

## SEBUAH ANALISIS TERHADAP REAKTOR CEPAT UNTUK SISTEM DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR MAJU

Marsodi\*, R.S. Lasijo\*, Zuhair\*\*, M. Iyos R. Subki\*\*\*

\*Pusat Pengembangan Informatika

\*\* Pusat Reaktor Serba Guna

\*\*\* Deputi Pengkajian Sains Dan Teknologi Nuklir

### ABSTRAK

Perkembangan teknologi nuklir pada saat ini telah dilengkapi dengan penanganan terhadap daur bahan bakarnya secara konvensional yaitu dengan cara pengolahan kembali dan pemisahan. Dalam hal ini, reaktor cepat merupakan suatu piranti yang dapat menangani daur bahan bakar nuklir secara tepat, karena reaktor tersebut dapat mendaur-ulangkan bahan bakar nuklir dan dapat menghasilkan energi. Komposisi bahan bakar yang digunakan adalah sisa hasil pembakaran reaktor termal (LWR) dari 33 MWD/T setelah waktu pendinginan 150 hari. Ke dalam reaktor tersebut juga dapat dimasukkan isotop-isotop lain dari transuranium, yang selanjutnya akan berfungsi ganda menjadi reaktor pembakar/transmutasi (reaktor B/T). Dalam penelitian ini penanganan terhadap penggunaan bahan bakar plutonium khususnya telah dievaluasi dengan menggunakan metode difusi 26-grup energi pada kondisi awal siklus (BOC) dan kondisi akhir siklus (EOC). Analisis ini dilakukan dengan menggunakan pendingin Na, Pb dan gas He. Dapat disimpulkan bahwa khusus untuk plutonium, efektivitas penanganannya lebih baik bila menggunakan pendingin gas He.

### ABSTRACT

*At the recent time, the establishment of nuclear technology has readily been equipped with conventional nuclear fuel cycle, i.e. by reprocessing of spent fuel followed by partitioning. In this respect the fast reactor constitutes a device that can treat nuclear fuel cycle appropriately because the reactor could recycle the nuclear and produce energy. The composition of fuel used in the reactor is the composition of discharged fuel of 33 MWD/T - LWR after 150 days of cooling. This reactor could also be introduced with transuranic isotopes and therefore will become a burning/transmutation reactor (B/T reactor). In this research, the treatment on the use of plutonium was especially evaluated using 26-group diffusion method either at the beginning of cycle (BOC) as well as at the end of cycle (EOC). The analysis was performed assuming the use of sodium (Na), lead (Pb), and helium (He) gas. It was found that, especially for plutonium, the effectiveness of treatment could be achieved by using He gas coolant.*

### PENDAHULUAN

Penggunaan sistem energi nuklir menjadi sebuah alternatif dalam memperoleh sumber energi yang cukup memadai dalam menunjang kebutuhan akan energi untuk industrialisasi. Pada umumnya penggunaan sumber energi tersebut adalah menggunakan sebuah reaktor nuklir yang sebagian besar adalah dari jenis reaktor berpendingin air atau yang dikenal dengan LWR (*Light Water Reactor*). Walaupun penggunaan sumber energi bertenaga nuklir merupakan sebuah pilihan yang sampai saat ini dirasakan cukup tepat dengan kemajuan teknologi penunjangnya yang cukup memadai, namun berbagai macam kendala masih belum seluruhnya dapat ditangani khususnya dalam hal pengolahan sisa bahan bakar yang dihasilkannya. Pada saat sekarang ini, sebagian kebutuhan listrik di negara-negara industri khususnya dihasilkan oleh reaktor nuklir yang mana kebanyakan menggunakan reaktor jenis LWR. Dengan kata lain bahwa jumlah sisa bahan bakarnya adalah cukup banyak

dan bahkan di negara-negara tertentu melimpah, ini berarti bahwa kalau tidak dilakukan penanganan yang cukup memadai maka sisa bahan bakar tersebut akan sangat membahayakan bagi kelangsungan hidup manusia itu sendiri khususnya dari isotop-isotop (hasil belah) berwaktu paruh panjang seperti Plutonium, minor aktinida dan hasil belah berwaktu paruh panjang lainnya (LLFPs, *long-lived fission product*). Oleh karena itu perlu kiranya diupayakan untuk mendapatkan sebuah piranti yang dapat menangani atau memanfaatkan kembali sisa bahan bakar yang dihasilkan oleh reaktor nuklir.

Reaktor cepat dalam sistem daur ulang bahan bakar nuklir maju dapat berperan sebagai sebuah piranti yang dapat menunjang penggunaan sebuah sistem teknologi nuklir. Penggunaan reaktor cepat untuk mendaurulangkan bahan bakar nuklir merupakan langkah yang cukup tepat karena reaktor cepat ini menggunakan sistem bahan bakar yang terkandung dalam sisa bahan bakar LWR yang mana jumlahnya



sebanding dengan penggunaan LWR. Penggunaan bahan bakar tersebut tentunya harus melalui tahap pengolahan kembali (*reprocessing*) yang mana setelah itu dilakukan pemilihan isotop-isotop yang akan digunakan kembali dan dilakukan fabrikasi bahan bakar reaktor cepat sesuai dengan komposisi disain.

Tujuan utama dari riset ini adalah menajagi kemungkinan untuk membangun sebuah reaktor cepat untuk dapat memanfaatkan kembali sisa bahan bakar dari LWR sebagai alternatif untuk mendaur ulangkan sisa bahan bakar terutama Uranium dan Plutonium karena reaktor cepat memiliki karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan tersebut. Survey yang dilakukan dalam menentukan parameter-parameter yang mendasar dari riset ini adalah menggunakan isotop U (U-235, U-238) dan Pu (Pu-239, Pu-240, Pu-241 dan Pu-242). Disain reaktor yang digunakan adalah jenis reaktor cepat (*fast reactor*) dengan kapasitas daya 3000 MWt.

Akhirnya, dari hasil riset yang telah dicapai ini dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan sebuah reaktor cepat untuk mendaur ulangkan sisa bahan bakar nuklir khususnya Uranium dan Plutonium adalah baik dan laik dikembangkan dalam rangka mengefektifkan penggunaan bahan bakar disamping juga dapat membantu dalam menangani masalah lingkungan. Reaktor cepat ini juga dimungkinkan dapat digunakan untuk membakar/ mentransmutasi isotop-isotop lain yang terkandung dalam sisa bahan bakar LWR misalnya isotop-isotop berwaktu paruh panjang yang sangat berbahaya seperti MA (*minor actinides*) dan LLFPs (*long-lived fission product*).

### METODE PERHITUNGAN

Reaktor cepat merupakan sebuah reaktor yang diharapkan dapat menjadi sebuah alternatif yang baik dalam penggunaan kembali sisa bahan bakar dari reaktor daya jenis LWR Plutonium (Pu) dan Uranium (U). Reaktor tersebut didisain dengan menggunakan blangket dalam rangka untuk mendaur ulangkan sisa bahan bakar U-238 dari LWR menjadi Pu-239 yang akan digunakan sebagai bahan bakar pokok pada sebuah reaktor cepat dan juga dapat dipergunakan untuk mentransmutasi isotop-isotop lainnya seperti Pu-238 menjadi Pu-239. Evaluasi terhadap transmudasi dari isotop-isotop lain juga dilakukan terutama pada isotop-isotop plutonium dan minor aktinida yang dalam hal ini dicampurkan secara homogen pada bahan bakar reaktor tersebut. Sebuah evaluasi terhadap pengaruh spektrum neutron yang merupakan hal yang sangat penting

juga dilakukan, karena pada reaktor cepat interval energinya sangat lebar (dari daerah termal sampai daerah cepat) baik untuk tangkapan (*capture*) atau pembelahan (*fission*) apabila dibandingkan dengan reaktor termal. Metode perhitungan reaktor ini dilakukan dengan menggunakan metode difusi multigrup<sup>1</sup>, seperti diperlihatkan pada persamaan berikut, karena perhitungan untuk disain reaktor cepat kebanyakan menggunakan metode difusi disamping juga bahwa metode difusi ini lebih sederhana dibandingkan dengan metode-metode lainnya. Multigrup energi tersebut diungkapkan dalam neutron per satuan volume per detik termasuk didalamnya kebocoran (*leakage*)  $(-D_g \nabla^2 \phi_g)$ , absorpsi  $(\Sigma_{a,g} \phi_g)$  yang termasuk tangkapan (*capture*) dan fisi  $(\Sigma_{f,g} = \Sigma_{c,g} + \Sigma_{f,g})$  pindahan (*removal*) dengan hamburan elastis  $(\Sigma_{r,g} \phi_g)$  dan hamburan non-elastis  $(\Sigma_{r,g} \phi_g)$ . Persamaan multigrupnya diberikan sebagai berikut;

$$(-D_g \nabla^2 \phi_g) + (\Sigma_{a,g} = \Sigma_{c,g} + \Sigma_{r,g}) = \frac{1}{k_{eff}} \chi_g \sum_{g'=1}^G (\nu \phi_{g'})_g \cdot \phi_g + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g \rightarrow g'} \phi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{g \leftarrow g'} \phi_{g'} \dots \dots \dots (1)$$

dimana  $k_{eff}$  adalah faktor penggandaan dari keseimbangan antara neutron yang dihasilkan dan neutron yang hilang. Dalam analisis multigrup ini, perhitungan dilakukan dengan menggunakan 26-grup energi dari penampang lintang data nuklir untuk material reaktor cepat yang diperoleh dari Bondarenko<sup>2</sup>. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan analisis satu dimensi pada arah radial dengan geometri silinder. Evaluasi terhadap laju transmudasi dari isotop-isotop plutonium khususnya dilakukan dengan menggunakan perhitungan deplesi dengan perubahan reaksi berantai. Perhitungan deplesi tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan diferensial simultan dengan metode solusi numerik dari Runge-Kutta-Gill.

$$\frac{dN^i(t)}{dt} = \eta^i \sum_g \chi_g \phi_g \sigma_g^f N^f + \sum_j \lambda^j N^j - \sum_k \phi_k \sum_g f^{kg} \sigma_g^a N^k - (\lambda^i + \sum_g \phi_g \sigma_g^a N^i) \dots \dots \dots (2)$$

$$(i, j, k = 1, 2, \dots, M), (g = 1, 2, \dots, G)$$

dimana  $N^i(t)$  adalah jumlah kerapatan atom ke  $i$ ,  $\chi_g$  adalah fraksi dari neutron yang dihasilkan pada setiap fisi,  $\eta^i$  adalah fraksi hasil pembelahan atom ke  $i$ ,  $f^{kg}$  adalah fraksi penyerapan neutron dari  $k$  ke

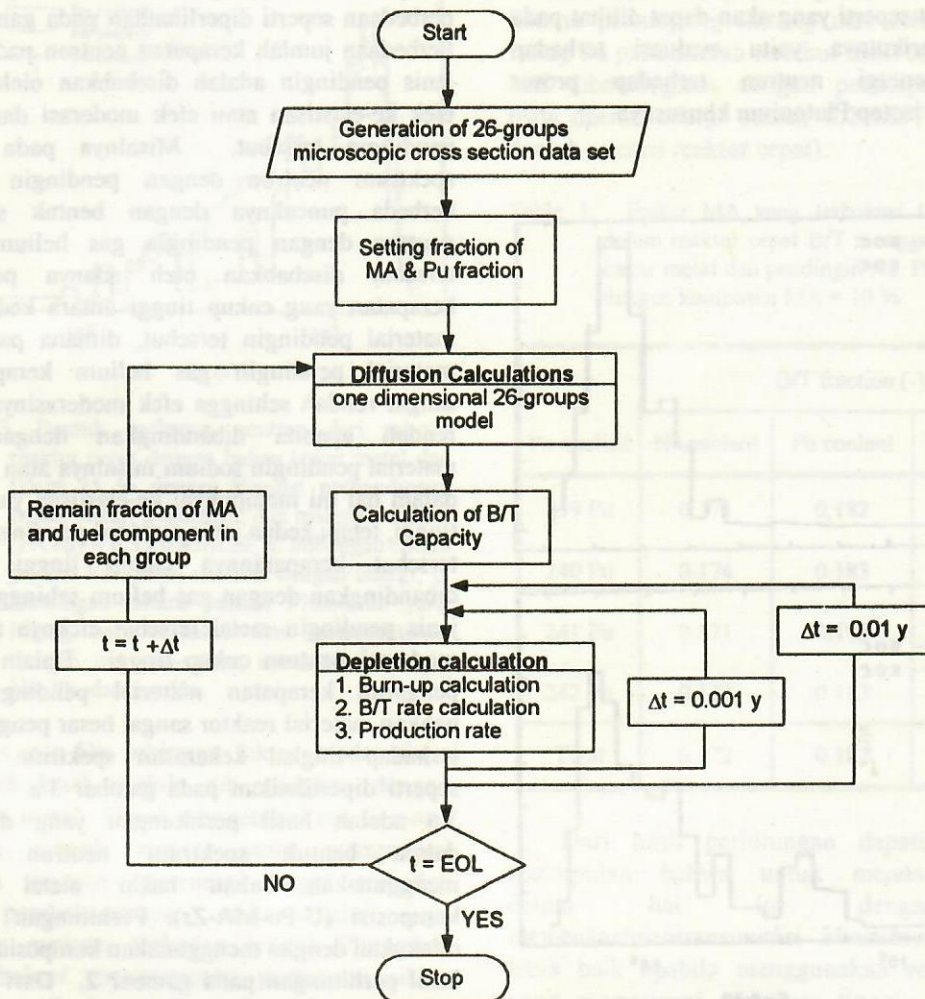


$\lambda^i$  adalah konstanta peluruhan radioaktif dari atom ke  $i$ ,  $\sigma_g$  adalah penampang lintang atom ke  $i$ ,  $M$  adalah jumlah total isotop dalam rantai pembakaran/transmutasi, dan  $G$  adalah jumlah energi grup. Model perhitungan yang dilakukan dapat dilihat pada diagram alir yang ditunjukkan pada gambar 1 di atas.

### HASIL PERHITUNGAN DAN BAHASAN

Analisis terhadap kemampuan reaktor cepat dalam menggunakan kembali sisa bahan bakar LWR dilakukan dengan menggunakan tiga

macam pendingin seperti sodium (Na), timah (Pb), dan gas helium (He). Dalam evaluasi ini hanya ditekankan khususnya pada analisis terhadap plutonium karena disamping plutonium dapat digunakan sebagai bahan bakar tetapi plutonium itu sendiri mempunyai waktu paruh yang panjang khususnya Pu-239 yang mempunyai waktu paruh kurang lebih  $4 \times 10^5$  tahun sehingga memerlukan penanganan yang khusus. Dalam kesempatan ini juga dilakukan analisis terhadap bentuk spektrum neutron-nya baik pada kondisi awal maupun pada kondisi akhir siklus.



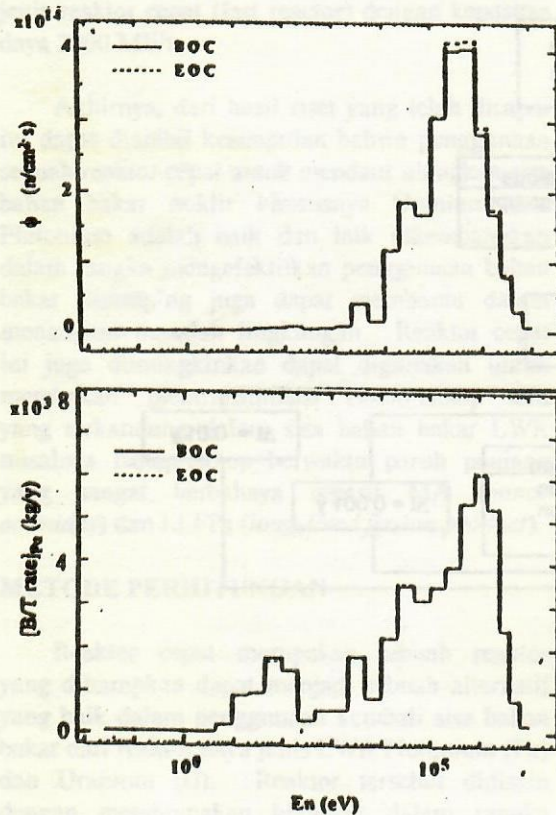
Gambar 1. Diagram alir perhitungan reaktor cepat dengan menggunakan metode difusi multi-grup.

Gambar 2 memperlihatkan hasil perhitungan dari bentuk spektrum neutron dan pengaruhnya terhadap laju pembakaran Pu pada kondisi awal dan pada kondisi akhir siklus. Dari hasil evaluasi menunjukkan bahwa bentuk spektrum neutron baik pada kondisi awal maupun pada kondisi akhir siklus ternyata tingkatan energinya tidak berbeda tetapi jumlah kerapatan neutronnya ada sedikit terdapat perbedaan seperti diperlihatkan

pada gambar 2.a. Perbedaan jumlah kerapatan neutron pada kondisi awal dengan kondisi akhir siklus adalah disebabkan oleh adanya kemungkinan tertransmutasinya U-238 menjadi bahan bakar (Pu-239) yang pada kesempatan ini jumlah pertambahan bahan bakar-nya belum dievaluasi. Dari hasil tersebut dapatlah diambil kesimpulan bahwa evaluasi kasar terhadap sebuah perhitungan reaktor khususnya yang berkaitan



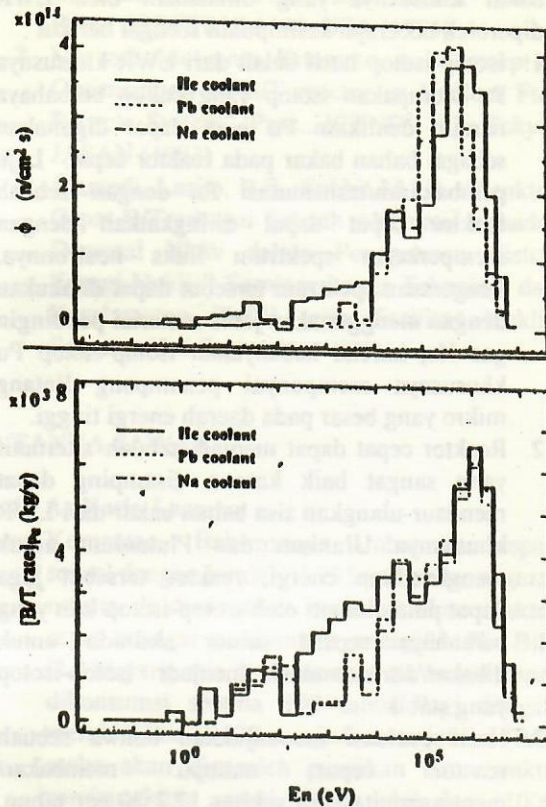
dengan laju pembakaran atau jumlah Pu yang telah digunakan dalam suatu siklus dapat dilakukan pada kondisi awal saja, tetapi untuk evaluasi lebih detail terhadap neutronik, maka kedua kondisi baik awal siklus atau akhir siklus perlu dilakukan. Lebih dari itu disini juga dilakukan evaluasi terhadap jumlah Plutonium yang digunakan pada satu siklus seperti diperlihatkan pada gambar 2.b. Seperti dapat dilihat pada gambar tersebut bahwa kerapatan neutron tidaklah begitu berpengaruh terhadap jumlah pembakaran Plutonium apabila dibandingkan dengan besarnya pengaruh yang disebabkan oleh kenaikan tingkat energi dari reaktor cepat seperti yang akan dapat dilihat pada evaluasi berikutnya yaitu evaluasi terhadap pengaruh energi neutron terhadap proses pembakaran isotop Plutonium khususnya.



Gambar 2. Bentuk spektrum neutron dari sebuah reaktor cepat dengan bahan bakar metal dan pendingin Sodium dan  $[Pu] = 25\%$  dengan kondisi perbandingan bahan bakar, pendingin, dan material reaktor (F/C/S) = 0.35/0.43/0.22 pada kondisi awal dan akhir siklus; a. hubungan antara jumlah kerapatan neutron dengan energi, b. Hubungan antara jumlah Plutonium yang hilang baik terbakar atau tertransmutasi.

Gambar 3 memperlihatkan hasil perhitungan dari bentuk spektrum neutron dan pengaruhnya terhadap laju pembakaran Pu dengan pendingin yang berbeda yaitu gas helium (He), Pb, dan sodium (Na). Pada umumnya reaktor cepat mempunyai puncak spektrum fluks neutron 0.2 ~ 0.4 MeV. Spektrum tersebut akan sangat bergantung kepada penggunaan material bahan bakar dan/atau pendingin khususnya. Dari hasil evaluasi menunjukkan bahwa bentuk spektrum neutron dengan menggunakan ketiga jenis pendingin ternyata memberikan pengaruh terhadap tingkatan energinya dan jumlah kerapatan neutronnya ada sedikit terdapat perbedaan seperti diperlihatkan pada gambar 3.a. Perbedaan jumlah kerapatan neutron pada ketiga jenis pendingin adalah disebabkan oleh adanya efek ke-elastisan atau efek moderasi dari ketiga pendingin tersebut. Misalnya pada bentuk spektrum neutron dengan pendingin sodium berbeda puncaknya dengan bentuk spektrum neutron dengan pendingin gas helium. Hal tersebut disebabkan oleh adanya perbedaan kerapatan yang cukup tinggi antara kedua jenis material pendingin tersebut, dimana pada jenis material pendingin gas helium kerapatannya sangat rendah sehingga efek moderasinya sangat rendah apabila dibandingkan dengan jenis material pendingin sodium misalnya atau Pb yang dalam hal ini mempunyai ke-elastisan yang lebih tinggi, tetapi kedua jenis material pendingin metal tersebut kerapatannya cukup tinggi apabila dibandingkan dengan gas helium sehingga kedua jenis pendingin metal tersebut efeknya terhadap moderasi neutron cukup tinggi. Dalam hal ini pengaruh kerapatan material pendingin atau bahkan material reaktor sangat besar pengaruhnya terhadap tingkat kekerasan spektrum neutron seperti diperlihatkan pada gambar 3.a. Gambar 3.a adalah hasil perhitungan yang diperoleh dalam bentuk spektrum neutron dengan menggunakan bahan bakar metal dengan komposisi (U-Pu-MA-Zr). Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan komposisi seperti hasil perhitungan pada gambar 2. Dari gambar tersebut dapatlah disimpulkan bahwa dengan menggunakan pendingin gas Helium, spektrum neutron lebih keras pada tingkatan energi antara 0.4~0.8 MeV atau grup energi yang ke 6 dalam perhitungan 26 grup energi, sedangkan spektrum neutron dengan menggunakan pendingin metal Na dan Pb hanya berkisar antara 0.2~0.4 MeV atau grup energi ke 7 dalam perhitungan grup energi yang sama. Hal itu disebabkan oleh karena adanya efek yang cukup besar terhadap jumlah kerapatan material





Gambar 3. Bentuk spektrum neutron dari sebuah reaktor cepat dengan bahan bakar metal dan [Pu]= 25 % dengan kondisi perbandingan bahan bakar, pendingin, dan material reaktor (F/C/S) = 0.35/0.43/0.22, a. hubungan antara jumlah kerapatan neutron dengan energi, b. Hubungan antara jumlah Plutonium yang hilang baik terbakar atau tertransmutasi dengan menggunakan material pendingin Na, Pb, dan gas He.

pendingin gas He sehingga faktor moderasinya jauh lebih kecil apabila dibandingkan dengan pendingin metal. Untuk mengetahui sejauh mana pengaruh sebuah reaktor yang mempunyai spektrum neutron ber-energi tinggi terhadap proses pembakarannya, maka disini juga dilakukan evaluasi terhadap jumlah Plutonium yang terbakar/ tertransmutasi pada satu siklus seperti diperlihatkan pada gambar 2.b yang mana kerapatan neutronnya tidaklah begitu berpengaruh terhadap jumlah pembakaran Plutonium apabila dibandingkan dengan besarnya pengaruh yang disebabkan oleh tingginya tingkat energi neutron seperti yang diperlihatkan pada hasil perhitungan pada gambar 3.b. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada daerah energi sekitar 0.2 MeV jumlah laju pembakarannya jauh lebih tinggi pada penggunaan material pendingin gas He dibandingkan dengan yang lainnya. Hal tersebut juga terlihat pada daerah energi tinggi diatas 0.4 MeV.

Dalam perhitungan laju pembakaran/ transmudasi yang dilakukan dengan analisis per energi grup seperti diperlihatkan pada gambar 2 dan gambar 3 di atas, jumlah fraksi laju pembakaran/ transmudasi dari masing-masing isotop dari seluruh tingkatan energi tersebut ditunjukkan pada tabel 1. Seperti diperlihatkan pada tabel 1, bahwa pengaruh dari pengerasan spektrum fluks neutron terhadap jumlah fraksi laju pembakaran/ transmudasi tersebut cukup besar, hal tersebut akan semakin efektif apabila dapat ditemukan sebuah metode untuk menaikkan tingkat kekerasan spektrum fluks neutron pada sebuah reaktor cepat sampai dengan sekitar 1 MeV, karena penampang lintang dari sebagian besar isotop Pu pada daerah tersebut lebih besar puluhan kali dibandingkan dengan penampang lintang pada daerah energi sekitar 0.2 MeV (umumnya daerah operasi reaktor cepat).

Table 1. Fraksi MA yang terbakar/ tertransmutasi dalam reaktor cepat B/T menggunakan bahan bakar metal dan pendingin Na, Pb, dan gas He dengan komposisi MA = 10 %

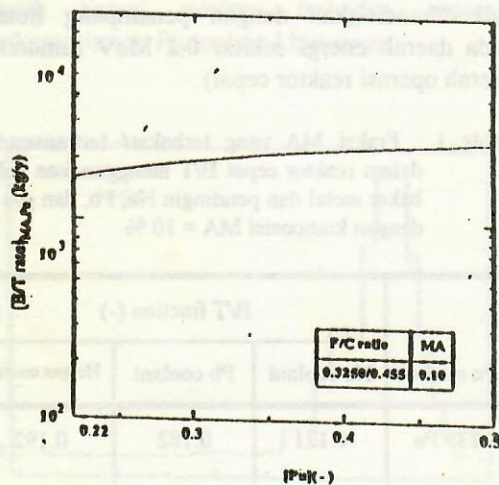
Pu nuclide	B/T fraction (-)		
	Na coolant	Pb coolant	He gas coolant
239 Pu	0.171	0.182	0.192
240 Pu	0.174	0.183	0.200
241 Pu	0.171	0.182	0.195
242 Pu	0.172	0.183	0.199
Total	0.172	0.182	0.197

Dari hasil perhitungan dapatlah diambil kesimpulan bahwa untuk mendaur-ulangkan dalam hal ini dengan cara membakar/mentransmutasi khususnya Pu akan lebih baik apabila menggunakan reaktor cepat yang mempunyai spektrum tinggi. Untuk itu perlu kiranya mendisain sebuah reaktor yang mempunyai karakteristik khusus sehingga dapat mendaur-ulangkan Plutonium serta Uranium secara efektif baik dalam pemanfaatan limbah demi untuk menghasilkan kembali energi ataupun untuk menangani (membakar/ mentransmutasi) limbah yang sekiranya dapat membahayakan apabila tidak dilakukan penanganan secara baik.

Dalam perhitungan ini, dilakukan juga analisis terhadap pengaruh pemuatan Pu pada laju pembakaran/ transmudasi Pu itu sendiri.



Perhitungan ini dilakukan dengan menambahkan jumlah pemuatan Pu sebagai pengganti pada pengurangan jumlah Uraniumnya. Seluruh perhitungan ini dilakukan dalam kondisi kritik seperti dijelaskan di atas, dan bahan bakarnya diasumsikan tercampur secara homogen di dalam bahan bakar reaktor cepat. Hasil perhitungannya diperlihatkan pada gambar 3. Laju pembakaran dari isotop tersebut pada umumnya adalah naik dengan kenaikan jumlah pemuatan Pu. Dari hasil analisis, ternyata penambahan Pu tersebut menyebabkan kenaikan fluks netron yang mana menjadi penyebab pada naiknya laju pembakaran Pu, penambahan pemuatan Pu juga menyebabkan



Gambar 4. Laju pembakaran Pu dengan variasi penambahan pemuatan Pu itu sendiri dalam komposisi perbandingan F/C/S = 0.325/0.455/0.220, Pu = 0.25 dari bahan bakar metal.

adanya sedikit kenaikan pada spektrum fluks neutronnya. Dari hasil analisis didapatkan bahwa laju pembakaran/transmutasi Pu dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah pemuatan Pu itu sendiri.

Dalam rangka pemanfaatan kembali sisa bahan bakar khususnya Pu dengan jumlah yang sangat besar yang akan dihasilkan oleh reaktor nuklir jenis LWR setiap tahunnya, perlu kiranya diambil langkah yang strategis yaitu dengan mendaur ulang sisa pembakaran/transmutasi dalam reaktor cepat sehingga diperoleh sebuah sistem pembangkit energi yang simultan.

## SIMPULAN

Hasil evaluasi terhadap sebuah konsep reaktor cepat untuk mendaur-ulangkan sisa bahan

bakar khususnya yang dihasilkan oleh LWR diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Isotop-isotop hasil belah dari LWR khususnya Pu merupakan isotop yang cukup berbahaya namun demikian Pu juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pada reaktor cepat. Laju pembakaran/transmutasi Pu dengan sebuah reaktor cepat dapat ditingkatkan dengan memperkeras spektrum fluks neutronnya. Pengerasan spektrum tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan jenis material pendingin gas He, karena kebanyakan isotop-isotop Pu khususnya mempunyai penampang lintang mikro yang besar pada daerah energi tinggi.
2. Reaktor cepat dapat menjadi sebuah alternatif yang sangat baik karena disamping dapat mendaur-ulangkan sisa bahan bakar dari LWR khususnya Uranium dan Plutonium untuk menghasilkan energi, reaktor tersebut juga dapat pula dimuati oleh isotop-isotop lain yang berbahaya seperti minor aktinida untuk dibakar/ditransmutasi menjadi isotop-isotop yang stabil.
3. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sebuah reaktor cepat mampu membakar/mentransmutasi Pu sekitar 17.2 % per tahun, dan sisa bahan bakar reaktor cepat tersebut-pun dapat dilakukan daur ulang kembali sehingga memungkinkan untuk mendapatkan sebuah manfaat yang lebih banyak dan besar karena disamping dapat menghasilkan energi reaktor cepat juga menghemat bahan bakar alam dan dapat membantu menciptakan lingkungan yang bersih dan aman khususnya dari efek limbah radioaktif berbahaya yang berwaktu paruh sangat panjang.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Waltar, A.E., Reynolds, A.B., "Fast Breeder Reactor", Pergamon Press (1981)
2. Bondarenko, I.I., "Group Constants for Nuclear Reactor Calculation", Consultant Bureau, New York (1964)
3. Mc Lane, V., Dunford, C.L., Rose, P.F., "Neutron Cross Sections", Vol. 2. Neutron Cross Sections Curve, Academic Press (1988)
4. Bultman, J.H., and C.L. Cockey and T. Wu, "Actinide Breeding and Burning in Metallic and Oxide Fuel ALMR Cores", Proc. GLOBAL '93, Seattle (1993)
5. Wakabayashi, T., Ikegami, T., "Characteristics of An LMFBR Core Loaded with MA and RE Containing Fuel", Proc. GLOBAL '93, Seattle (1993)
6. Kitamoto, A., Marsodi, Mulyanto, "Special Characteristics of B/T reactor for



Minimization of HLW and Hazard Index", Proc., SPECTRUM '94, USA (1994)

7. Marsodi, Mulyanto, Kitamoto, A., "Concept & Optimization of B/T reactor in Nuclear Fuel Recycle System", Proc., ICENES '93, Tokyo-JAPAN (1993)
8. Marsodi, Lasijo, R.S., Subki, M.I.R., "Reaktor Cepat B/T sebagai Sebuah Alternatif terhadap Disposasi HLW dalam Penggunaan Sistem Energi Nuklir", Seminar ketiga Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, Serpong (5-6 September 1995)

## TANYA JAWAB

### 1. As Natio Lasman

- Komentar : Bahwasanya lambat atau cepat, sesuai dengan jumlah U-235 yang ada, negara-negara di dunia akan memanfaatkan reaktor cepat sebagai pembangkit energi/listrik. Bila U-235 yang ada di dunia saat ini hanya dapat dikonsumsi selama 190 tahun lagi dengan membiakkan U-238 menjadi material fisi (Pu), maka akan diperoleh kenaikan lama waktu pembangkitan energi hingga lebih dari 11000 tahun. Masalahnya sekarang siapa yang menikmati energi tersebut ? Jawabannya adalah mereka yang mempunyai PLTN.

### 2. Marwoto

- Untuk mengoperasikan suatu reaktor, pertimbangan yang paling utama adalah aspek keselamatan/keamanan operasi reaktor itu sendiri. Mohon Saudara jelaskan, mengingat berkas elemen bakar bekas telah mengalami perlakuan sehingga tidak sekuat seperti ketika masih segar. Bagaimana metoda untuk mengukur dan menetapkan bahwa EB bekas itu dapat dipakai di reaktor cepat, dipandang dari aspek keselamatan perngoperasian reaktor cepat.

### Marsodi

- Untuk penetapan EB bekas perlu dilakukan *reprocessing* untuk memilih isotop-isotop yang akan digunakan (EB bekas tidak langsung digunakan). Mengenai aspek keselamatan itu memang sudah jelas menjadi faktor penting dalam operasi reaktor. Aspek keselamatan dalam reaktor cepat yang dimanfaatkan untuk transmudasi tentunya harus disesuaikan dengan standard keselamatan yang telah ditentukan. Perlakuan bahan bakar bekas adalah harus *direprocessing* kemudian *dipartitioning* untuk mengambil unsur Pu yang digunakan untuk bahan bakar. Pu perlakuannya seperti halnya

isotop lain karena dia sudah menjadi unsur bebas walaupun berasal dari isotop bekas.

### 3. Siti Amini

- Pada kesimpulan (1) Pu merupakan isotop berbahaya, ini adalah hasil kajian teoritis bukan analisis ybs.
- Pemanfaatan EB bekas LWR untuk reaktor cepat, memerlukan *reprocessing* untuk penyiapan EB-nya. Bagaimanakah aspek praktis dan ekonomisnya ?

### Marsodi

- Pu merupakan isotop yang berbahaya ini adalah hasil kajian teoritis dan analisis para peneliti isotop ybs. bukan oleh penulis makalah ini ( dipakai sebagai pernyataan sebab dan kalau sebabnya demikian maka langkahnya adalah demikian )
- Aspek praktis dan ekonomis memang perlu dikaji lebih mendalam, dalam hal ini aspek yang ditinjau adalah kemungkinan pemanfaatan/ penggunaan kembali limbah radioaktif yang dihasilkan LWR sebagai salah satu langkah untuk sistem pembangkit energi yang bersih lingkungan (*clean energy system*) dan pemanfaatan untuk memperpanjang sumber energi.

### 4. Nurokhim

- Mohon diperjelas model fisik, model matematik dan/atau metode perhitungan yang dilakukan.
- Bagaimana status perkembangan sampai saat ini (metode ini) untuk pengolahan/transmutasi limbah radioaktif.

### Marsodi

- Model fisiknya adalah similar dengan model reaktor cepat umumnya, model matematiknya (perhitungan) dengan menggunakan metode perhitungan multigrup dengan persamaan deplesi (bisa dilihat pada buku *fast breeder reactor* oleh Duderetadt. et al. atau buku-buku *fast reactor* lainnya).
- Status perkembangan (reaktor tranmutasi) sampai saat ini masih dalam konsep penelitian dan transmudasi limbah radioaktif eks. TRU sampai saat ini masih dilakukan dengan metode yang lain dan yang menggunakan reaktor baru sampai memasukkan limbah radioaktif eks TRU tersebut ke dalam reaktor pembangkit energi yang ada sekarang. Jadi reaktor transmudasi (khusus) masih dalam konsep/ penelitian.