



PENGARUH PANJANG SIKLUS OPERASI TERHADAP ONGKOS BAHAN BAKAR SUATU PLTN

Bambang Herutomo
Pusat Elemen Bakar Nuklir

511

ABSTRAK

PENGARUH PANJANG SIKLUS OPERASI TERHADAP ONGKOS BAHAN BAKAR SUATU PLTN. Studi tentang pengaruh panjang siklus operasi terhadap ongkos bahan bakar reaktor daya air ringan jenis PWR kelas 600 MWe telah dilakukan. Studi meliputi perhitungan jumlah bahan ujung depan yang diperlukan seperti isi ulang uranium, tingkatperkayaan, SWU dan uranium alam, serta ongkos bahan bakar terlevelisasi sebagai fungsi panjang siklus dan derajat bakar. Hasil-hasil studi menunjukkan bahwa untuk kisaran derajat bakar yang ditinjau, yaitu dari 30 s/d 60 MWhari/kg U, perpanjangan siklus operasi dari 12 ke 18 bulan menaikkan ongkos bahan bakar dalam kisaran 5 - 8% dan perpanjangan siklus operasi dari 12 ke 24 bulan menaikkan ongkos bahan bakar dalam kisaran 10 - 16%. Kenaikan ongkos tersebut terutama diakibatkan oleh turunnya kegunaan SWU dalam kisaran 8 - 14% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan dan 15 - 25% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan, serta turunnya kegunaan uranium alam dalam kisaran 6 - 10% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan dan 11 - 18% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan. Akan tetapi, jika dikaitkan dengan biaya yang diperlukan untuk penggantian daya pada saat *annual outage*, perpanjangan siklus dari 12 ke 18 atau 24 bulan tersebut memberikan keuntungan rerata 8% dari ongkos total bahan bakar siklus 12 bulan.

ABSTRACT

THE EFFECT OF OPERATION CYCLE LENGTH ON FUEL COST OF A NPP. The study of the effect of operation cycle length on fuel cost of a light water reactor - PWR type 600 MWe class has been performed. The study includes calculation of the front end material required, i.e. uranium reloading, enriched uranium, SWU and natural uranium, and levelized fuel cost as a function of cycle length and fuel burnup. The results of study show that, for the range of burnup considered, i.e. from 30 to 60 MWD/kg U, the extension of cycle length from 12 to 18 months increases fuel cost in the range of 5 - 8% and the extension of cycle length from 12 to 24 months increases fuel cost in the range of 10 - 16%. The increase of these fuel cost is mainly due to the decrease in SWU utilization in the range of 8 - 14% for the extension of cycle length from 12 to 18 months and 15 - 25% for the extension of cycle length from 12 to 24 months, and to the decrease in the natural uranium utilization in the range of 6 - 10% for the extension of cycle length from 12 to 18 months and 11 - 18% for the extension of cycle length from 12 to 24 months. However, if it is correlated with required cost for power replacement during annual outage, the extension of cycle length from 12 to 18 or 24 months will give an advantage in the average of 8% from the total fuel cost of 12 months cycle.

PENDAHULUAN

Dewasa ini rerata derajat bakar bahan bakar reaktor daya air ringan telah berhasil dinaikkan dari sekitar 28 MWhari/kgU menjadi 35 - 45 MWhari/kgU untuk BWR dan dari sekitar 33 MWhari/kgU menjadi 40 - 50 MWhari/kgU untuk PWR^[1]. Sampai saat ini, usaha meningkatkan derajat bakar masih terus dilakukan mengingat keuntungan yang diperoleh. Untuk operasi daya dan panjang siklus yang sama, peningkatan derajat bakar dapat dicapai dengan cara memperkecil fraksi bahan bakar atau jumlah perangkat bahan

bakar yang akan dimasukkan ke dalam teras pada saat isi ulang^[2]. Dengan cara ini jumlah material ujung depan yang diperlukan dan jumlah elemen bakar bekas yang ditarik dari teras reaktor akan berkurang. Sebagai hasilnya ongkos bahan bakar akan menurun sesuai dengan kenaikan derajat bakarnya.

Ditinjau dari segi operasi reaktor, peningkatan derajat bakar tersebut berarti memperbanyak pilihan skema pengisian ulang bahan bakar ke dalam teras. Selain memperkecil fraksi isi ulang bahan bakar, peningkatan derajat bakar untuk fraksi isi

ulang bahan bakar yang sama dapat dilakukan melalui perpanjangan siklus operasi dari normal 12 bulan menjadi 18 atau 24 bulan. Perpanjangan siklus operasi ini sangat diminati oleh banyak utiliti khususnya di Amerika Serikat. Sedangkan utiliti di luar Amerika, seperti Perancis dan Jepang lebih menyukai siklus pendek, yaitu 12 bulan. Beberapa alasan penting dari utiliti di Amerika untuk memilih siklus panjang adalah dengan siklus panjang akan^[4] :

- ◆ mengurangi jumlah perijinan yang dikirim kerana berkurangnya jumlah pengisian ulang bahan bakar (*refueling*),
- ◆ meningkatkan ketersediaan reaktor sehingga faktor kapasitas meningkat,
- ◆ mengurangi pengeluaran untuk mengganti daya yang hilang akibat padamnya reaktor pada saat isi ulang bahan bakar, dan
- ◆ mengurangi paparan radiasi terhadap personel.

Dari keempat alasan tersebut di atas, alasan ke tiga memegang peranan paling penting dalam usaha penghematan biaya, khususnya untuk utiliti-utiliti yang harus membeli daya dari utiliti lain karena ketidakcukupan cadangan kapasitas sistem jaringan listriknya^[4].

Makalah ini menyajikan hasil studi tentang pengaruh perpanjangan siklus operasi, yaitu dari 12 bulan ke 18 dan 24 bulan dengan berbagai variasi derajat bakar, yaitu dari 30 s/d 60 MWhari/kgU terhadap kebutuhan material ujung depan daur dan ongkos bahan bakar. Dalam studi, daur bahan bakar yang ditinjau adalah daur terbuka dan sebagai reaktor referensi adalah PWR kelas 600 Mwe.

METODA

Dalam studi ini, model perhitungan generik yang dikembangkan oleh *the International Nuclear Model* (USA) digunakan untuk menentukan jumlah material ujung depan yang diperlukan seperti jumlah bahan bakar yang akan dimasukkan ke dalam teras pada saat isi ulang dan tingkat perkayaan U-235 nya sebagai fungsi derajat bakar dan lama operasi daya penuh per-siklus. Menurut model, untuk siklus seimbang yang ideal berlaku korelasi sbb.^[5] :

$$FB = S D \dots\dots\dots (1)$$

$$E = a + bB (1 + F) \dots\dots\dots (2)$$

Dalam hal ini, *F* adalah fraksi bahan bakar di dalam teras yang akan diganti pada saat isi ulang, *B* adalah rerata derajat bakar dari satu bahan bakar yang ditarik dari teras (MWhari/tonU), *S* adalah daya spesifik teras (MWh/tonU), *D* adalah operasi daya penuh per-siklus (hari), *E* adalah tingkat perkayaan U-235 (%), dan *a* dan *b* adalah koefisien regresi (untuk PWR, harga *a*= 0,766 dan *b*=0,0000525. Konstanta ini ditetapkan berdasarkan data manajemen teras bahan bakar seluruh PWR yang berada di USA).

Sedangkan untuk menghitung ongkos bahan bakar (dalam satuan mills/kWjam) diguna-kan metode *levelized cost - constant money*, yaitu jumlah pengeluaran terdiskon dibagi dengan jumlah terdiskon energi listrik yang dibangkitkan^[1,3,4]. Pengeluaran yang dimaksud meliputi ongkos ujung depan daur seperti pembelian U-alam, ongkos konversi, ongkos perkayaan dan ongkos fabrikasi, serta ongkos ujung belakang daur seperti ongkos transportasi elemen bakar bekas, ongkos penyimpanan sementara, ongkos olah ulang dan ongkos disposal limbah.

Disebabkan selama hidup reaktor siklus operasi didominasi oleh siklus seimbang maka dalam studi ini perhitungan ongkos bahan bakar hanya dilakukan untuk siklus seimbang saja. Dalam siklus seimbang, setiap satu bahan bakar yang dimasukkan ke dalam teras adalah sama, baik jumlah maupun tingkat perkayaannya, sehingga jumlah energi yang dibangkitkan akan sama pula^[3]. Oleh karena sifatnya yang berulang tersebut, tinjauan satu daur bahan bakar di-anggap cukup representatif untuk menghitung ongkos bahan bakar dalam siklus seimbang. Dengan demikian, ongkos bahan bakar terlevelisasi secara sederhana dapat dihitung, yaitu^[3] :

$$L_c = \frac{[\sum_i X_i (1+d)^{T_d} + \sum_j Y_j (1+d)^{-(T_r+T_g)}]}{[E(1-e^{-\ln(1+d)T_r})/\ln(1+d)^{T_r}]} \dots\dots\dots (3)$$

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, *T_r* adalah waktu tinggal efektif satu

bahan bakar di dalam teras, T_d , adalah *lead time* komponen ke-i ujung depan daur, T_g , adalah *lag time* komponen ke-j ujung belakang daur, d adalah laju diskon, dan E adalah energi listrik yang dibangkitkan.

Untuk maksud studi ini, sebagai reaktor referensi dipilih jenis PWR kelas 600 MWe. Pemilihan ini didasari oleh kenyataan bahwa PWR merupakan salah satu jenis reaktor pembangkit daya yang paling banyak dioperasikan sampai saat ini, dan kelas 600 MWe adalah kelas PLTN yang sesuai untuk diintroduksi di Indonesia mengingat keterbatasan kapasitas sistem jaringan listrik yang ada pada saat ini. Sedangkan parameter ekonomi seperti laju diskon, harga U-alam, ongkos konversi, ongkos perkayaan, ongkos fabrikasi, ongkos ujung belakang daur, *lead and lag time*, dll. digunakan data dari IAEA^[2]. Data reaktor referensi dan parameter

ekonomi yang digunakan dalam studi dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini.

HASIL DAN BAHASAN

Berdasarkan pada persamaan (1) dan persamaan (2), untuk reaktor dengan daya keluaran dan daya spesifik serta panjang siklus yang sama, peningkatan derajat bakar dilakukan dengan cara memperkecil fraksi bahan bakar yang dimasukkan/dikeluarkan pada saat isi ulang. Selain itu, peningkatan derajat bakar juga memerlukan penambahan tingkat perkayaan U-235 yang lebih tinggi. Meskipun demikian, karena jumlah bahan bakar yang diisikan ulang berkurang maka jumlah SWU yang diperlukan relatif konstan dan jumlah U-alam yang diperlukan akan berkurang sesuai dengan kenaikan derajat bakar. Akibatnya, ongkos bahan bakar akan turun apabila derajat bakar dinaikkan.

Tabel 1 : Data Reaktor Referensi dan Parameter Ekonomi

	Referensi	Sensitivitas 1	Sensitivitas 2
Data Reaktor :			
1. Jenis Reaktor	PWR	-	-
2. Daya Thermal Keluaran (MWt)	1993	-	-
3. Daya Listrik Keluaran Netto (MWe)	631	-	-
4. Total Uranium dalam Teras (ton)	66.9	-	-
5. Lama <i>Annual Outage</i> (hari)	55	-	-
6. Operasi Daya Penuh per Siklus (hari)	305 (siklus 12 bln.) 485 (siklus 18 bln.) 665 (siklus 24 bln.)	- - -	- - -
Parameter Ekonomi :⁽¹⁾			
1. Laju Diskon (% per tahun)	5	0	10
2. Harga U-alam (\$/kgU)	65	32,5	130
3. Ongkos Konversi (\$/kgU)	8	-	-
4. Ongkos Perkayaan (\$/SWU)	110	70	150
5. Ongkos Fabrikasi (\$/kgU)	220+1.1(BU-40) ⁽²⁾	200	350
6. Ongkos Ujung Belakang (\$/kgU)	400 ⁽³⁾	800 ⁽³⁾	1600 ⁽³⁾
7. <i>Lead time</i> (tahun)			
• Pembelian U-alam	1,5	-	-
• Konversi	1	-	-
• Perkayaan	0,75	-	-
• Fabrikasi	0,5	-	-
8. Material Hilang (%)			
• Konversi	0,5	-	-
• Fabrikasi	1,5	-	-

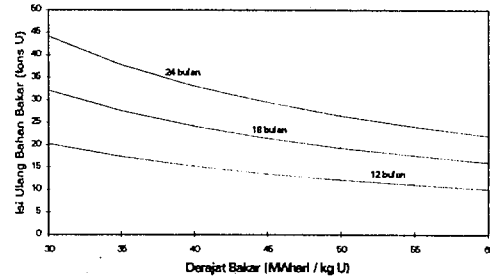
(1) Harga dollar AS pada Januari 1989.

(2) 220 \$/kgU untuk BU ≤ 40 MWhari/kgU.

(3) Ongkos ujung belakang daur diambil harga netto yang berlaku pada saat bahan bakar bekas diangkat dari teras reaktor.

Untuk daya keluaran dan daya spesifik yang sama, perpanjangan siklus operasi untuk derajat bakar tertentu dapat dilakukan dengan cara memperbesar fraksi bahan bakar yang dimasukkan ke dalam teras pada saat isi ulang. Selain itu juga diperlukan tingkat perkayaan U-235 yang lebih tinggi di dalam bahan bakarnya. Hasil perhitungan untuk reaktor referensi yang digunakan menunjukkan bahwa diperlukan tambahan bahan bakar isi ulang sekitar 60 % untuk memperpanjang siklus dari 12 ke 18 bulan dan sekitar 120 % untuk memperpanjang siklus dari 12 ke 24 bulan. Pada Gambar 1 dapat dilihat pengaruh panjang siklus terhadap jumlah bahan bakar isi ulang sebagai fungsi derajat bakar, sedangkan pada Tabel 2 dapat dilihat jumlah material ujung depan yang diperlukan.

tingkat perkayaan bahan bakar isi ulang tersebut mengakibatkan naiknya jumlah SWU (*Separative Work Unit*) dan U-alam yang diperlukan.



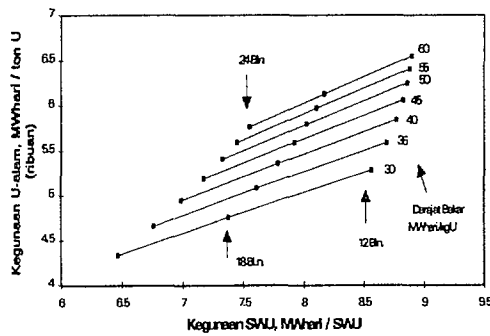
Gambar 1 : Jumlah bahan bakar isi ulang yang diperlukan sebagai fungsi siklus dan derajat bakar.

Seperti disebutkan di atas bahwa untuk memperpanjang siklus juga diperlukan tingkat perkayaan yang lebih tinggi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa diperlukan tambahan tingkat perka yaan sebesar 0,28 % U-235 untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan dan 0,56% U-235 untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan. Meningkatnya jumlah dan

Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara kegunaan SWU yang di-nyatakan dalam MWhari/SWU dan kegunaan U-alam yang dinyatakan dalam MWhari/tonU untuk berbagai panjang siklus dan derajat bakar. Dari gambar tersebut, perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan menyebabkan turunnya kegunaan SWU dan U-alam dalam

Tabel 2 : Jumlah material ujung depan daur yang diperlukan.

Derajat Bakar MWhari/kgU	E F P D hari	Fraksi Teras	Jumlah Material Ujung Depan Daur			
			U Isi Ulang ton	U-235 %	S W U ribuan	U-alam ton
30	305	0,303	20,262	2,818	71,0482	115,137
	485	0,482	32,220	3,100	131,0878	203,158
	665	0,660	44,178	3,381	204,9649	306,078
35	305	0,260	17,368	3,081	69,9952	108,777
	485	0,413	27,617	3,362	127,0581	190,177
	665	0,556	37,867	3,644	196,1044	284,347
40	305	0,227	15,197	3,343	69,3251	104,007
	485	0,361	24,165	3,625	124,1964	180,441
	665	0,495	33,134	3,906	189,6475	268,049
45	305	0,202	13,508	3,606	68,8946	100,297
	485	0,321	21,480	3,887	122,0940	172,869
	665	0,440	29,452	4,169	184,7719	255,373
50	305	0,182	12,157	3,868	66,6208	97,328
	485	0,289	19,332	4,150	120,5093	166,811
	665	0,396	26,507	4,431	180,9879	245,232
55	305	0,165	11,052	4,131	68,4528	94,900
	485	0,263	17,575	4,412	119,2905	161,854
	665	0,360	24,097	4,694	177,9860	236,935
60	305	0,151	10,131	4,393	68,3581	92,876
	485	0,241	16,110	4,675	118,3382	157,724
	665	0,330	22,089	4,956	175,5618	230,021



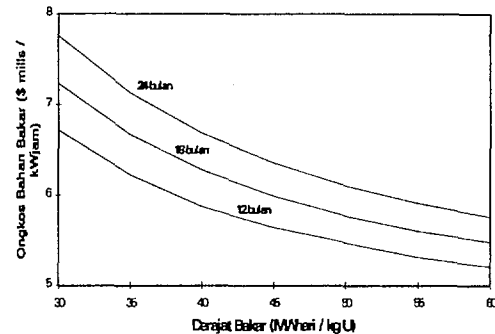
Gambar 2 : Kegunaan SWU dan U-alam sebagai fungsi panjang siklus dan derajat bakar

kisaran 8 - 14% dan 6 - 10%. Sedangkan perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan menyebabkan turunnya kegunaan SWU dan U-alam dalam kisaran 15 - 25% dan 11 - 18%.

Untuk derajat bakar yang sama, bertambahnya material ujung depan yang diperlukan dan juga material ujung belakang daur pada siklus panjang dengan sendirinya akan berakibat naiknya ongkos bahan bakar. Gambar 3 memperlihatkan hubungan antara ongkos bahan bakar dari berbagai panjang siklus sebagai fungsi kenaikan derajat bakar. Dari gambar tersebut terlihat bahwa perpanjangan siklus untuk kisaran derajat bakar yang ditinjau (30 - 60 MWhari/kgU) akan menaikkan ongkos bahan bakar dalam kisaran 5 - 8% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan dan 10 - 16% untuk perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan. Struktur ongkos bahan bakar untuk masing-masing komponen dalam daur bahan bakar sebagai fungsi panjang siklus dan derajat bakar dapat dilihat pada Tabel 3. Sedangkan pada Tabel 4, Tabel 5 dan Tabel 6 berturut-turut dapat dilihat hasil perhitungan sensitivitas ongkos bahan bakar untuk siklus 12, 18 dan 24 bulan.

Pada Tabel 3 terlihat bahwa kenaikan ongkos U-alam dan kekayaan sangat dominan dalam menaikkan ongkos bahan bakar siklus panjang untuk derajat bakar

yang sama. Dari tabel juga terlihat bahwa di antara berbagai komponen, hanya ongkos fabrikasi yang mengalami penurunan untuk derajat bakar yang sama apabila siklus diperpanjang, akan tetapi penurunan tersebut sangat kecil dibanding dengan kenaikan ongkos komponen lainnya.



Gambar 3 : Ongkos bahan bakar sebagai fungsi panjang siklus dan derajat bakar.

Akan tetapi, jika dikaitkan dengan biaya yang dikeluarkan untuk penggantian daya pada saat *annual outage*, perpanjangan siklus dari 12 ke 18 dan 24 bulan akan memberikan keuntungan rerata sekitar 8% dari ongkos total bahan bakar siklus 12 bulan seperti ditunjukkan dalam Tabel 7. Dari tabel tersebut juga terlihat bahwa besarnya keuntungan sangat bervariasi tergantung pada derajat bakar bahan bakar dan panjang siklus. Semakin tinggi derajat bakar dan semakin panjang siklus operasi maka semakin besar keuntungan yang diperoleh. Dalam hal ini, asumsi dasar yang digunakan dalam perhitungan adalah lama *annual outage* untuk 12, 18 dan 24 bulan dianggap sama, yaitu 55 hari, dan harga untuk penggantian daya adalah sebesar 20 mills/kWjam^[2]. Harga penggantian daya tersebut diambil dari harga listrik dari Pusat Listrik Tenaga Batubara yang biasa digunakan dalam analisis oleh utiliti di Amerika Serikat.

Tabel 3 : Struktur ongkos bahan bakar sebagai fungsi panjang siklus dan derajat bakar.

Derajat Bakar MWhari/kgU	Panjang Siklus (bulan)	O N G K O S (mills/kWjam)					
		U-alam	Konversi	Perkayaan	Fabrikasi	Ujung Belakang	TOTAL
30	12	1,889	0,227	1,902	1,087	1,617	6,722
	18	2,085	0,250	2,195	1,082	1,625	7,238
	24	2,286	0,275	2,497	1,080	1,628	7,765
35	12	1,806	0,217	1,896	0,944	1,367	6,230
	18	1,975	0,237	2,152	0,939	1,375	6,677
	24	2,147	0,258	2,415	0,937	1,378	7,136
40	12	1,748	0,210	1,901	0,837	1,180	5,875
	18	1,901	0,228	2,136	0,832	1,187	6,285
	24	2,054	0,247	2,371	0,831	1,189	6,691
45	12	1,712	0,206	1,919	0,772	1,034	5,643
	18	1,842	0,221	2,123	0,767	1,042	5,996
	24	1,978	0,238	2,335	0,765	1,045	6,361
50	12	1,689	0,203	1,946	0,721	0,918	5,477
	18	1,798	0,216	2,119	0,716	0,925	5,774
	24	1,921	0,231	2,314	0,713	0,928	6,108
55	12	1,660	0,199	1,953	0,680	0,823	5,314
	18	1,765	0,212	2,122	0,674	0,830	5,603
	24	1,879	0,226	2,302	0,672	0,833	5,912
60	12	1,646	0,198	1,976	0,646	0,743	5,209
	18	1,743	0,209	2,135	0,640	0,751	5,479
	24	1,847	0,222	2,300	0,638	0,754	5,760

Tabel 4 : Hasil perhitungan sensitivitas ongkos bahan bakar untuk siklus 12 bulan.

Parameter Sensitiv.	Nilai	Derajat Bakar (MWhari/kgU)						
		30	35	40	45	50	55	60
Laju Diskon (%)	0	6,249	5,729	5,342	5,070	4,862	4,661	4,512
	5	6,722	6,230	5,875	5,643	5,477	5,314	5,209
	10	7,247	6,792	6,479	6,296	6,183	6,071	6,022
Harga U-Alam (\$)	32,5	5,778	5,327	5,001	4,787	4,632	4,484	4,386
	65	6,722	6,230	5,875	5,643	5,477	5,314	5,209
	130	8,611	8,036	7,624	7,354	7,165	6,974	6,854
Ongkos Perkayaan (\$)	70	6,030	5,540	5,184	4,945	4,769	4,604	4,490
	110	6,722	6,230	5,875	5,643	5,477	5,314	5,209
	150	7,414	6,919	6,566	6,341	6,184	6,024	5,927
Ongkos Fabrikasi (\$)	200	6,623	6,144	5,799	5,555	5,380	5,209	5,097
	220+1.1 (BU-40)	6,722	6,230	5,875	5,643	5,477	5,314	5,209
	350	7,364	6,787	6,370	6,069	5,840	5,641	5,497
Ongkos Ujung Belakang (\$)	800	8,339	7,597	7,055	6,677	6,395	6,137	5,952
	400	6,722	6,230	5,875	5,643	5,477	5,314	5,209
	1600	11,574	10,332	9,414	8,745	8,231	7,782	7,438

Catatan : Huruf cetak tebal adalah problema referensi

Tabel 5 : Hasil perhitungan sensitivitas ongkos bahan bakar untuk siklus 18 bulan.

Parameter Sensitiv.	Nilai	Derajat Bakar (MWhari/kgU)						
		30	35	40	45	50	55	60
Laju Diskon (%)	0	6,717	6,143	5,711	5,389	5,133	4,925	4,761
	5	7,238	6,677	6,285	5,996	5,774	5,603	5,479
	10	7,811	7,281	6,297	6,681	6,505	6,380	6,308
Harga U-Alam (\$)	32,5	6,195	5,690	5,334	5,074	4,875	4,720	4,607
	65	7,238	6,677	6,285	5,996	5,774	5,603	5,479
	130	9,323	8,652	8,186	7,838	7,573	7,367	7,222
Ongkos Perumahan (\$)	70	6,440	5,895	5,508	5,223	5,004	4,831	4,703
	110	7,238	6,677	6,285	5,996	5,774	5,603	5,479
	150	8,036	7,460	7,061	6,768	6,545	6,374	6,255
Ongkos Fabrikasi (\$)	200	7,140	6,592	6,209	5,909	5,678	5,498	5,368
	220+1.1 (BU-40)	7,238	6,677	6,285	5,996	5,774	5,603	5,479
	350	7,877	7,232	6,776	6,419	6,143	5,926	5,765
Ongkos Ujung Belakang (\$)	800	8,863	8,052	7,472	7,037	6,700	6,433	6,230
	400	7,238	6,677	6,285	5,996	5,774	5,603	5,479
	1600	12,113	10,801	9,846	9,120	8,550	8,093	7,731

Catatan : Huruf cetak tebal adalah problema referensi

Tabel 6 : Hasil perhitungan sensitivitas ongkos bahan bakar untuk siklus 24 bulan.

Parameter Sensitiv.	Nilai	Derajat Bakar (MWhari/kgU)						
		30	35	40	45	50	55	60
Laju Diskon (%)	0	7,190	6,542	6,065	5,710	5,424	5,193	5,005
	5	7,765	7,136	6,691	6,361	6,108	5,912	5,760
	10	8,395	7,792	7,389	7,091	6,881	6,731	6,628
Harga U-Alam (\$)	32,5	6,622	6,062	5,664	5,372	5,147	4,973	4,837
	65	7,765	7,136	6,691	6,361	6,108	5,912	5,760
	130	10,051	9,283	8,745	8,339	8,029	7,791	7,607
Ongkos Perumahan (\$)	70	6,857	6,257	5,829	5,511	5,266	5,075	4,924
	110	7,765	7,136	6,691	6,361	6,108	5,912	5,760
	150	8,673	8,014	7,337	7,210	6,949	6,749	6,597
Ongkos Fabrikasi (\$)	200	7,667	7,050	6,615	6,274	6,012	5,808	5,650
	220+1.1(BU-40)	7,765	7,136	6,691	6,361	6,108	5,912	5,760
	350	8,403	7,689	7,182	6,783	6,475	6,234	6,045
Ongkos Ujung Belakang (\$)	800	9,393	8,514	7,879	7,405	7,036	6,745	6,514
	400	7,765	7,136	6,691	6,361	6,108	5,912	5,760
	1600	12,650	11,270	10,257	9,495	8,893	8,412	8,022

Catatan : Huruf cetak tebal adalah problema referensi

Tabel 7 : Keuntungan yang diperoleh dari penggantian daya untuk siklus panjang

Derajat Bakar (MWhari/kgU)	Pengeluaran Total /Tahun (juta\$)			Kenaikan Beaya (juta\$)		Saving dari Penggantian Daya (juta\$)		Keuntungan (juta\$)	
	12 bln.	18 bln.	24 bln.	12 ke 18	12 ke 24	12 ke 18	12 ke 24	12 ke 18	12 ke 24
30	31,05	35,44	39,10	4,39	8,05	5,5	8,33	1,16	0,28
35	28,78	32,69	35,93	3,92	7,16	5,5	8,33	1,63	1,17
40	27,14	30,77	33,69	3,64	6,56	5,5	8,33	1,91	1,77
45	26,06	29,36	32,03	3,30	5,97	5,5	8,33	2,26	2,36
50	25,30	28,27	30,76	2,97	5,46	5,5	8,33	2,58	2,87
55	24,54	27,44	29,77	2,89	5,22	5,5	8,33	2,66	3,10
60	24,06	26,83	29,00	2,77	4,94	5,5	8,33	2,78	3,39
Total	186,93	210,81	230,28	23,88	43,36	38,87	58,30	14,99	14,95
Rerata	26,70	30,12	32,90	3,41	6,19	5,5	8,33	2,14	2,14
%-tase	100	112,77	123,19	12,77	23,19	20,79	31,19	8,02	8,02

SIMPULAN

Dari hasil studi secara umum dapat disimpulkan bahwa untuk jenis reaktor yang ditinjau (PWR, 600 MWe), perpanjangan siklus dari 12 ke 18 bulan dengan derajat bakar bahan bakar yang sama akan menaikkan ongkos bahan bakar terlevelisasi dalam kisaran 5 - 8%, dan perpanjangan siklus dari 12 ke 24 bulan dengan derajat bakar bahan bakar yang sama akan menaikkan ongkos bahan bakar terlevelisasi dalam kisaran 10 - 16%. Kenaikan ongkos ter-utama disebabkan oleh naiknya ongkos untuk pembelian U-alam dan perkayaan. Keuntungan utama yang diperoleh dari perpanjangan siklus adalah adanya penghematan biaya yang diperlukan untuk membeli daya dari utiliti lain sebagai pengganti daya yang hilang dari sistem jaringan listrik akibat padamnya reaktor pada saat *annual outage*. Dengan asumsi yang dipakai, diperoleh keuntungan rerata 8% dari ongkos total bahan bakar siklus 12 bulan apabila siklus diperpanjang dari 12 ke 18 atau 24 bulan.

DAFTAR ACUAN

- [1]. BAMBANG HERUTOMO dkk., **Aspek Ekonomi Bahan Bakar Berderajat Bakar Tinggi**, Seminar Teknologi Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir II, BATAN, Jakarta 1994

- [2]. IAEA, **Water Reactor Fuel Extended Burnup Study**, IAEA TRS No. 343, 1992
- [3]. OECD NEA, **Economics of the Nuclear Fuel Cycle**, OECD, Paris, 1987
- [4]. ROBERT G. COHRAN et al., **The Nuclear Fuel Cycle : Analysis and Management**, ANS-1990
- [5]. IAEA, **World Nuclear Capacity and Fuel Cycle Requirements 1992**, Energy Information Administration - USA, 1993

TANYA JAWAB

1. Soeprapto Tjokrohardono

- Dalam analisis dipakai harga dasar uranium alam \$ 65/ kg. Mohon dijelaskan mengapa diambil harga tersebut, sepanjang yang saya ketahui harga uranium alam (U₃O₈) saat ini jauh dibawah nilai tersebut.

Bambang Herutomo

- Harga tersebut diambil dari harga yang direkomendasikan untuk WREBUS (*Water Reactor Extended Burnup Study*) yang dikoordinir oleh IAEA. Selain itu harga U-alam tersebut umumnya berkisar antara \$50 - \$80 / kg (*long term contract*) sehingga pengambilan harga \$65/ kg untuk analisis ini cukup representatif. Apabila dibandingkan dengan harga yang berlaku saat ini (*long term contract*), harga tersebut memang lebih tinggi. Dalam makalah, analisis

dengan harga saat ini juga dilakukan dalam perhitungan sensitivitas.

2. Nan Kusnadi

- Apakah uranium alam dapat dianggap elemen bakar ?
- Bagaimanakah jika cadangan uranium habis ?

Bambang Herutomo

- Uranium alam dalam bentuk pelet UO_2 tersinter telah digunakan sebagai bahan bakar PLTN jenis Reaktor Air Berat (PHWR, CANDU).
- Cadangan uranium di dunia ini cukup melimpah. Dan kecil kemungkinannya akan habis digunakan untuk PLTN karena PLTN memiliki keunikan dalam bahan bakarnya, yaitu dapat diproses ulang dan dapat dibiakkan. Selain itu thorium juga dapat digunakan sebagai bahan bakar yang mana cadangannya jauh lebih besar dibanding uranium.

3. Heryudo

- Bagaimana hubungan siklus panjang dengan *burnup* ?

- Apa keuntungan dari siklus panjang jika ditinjau dari segi operasi reaktor dalam kaitannya dengan ongkos pembangkitan ?

Bambang Herutomo

- Untuk teras reaktor dengan daya spesifik dan fraksi bahan bakar yang dimasukkan ke dalam teras pada saat isi ulang yang sama maka waktu siklus operasi yang lebih panjang akan menghasilkan burnup yang lebih tinggi dan untuk keperluan ini diperlukan bahan bakar dengan tingkat pengayaan yang lebih tinggi.
- Dengan cara *annual outage* yang sama, siklus panjang akan meningkatkan ketersediaan reaktor sehingga faktor kapasitas meningkat. Peningkatan faktor kapasitas dengan sendirinya akan menurunkan ongkos pembangkitan PLTN.