S O K				
	MHI/WH	NPI Siemens	NPI Framatome	GE	A E C L
	PWR	PWR	PWR	ABWR1000	PHWR
U - alam	2,241 (34,45%)	2,068 (33,52%)	2,088 (34,71%)	2,475 (33,50%)	1,896 (36,69%)
Konversi ke UF6	0,197 (3,03%)	0,182 (2,95%)	0,184 (3,06%)	0,218 (2,95%)	-
Pengayaan U-235	2,681 (41,21%)	2,508 (40,66%)	2,583 (42,94%)	2,856 (38,65%)	-
Fabrikasi Elemen Bakar	1,333 (20,49%)	1,181 (19,14%)	1,117 (18,57%)	1,631 (22,07%)	2,389 ^(*) (46,23%)
Penyimpanan Sementara Elemen Bakar Bekas	0,029 (0,45%)	0,209 (3,39%)	0,024 (0,40%)	0,186 (2,52%)	-
Disposal Elemen Bakar Bekas	0,024 (0,37%)	0,021 (0,34%)	0,020 (0,33%)	0,023 (0,31%)	0,883 (17,09%)
TOTAL :	6,505 (100%)	6,169 (100%)	6,016 (100%)	7,389 (100%)	5,168 (100%)

(*) Termasuk ongkos konversi

**Tabel 8 : Ongkos bahan bakar untuk kelas 900 - 1000 MWe daur tertutup
(mills/kWjam)**

	P E M A S O K				
	MHI/WH	NPI Siemens	NPI Framatome	GE	A E C L
	PWR	PWR	PWR	ABWR1000	PHWR
U - alam	2,241 (32,67%)	2,068 (31,81%)	2,088 (33,10%)	2,475 (31,90%)	-
Konversi ke UF6	0,197 (2,87%)	0,182 (2,80%)	0,184 (2,92%)	0,218 (2,81%)	-
Pengayaan U-235	2,681 (39,09%)	2,508 (38,57%)	2,583 (40,95%)	2,856 (36,81%)	-
Fabrikasi Elemen Bakar	1,333 (19,43%)	1,181 (18,16%)	1,117 (17,71%)	1,631 (21,02%)	-
Penyimpanan Sementara Elemen Bakar Bekas	-	0,209 (3,21%)	-	0,186 (2,40%)	-
Transportasi Elemen Bakar Bekas	0,112 (1,63%)	0,100 (1,54%)	0,095 (1,51%)	0,107 (1,38%)	-
Olah Ulang	0,374 (5,45%)	0,333 (5,12%)	0,316 (5,01%)	0,358 (4,61%)	-
Disposal Limbah	0,009 (0,13%)	0,008 (0,12%)	0,008 (0,13%)	0,009 (0,12%)	-
Kredit Uranium	-0,046 (-0,67%)	-0,043 (-0,66%)	-0,041 (-0,65%)	-0,043 (-0,55%)	-
Kredit Plutonium	-0,042 (-0,61%)	-0,043 (-0,66%)	-0,041 (-0,65%)	-0,039 (-0,50%)	-
TOTAL :	6,859 (100%)	6,502 (100%)	6,308 (100%)	7,759 (100%)	-

Tabel 9 : Sensitivitas ongkos bahan bakar untuk kelas 600 Mwe

PARAMETER	NILAI	P E M A S O K					
		MHI/WH	NPI Siemens	WH	GE	A E C L	
		PWR	PWR	AP600	SBWR	PHWR	CANDU3
Daur Terbuka :							
Laju Diskon (%/ tahun)	5	-9,7%	-9,92%	-8,95%	-11,97%	+0,74%	+0,73%
	10 (*)	6,669	6,147	6,545	8,079	4,594	5,723
	15	+14,05%	+14,23%	+13,35%	+16,52%	+1,74%	+1,75%
Harga U-alam (\$/kgU)	50	-7,95%	-7,96%	-7,7%	-7,79%	-8,47%	-8,47%
	65 (*)	6,669	6,147	6,545	8,079	4,594	5,723
	80	+7,95%	+7,96%	+7,7%	+7,79%	+8,47%	+8,47%
Pengayaan (\$/SWU)	100	-7,24%	-7,40%	-6,85%	-7,09%	-	-
	121,5 (*)	6,669	6,147	6,545	8,079	-	-
	150	+9,61%	+9,79%	+9,06%	+9,41%	-	-
Fabrikasi (\$/kgHM) (**)	300	-2,97%	-2,81%	-3,1%	-2,92%	-6,6%	-6,6%
	350 (*)	6,669	6,147	6,545	8,079	4,594	5,723
	400	+2,97%	+2,81%	+3,1%	+2,92%	+6,6%	+6,6%
Daur Tertutup :							
Laju Diskon (%/tahun)	5	-1,7%	-2,83%	+0,84%	-3,31%	-	-
	10 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-
	15	+10,23%	+10,90%	+9,13%	+12,82%	-	-
Harga U-alam (\$/kgU)	50	-7,48%	-7,55%	-7,2%	-7,38%	-	-
	65 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-
	80	+7,48%	+7,55%	+7,2%	+7,38%	-	-
Pengayaan (\$/SWU)	100	-6,82%	-6,99%	-6,39%	-6,71%	-	-
	121,5 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-
	150	+8,18%	+9,28%	+8,47%	+8,89%	-	-
Fabrikasi (\$/kgHM)	300	-2,82%	-2,7%	-2,93%	-2,79%	-	-
	350 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-
	400	+2,82%	+2,7%	+2,93%	+2,79%	-	-
Olah Ulang (\$/kgHM)	750	-1,35%	-1,26%	-1,36%	-1,13%	-	-
	1000 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-
	1250	+1,35%	+1,26%	+1,36%	+1,13%	-	-
Lag Time Olah Uilang (tahun)	5	+18,22%	+16,82%	+23,68%	+12,9%	-	-
	20 (*)	7,029	6,434	6,933	8,471	-	-

(*) Problema referensi

(**) Sensitivitas ongkos fabrikasi EBN PHWR adalah \$79,2/kgHM (problema 1), \$ 85/kgHM (referensi) dan \$ 97,14/kgHM (problema 2)

Tabel 10 : Sensitivitas ongkos bahan bakar untuk kelas 900 - 1000 Mwe

PARAMETER	NILAI	P E M A S O K				
		MHI/WH	NPI	NPI	GE	AECL
		PWR	Siemens PWR	Framatome PWR	ABWR1000	PHWR
Daur Terbuka :						
Laju Diskon (%/tahun)	5	-9,25%	-8,32%	-9,49%	-12,65%	+0,75%
	10 ^(*)	6,505	6,169	6,016	7,389	5,168
	15	+13,5%	+12,08%	+13,63%	+17,57%	+1,76%
Harga U-alam (\$/kgU)	50	-7,95%	-7,73%	-8,0%	-7,73%	-8,46%
	65 ^(*)	6,505	6,169	6,016	7,389	5,168
	80	+7,95%	+7,73%	+8,0%	+7,73%	+8,46%
Pengayaan (\$/SWU)	100	-7,3%	-7,2%	-7,6%	-6,83%	-
	121,5 ^(*)	6,505	6,169	6,016	7,389	-
	150	+9,67%	+9,53%	+10,07%	+9,07%	-
Fabrikasi (\$/kgHM) ^(**)	300	-2,94%	-2,74%	-2,64%	-3,15%	-6,58%
	350 ^(*)	6,505	6,169	6,016	7,389	5,168
	400	+2,94%	+2,74%	+2,64%	+3,15%	+6,58%
Daur Tertutup :						
Laju Diskon (%/tahun)	5	-1,25%	+0,37%	-2,39%	-3,48%	-
	10 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-
	15	+9,70%	+8,32%	+10,07%	+13,67%	-
Harga U-alam (\$/kgU)	50	-7,48%	-7,28%	-7,58%	-7,31%	-
	65 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-
	80	+7,48%	+7,28%	+7,58%	+7,31%	-
Pengayaan (\$/SWU)	100	-6,84%	-6,75%	-7,18%	-6,46%	-
	121,5 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-
	150	+9,08%	+8,97%	+9,51%	+8,56%	-
Fabrikasi (\$/kgHM)	300	-2,77%	-2,58%	-2,52%	-3,0%	-
	350 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-
	400	+2,77%	+2,58%	+2,52%	+3,0%	-
Olah Ulang (\$/kgHM)	750	-1,36%	-1,28%	-1,25%	-1,16%	-
	1000 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-
	1250	+1,36%	+1,28%	+1,25%	+1,16%	-
Lag Time Olah Ulang (tahun)	5	+18,44%	+13,72%	+16,54%	+13,33%	-
	20 ^(*)	6,859	6,502	6,308	7,759	-

(*) Problema referensi

(**) Sensitivitas ongkos fabrikasi EBN PHWR adalah \$79,2/kgHM (problema 1), \$ 85/kgHM (referensi) dan \$ 97,14/kgHM (problema 2)

TANYA JAWAB**1. M. Birsam**

- Saudara memasukkan komponen biaya fabrikasi pembuatan EBN di Indonesia \$350,-/kgU. Cara ini kiranya kurang tepat karena di Indonesia belum ada pabrik EBN reaktor daya. Mengapa tidak langsung mengambil data riil harga EBN yang ada di pasaran sehingga hasil studi lebih realistis?

Bambang Herutomo

- Fabrikasi EBN adalah salah satu tahap daur BBN yang memiliki kemungkinan yang besar (ekonomis) untuk didirikan di Indonesia. Harga atau biaya fabrikasi (LWR) saat ini dalam kisaran \$300/kgU - \$400,-/kgU tergantung kerumitan disain EB itu sendiri. Dalam perhitungan ini diambil nilai tengahnya yaitu \$350,-/kgU. Harga ini dipandang cukup realistis mengingat posisi Indonesia yang cukup jauh dari pusat kegiatan industri nuklir, sedangkan harga \$300,-/kgU dan \$400,-/kgU digunakan dalam studi sensitivitas.

2. Graitto

- Apakah tidak perlu dibandingkan porsi harga/ongkos bahan bakar (10-30%) dengan jenis-jenis PLTN dan pemasoknya mengingat selisih harga/ongkos total pada tabel 1 hanya kecil?

Bambang Herutomo

- Meskipun selisih ongkos masing-masing PLTN relatif kecil apalagi kalau ditinjau porsi ongkos bahan bakar yang sekitar 10-30 % dari ongkos total pembangkitan, namun karena ongkos yang dihitung adalah ongkos terlevelisasi (ongkos per energi listrik yang dibangkitkan), maka selisih yang kecil akan sangat berarti bagi utilitas (pengoperasian PLTN) yang mempunyai daya besar (600-1300 MWe). Selisih tersebut dapat digunakan misalnya untuk peningkatan kegiatan perawatan PLTN ataupun Litbangtek.

3. Sugondo

- Ongkos limbah yang paling mungkin saat ini adalah transportasi, tempat dan metoda penyimpanan. Apakah masing-masing pemasok mempunyai suatu kriteria yang disetujui secara internasional?

Bambang Herutomo

- Pemasok pada umumnya hanya menyediakan penyimpanan EB bekas di lokasi reaktor saja, sedangkan penyimpanan sementara, disposal EB bekas, proses olah ulang maupun disposal limbah pada umumnya dilakukan oleh pihak luar (di luar utiliti maupun pemasok). Pihak luar seperti Pemerintah atau Swasta, dapat juga kerjasama utiliti dan Swasta/Pemerintah.