

ANALISIS FLUKS NEUTRON DAN NUKLIDA RESIDU HASIL REAKSI SPALASI PADA TARGET TUNGSTEN DAN LEAD-BISMUTH EUTECTIC (LBE)

Dyah Fitriana Masithoh

Program Studi Pendidikan Fisika PMIPA FKIP UNS
Jl. Ir. Sutami 36A Surakarta, e-mail: dfm_ana@yahoo.com

Abstrak

Telah dilakukan analisis fluks neutron dan nuklida residu pada bahan target reaksi spalasi sistem *Accelerator Driven System* (ADS) hasil reaksi spalasi antara proton berenergi tinggi dengan bahan target Tungsten (W) dan *Lead-Bismuth Eutectic* (LBE) menggunakan program simulator FLUKA. Bahan target reaksi spalasi dimodelkan sebagai silinder yang masing-masing berdiameter 20 cm dan panjang 80 cm. Bahan target reaksi spalasi tersebut ditembak dengan proton searah sumbu silinder target dengan energi berkas proton antara 100 – 1000 MeV. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fluks neutron cepat yang mencapai permukaan kedua bahan target pada rentang energi proton 200 – 500 MeV adalah 10^{12} n/cm²/s dan pada rentang 600 – 1000 MeV adalah 10^{13} n/cm²/s pada arus proton 1 mA. Reaksi spalasi dengan target W menghasilkan 11 jenis nuklida residu pemancar α berumur panjang, di antaranya unsur tanah jarang ¹⁴⁶Sm ($T_{1/2}=1.03 \times 10^8$ tahun), ¹⁵⁰Gd ($T_{1/2}=1.79 \times 10^6$ tahun) dan ¹⁵⁴Dy ($T_{1/2}=3 \times 10^6$ tahun). Sedangkan PbBi menghasilkan 8 nuklida residu pemancar α berumur panjang, di antaranya ¹⁸⁴Os ($T_{1/2} > 5.6 \times 10^{13}$ tahun), ¹⁸⁶Os ($T_{1/2} = 2.00 \times 10^{15}$ tahun), ¹⁹⁰Pt ($T_{1/2} = (6.5 \pm 0.3) \times 10^{11}$ tahun), ²⁰⁴Pb ($T_{1/2} > 1.4 \times 10^{17}$ tahun), dan ²⁰⁹Bi ($T_{1/2} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{19}$ tahun).

Kata kunci : *Accelerator Driven System* (ADS), reaksi spalasi, simulasi komputer

Pendahuluan

PLTN selain menghasilkan energi juga menghasilkan limbah, berupa bahan bakar bekas yang mengandung unsur-unsur radioaktif berumur panjang yang memerlukan penanganan dengan manajemen yang tepat.

Bahan bakar bekas suatu PLTN mengandung unsur-unsur dalam kelompok deret *trans uranium* (TRU), *minor actinide* (MA) dan *long lived fission product* atau LLFP [1]. Radioisotop yang termasuk dalam deret MA antara lain ²³⁷Np, ²⁴¹Am, ²⁴³Am, ²⁴²Cm, dan ²⁴⁴Cm, sedangkan deret TRU meliputi unsur dengan nomor atom lebih besar dari nomor atom uranium (92), yaitu neptunium, plutonium, americium, curium, californium, einsteinium, fermium, mendelevium, nobelium, dan lawrencium. Unsur-unsur seperti ¹²⁹I, ¹³⁵Cs, ⁹⁹Tc, ⁹³Zr, dan ¹⁰⁷Pd merupakan unsur-unsur hasil fisi yang mempunyai umur panjang. Salah satu upaya penanganan limbah nuklir adalah dengan mentransmutasi unsur-unsur fisi berumur panjang radioisotop berumur panjang menjadi radioisotop berumur lebih pendek atau unsur stabil.

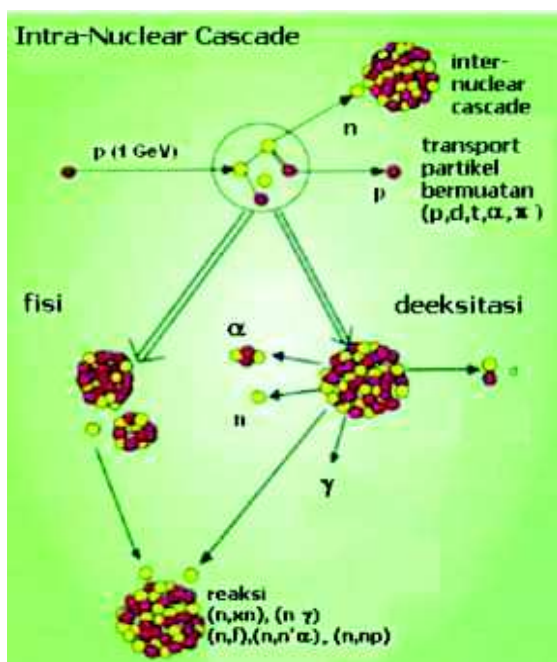
Accelerator Driven System (ADS) adalah sistem hibrida akselerator proton yang dilengkapi sistem target dan reaktor subkritik yang dapat mentransmutasi radioisotop sekaligus menghasilkan energy. Pada ADS sumber neutron reaktor subkritik adalah hasil reaksi spalasi yang terjadi antara partikel proton berenergi tinggi (proyektil) dengan bahan target unsur berat. Bahan target spalasi ini diletakkan di dalam teras reaktor subkritik yang di sekitarnya diletakkan bahan bakar bekas. Berkas partikel proyektil dari

akselerator ditembakkan ke dalam bahan target spalasi yang terbuat dari logam berat. Selanjutnya partikel proyektil berinteraksi dengan inti berat menghasilkan neutron yang dipakai untuk melakukan transmudasi limbah radioisotop berumur panjang.

Sistem *Accelerator Driven System* (ADS) terdiri dari tiga bagian utama, akselerator partikel, target reaksi spalasi dan teras reaktor subkritik. Akselerator berfungsi untuk mempercepat partikel proton sehingga energinya mencapai orde ratusan MeV hingga GeV, yang kemudian ditembakkan ke target spalasi dan menghasilkan neutron. Neutron yang dihasilkan kemudian digunakan sebagai sumber neutron pada teras reaktor subkritik. Secara umum ADS dapat dipahami sebagai sistem reaktor subkritik yang dikendalikan oleh akselerator. Reaksi fisi pada ADS hanya akan berlangsung selama terdapat sumber neutron. Jika akselerator sebagai sumber proton yang menginduksi terjadinya reaksi spalasi tersebut mati maka reaksi fisi pun akan terhenti.

Suatu berkas proton atau deuteron berenergi tinggi menumbuk bahan target inti berat, akan terjadi reaksi spalasi sehingga beberapa neutron akan terlontarkan [2]. Pada energi yang cukup tinggi, mekanisme reaksi tidak melalui tahap pembentukan inti majemuk, tetapi proton yang dipercepat mendorong keluar sejumlah nukleon dan/atau partikel ringan dari dalam target dan menyisakan inti residu. Pada tahap pertama proses spalasi (*intra nuclear cascade*), partikel proton datang dan secara langsung berinteraksi dengan nukleon individu dari inti target sehingga partikel sekunder berenergi

tinggi terlontarkan. Energi dipindahkan dari partikel proton yang datang ke inti target, menyebabkan inti tersebut berada di tingkat eksitasi yang tinggi. Pada tahap kedua (*inter nuclear cascade*) terjadi deeksitasi melalui evaporasi dan fisi, inti-inti target "menguapkan" sejumlah besar nukleon (*cluster*) dengan energi yang lebih rendah (beberapa MeV) seperti neutron, proton dan deuteron. Sebagai hasil dari proses tersebut dihasilkan sejumlah besar neutron. Reaksi spalasi pada bahan target inti berat ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Reaksi spalasi pada bahan target inti berat.

Dua program simulator yang banyak digunakan untuk simulasi reaksi spalasi adalah LCS (*LAHET Code Sistem*) dan FLUKA (*Fluktuierende Kaskade simulation program*) [3]. Program simulator LCS dibuat di *Los Alamos National Laboratory* (LANL) untuk simulasi transpor dan interaksi nukleon, pion, muon, ion ringan dan antinukleon dalam geometri yang kompleks. Program simulator FLUKA dikembangkan di CERN, digunakan untuk simulasi transpor partikel hadron dalam material target berbasis *Montecarlo* pada rentang energi yang lebih lebar. Dalam teknologi ADS baik untuk tujuan transmudasi limbah maupun produksi energi, program simulator ini telah banyak digunakan untuk simulasi reaksi nuklir spalasi [4, 5]. Program simulator FLUKA membaca berkas masukan (*input file*) standar ASCII dengan ekstensi .inp, yang terdiri dari banyak "command" dengan setiap *command* terdiri dari satu *line*

(disebut juga "cards") atau lebih. Struktur berkas masukan FLUKA terdiri dari title/judul dan komentar, definisi partikel sumber, deskripsi geometri, definisi material yang digunakan, definisi detektor yang digunakan, definisi skema bias (*optional*), definisi energi *cut-off* dan banyak *history* yang diminta.

Pada penelitian ini dilaporkan hasil analisis bahan tungsten dan LBE atau PbBi sebagai bahan target reaksi spalasi sistem ADS. Analisis dilakukan terhadap fluks neutron dan nuklida residu hasil reaksi spalasi. Bahan target dimodelkan sebagai silinder dengan diameter 20 cm dan panjang 80 cm dengan energi proton yang digunakan antara 100 – 1000 MeV.

Tata Kerja Dan Percobaan

Simulasi reaksi spalasi antara proton berenergi 100 MeV, 200 MeV, ..., 1000 MeV masing-masing dilakukan untuk target Hg dan Pb. Bahan target spalasi dimodelkan masing-masing berbentuk silinder dengan diameter 20 cm dan panjang 80 cm, diletakkan di dalam silinder berdiameter 40 cm dan panjang 100 cm yang berisi pendingin air. Berkas proton dianggap terdistribusi gaussian dengan deviasi 4 mm ke arah sumbu y dan z, mengarah ke sumbu silinder, melalui lorong vakum berdiameter 1 cm dan panjang 10 cm seperti dinyatakan pada Gambar 2.

Berkas masukan program simulator FLUKA merupakan berkas standar ASCII yang pada pelaksanaan simulasi didefinisikan sebagai berikut:

a. *Card* TITLE, BEAM, dan BEAMPOS

Card TITLE hanya berisi string yang mendefinisikan judul atau identitas berkas, sedang *card* BEAM mendefinisikan jenis partikel proyektil dan karakteristik berkasnya. Jenis partikel dinyatakan pada SDUM, sedangkan WHAT1 pada *card* BEAM mendefinisikan energi kinetik partikel proyektil, WHAT 4 dan 5 mendefinisikan *full width at half maximum* (FWHM), untuk proton sebesar 2.35σ . *Card* BEAMPOS mendefinisikan posisi awal dan *cosinus* arah berkas partikel proyektil.

b. *Card* GEOBEGIN dan GEOEND

Card GEOBEGIN mengawali dekripsi geometri dan diakhiri dengan GEOEND. Program simulator FLUKA menggunakan pendekatan *Boolean* untuk mendefinisikan geometri. Bagian pertama dari deskripsi geometri ini dinyatakan bangun primitif SPH untuk bola (*sphere*), XYP untuk bidang XY tak hingga, ZCC untuk silinder panjang tak hingga ke arah sumbu Z. Bilangan pertama dalam

card mendefinisikan nama bangun. Bilangan berikutnya menyatakan parameter geometris untuk setiap bangun seperti koordinat pusat, radius dan sebagainya. Operasi Boolean antara bangun-bangun tersebut didefinisikan dalam bagian ke dua dari GEOBEGIN. Bilangan di awal *card* mendefinisikan nama atau nomor setiap wilayah (*region*). Bilangan positif atau negatif menunjukkan masuk atau tidaknya suatu bangun dalam wilayah yang didefinisikan *card* tersebut. OR mengindikasikan penambahan beberapa sub wilayah untuk membentuk sebuah wilayah.

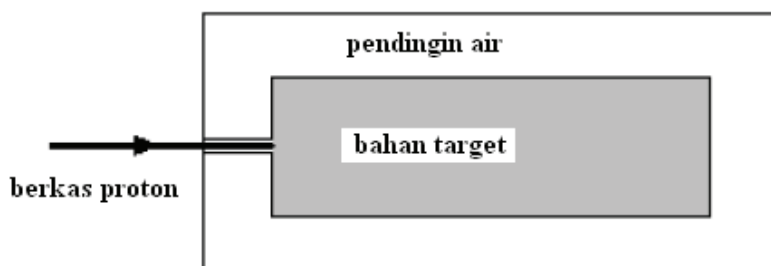
c. *Card* MATERIAL dan ASSIGMAT

Definisi material unsur didefinisikan dengan *card* MATERIAL, di mana WHAT1 menyatakan nomer atom Z, WHAT2 nomer massa, WHAT3 densitas material dan WHAT4 nomer identitas material dalam *database* FLUKA, SDUM menyatakan nama material. Penempatan material untuk setiap wilayah didefinisikan dengan *card* ASSIGMAT dengan WHAT1 menunjukkan nomer inisial material di dalam *database* FLUKA dan WHAT2&3 mendefinisikan rentang wilayah di mana material ditempatkan.

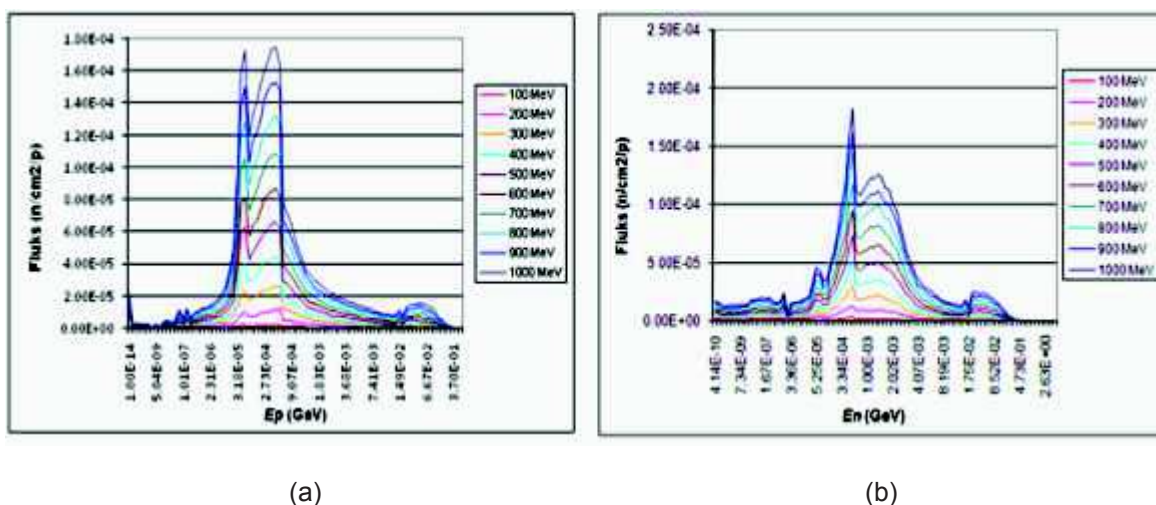
d. *Card* DETECTOR

Card DETECTOR digunakan untuk deteksi hasil reaksi spalasi. Beberapa detektor didefinisikan pada berkas masukan simulasi, di antaranya detektor neutron dan detektor pengukur fluks neutron. Sejumlah besar partikel ringan, khususnya neutron akan dipancarkan dalam jumlah cukup besar. Dalam suatu reaksi spalasi satu partikel proyektil dapat menghasilkan beberapa neutron. Cacah neutron yang dihasilkan oleh satu partikel proyektil dalam reaksi spalasi disebut *yield*. Nilai *yield* neutron pada sistem ADS menentukan nilai ekonomis pengoperasiannya. Neutron spalasi tidak berenergi tunggal (*mono-energetic*) karena terdapat beberapa kemungkinan tahapan reaksi yang menghasilkan neutron. Distribusi energi neutron hasil reaksi spalasi ini disebut spektrum neutron spalasi. Selain neutron reaksi spalasi juga menghasilkan inti sisa yang beberapa diantaranya bersifat radioaktif.

Hasil simulasi menggunakan program simulator FLUKA menunjukkan bahwa variasi energi proton tidak mempengaruhi bentuk spektrum dan hanya mempengaruhi nilai fluks neutron seperti diperlihatkan Gambar 3.



Gambar 2. Bentuk geometri sistem target merkuri dan timbal.



Gambar 3. Spektrum neutron pada permukaan bahan target (a) W dan (b) LBE.

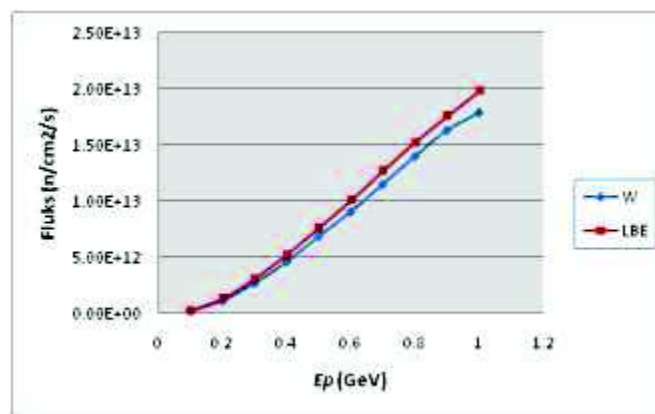
Hasil Dan Pembahasan

Puncak spektrum neutron di permukaan target W berada pada daerah neutron cepat, sementara untuk target LBE pada daerah neutron termal ($E_n < 1$ eV). Bahan target spalasi LBE menghasilkan neutron termal dalam jumlah banyak karena reabsorpsi neutron termalnya rendah [6]. Hanya neutron cepat yang efektif mentransmutasi TRU dan produk fisi. Neutron cepat dihasilkan melalui tahap INC dan reaksi fisi, sedangkan neutron termal dan epitermal dihasilkan melalui tahap evaporasi. Gambar 4 memperlihatkan fluks total dari neutron cepat yang dihasilkan LBE lebih tinggi daripada W namun masih dalam orde yang sama yaitu 10^{12} n/cm²/s pada energi proton antara 200 – 500 MeV, dan 10^{13} n/cm²/s pada energi proton antara 600 – 1000 MeV.

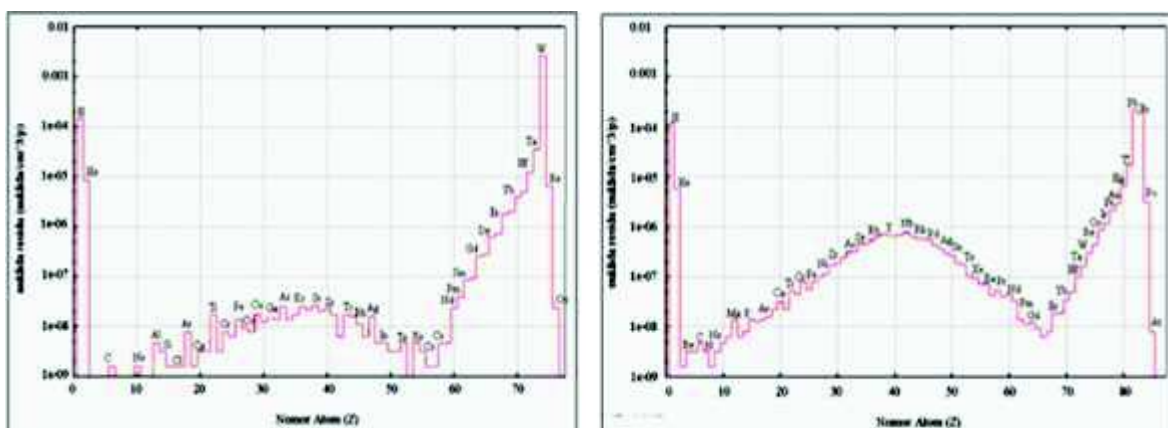
Spektrum nuklida residu kedua target diperlihatkan pada gambar 5, yield nuklida

residu bernomor atom Z dinyatakan dalam satuan (cacah/cm³/p). Bentuk spektrumnya khas dan dapat dibagi menjadi tiga area. Area pertama pada Z kecil terdapat dua atau tiga puncak tajam merupakan hasil dari tahap deeksitasi mode evaporasi di mana inti sisa tahap INC memancarkan nukleon terus menerus hingga mencapai energi di bawah energi ikat nukleon terakhir.

Area kedua di bagian tengah merupakan inti-inti hasil fragmentasi/fisi di mana inti sisa tahap INC terpecah menjadi dua inti yang hampir sama nomor massanya sambil memancarkan neutron hasil fisi. Area ketiga di bagian akhir spektrum merupakan inti-inti hasil reaksi intra-nuclear cascade (INC) di mana proton energi tinggi yang menumbuk inti target mendorong sejumlah nukleon menyisakan inti residu dengan nomor atom di sekitar nomor atom target.



Gambar 4. Fluks neutron cepat total pada permukaan target fungsi energi proton pada arus proton 1 mA



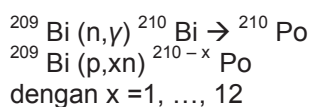
(a) (b)
Gambar 5. Inti residu reaksi spalasi pada target (a) W dan (b) LBE dengan energi proton 1000 MeV

Tabel 1. Isotop-isotop berumur panjang hasil reaksi spalasi W dan LBE dengan energi proton 1 GeV

Hasil reaksi spalasi W				Hasil reaksi spalasi LBE			
Isotop	T1/2 (tahun)	Mode decay	yield (nuklida/cm ³ /p)	Isotop	T1/2 (tahun)	Mode decay	yield (nuklida/cm ³ /p)
¹⁴⁶ Sm	(10.3±0.5)e+07	α	4.77E-09	Os-184	>5.6e+13	α	1.75E-08
¹⁴⁸ Gd	71±1	α	5.25E-08	Os-186	2.00E+15	α	1.59E-08
¹⁵⁰ Gd	(1.79±0.08)e+06	α	1.59E-08	Pt-190	(6.5±0.3)e+11	α	5.25E-08
¹⁵² Gd	(1.08±0.08)e+14	α	3.18E-09	Pb-202	(52.5±0.3)e+03	e. α<1%	5.08E-06
¹⁵⁴ Dy	(3.0±0.2)e+06	α	8.11E-08	Pb-204	>1.4e+17	α?	1.24E-05
¹⁷⁴ Hf	(2.0±0.4)e+15	α	1.03E-06	Bi-209	(1.9±0.2)e+19	α	1.32E-04
W-182	>8.3e+18	α	6.03E-04	Po-208	2.898±0.002	α,e	2.80E-07
W-183	>1.3e+19	α	6.36E-04	Po-209	102±5	α 99.52%, e 0.48%	4.93E-08
W-184	>2.9e+19	α	7.71E-04				
W-186	>2.7e+19	α	5.92E-04				
Re-187	(4.1±0.1)e+10	β-,α<1.0, e-04%	1.59E-09				

Nuklida residu dengan nomor atom sama dengan nomor atom target memiliki yield tertinggi, sedangkan nuklida hydrogen terbesar kedua. Hal ini mengindikasikan tahapan reaksi spalasi dengan peluang terbesar adalah *intra-nuclear cascade* dan evaporasi.

Isotop-isotop pemancar α berumur panjang yang dihasilkan diperlihatkan pada tabel 1. Target W menghasilkan 11 jenis nuklida residu pemancar alfa berumur panjang, di antaranya unsur tanah jarang ¹⁴⁶Sm ($T_{1/2}=1.03 \times 10^8$ tahun), ¹⁵⁰Gd ($T_{1/2}=1.79 \times 10^6$ tahun) dan ¹⁵⁴Dy ($T_{1/2}= 3 \times 10^6$ tahun). Unsur tanah jarang pemancar alfa berumur panjang ini perlu dipertimbangkan karena nomor massanya yang kecil, antara 145-155, sehingga tidak dapat terfisikan sebagaimana halnya unsur-unsur transuranik (Stankovsky, 2000). Pada PbBi terdapat isotop Bi-209, Po-208 dan Po-209 yang merupakan hasil reaksi spalasi Bi. Nuklida residu Po dihasilkan melalui reaksi [5] :



²⁰⁹Po dan ²⁰⁹Bi menjadi salah satu kekurangan PbBi sebagai target spalasi karena umur paronya yang panjang.

Kesimpulan

1. Fluks neutron cepat hasil spalasi yang mencapai permukaan target W dan LBE mencapai orde 10^{12} n/cm²/s pada jangkauan energi proyektil proton antara 200 – 500 MeV dan pada jangkauan energi proyektil proton antara 600 – 1000 MeV mencapai orde 10^{13} n/cm²/s.
2. Reaksi spalasi target W dengan proton berenergi 1000 MeV menghasilkan 11 jenis nuklida residu pemancar alfa berumur panjang, di antaranya unsur tanah jarang ¹⁴⁶Sm ($T_{1/2}=1.03 \times 10^8$ tahun), ¹⁵⁰Gd ($T_{1/2}=1.79 \times 10^6$ tahun) dan ¹⁵⁴Dy ($T_{1/2}= 3 \times 10^6$ tahun).
3. Reaksi spalasi target LBE menghasilkan 8 nuklida residu pemancar alfa berumur panjang, di antaranya ¹⁸⁴Os ($T_{1/2} = >5.6 \times 10^{13}$ tahun), ¹⁸⁶Os ($T_{1/2} = 2.00 \times 10^{15}$ tahun), ¹⁹⁰Pt ($T_{1/2} = (6.5 \pm 0.3) \times 10^{11}$ tahun), ²⁰⁴Pb ($T_{1/2} = >1.4 \times 10^{17}$ tahun), dan ²⁰⁹Bi ($T_{1/2} = (1.9 \pm 0.2) \times 10^{19}$ tahun).

Daftar Pustaka

- [1] KAPOOR. S. 2002. *Accelerator Driven Sub-Critical Reactor System (ADS) for Nuclear Energy Generation*. Pramana Journal of Physics, vol. 59, No. 6, India.
- [2] MUKAIYAMA. T. 2000. *Safeguards Aspects of High Power Proton Accelerator Driven System*. Proceedings of 3rd

- Workshop on Science and Modern Technology for Safeguards, Tokyo – Japan.
- [3] *Online Fluka manual*, www.fluka.org/manual/ect/s002/text.html
- [4] KADI, Y et.al. *Design of an Accelerator-Driven System for the Destruction of Nuclear Waste*. http://www.users.ictp.it/~pub_off/lectures/Ins012/Kadi_002.pdf, 06 – 06 – 2007.
- [5] BAYLAC, D.V. *Investigation Related to The Generation of Reaction Products in The Target of Accelerator Driven System for Nuclear Waste Incineration*. http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA_6908.pdf, 30 – 11 – 2007.
- [6] GUNTER, S. BAUER. 2005. *Target Design and Technology for Research Spallation Neutron Sources*. Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.

TANYA JAWAB

1. Penanya : Asep Nurhikmat (LIPI)

Pertanyaan :

Faktor terkecil yang mempengaruhi simulasi?

Jawaban :

Simulasi dengan program fluka memang dipengaruhi oleh beberapa hal, yang terkecil di antaranya kesalahan data input dan prosesingny. Jika terjadi kesalahan data input pada umumnya proram tidak bisa running dengan pesan kesalahan.

2. Penanya : Sri Mulyani (UNS)

Pertanyaan :

Karakteristik apa yang dimiliki logam W sehingga mempunyai daya serap terhadap neutron lebih tinggi dari LBE? Karena dari simulasi program fluka neutron yang dihasilkan adalah neutron cepat.

Jawaban :

Karakteristik tampang lintang serapan bahan terhadap neutron cepat.

3. Penanya : Sunardi (USB)

Pertanyaan :

Seberapa keakuratan model simulasi fluka jika diaplikasikan?

Jawaban :

Akurasi model simulasi fluka ini memang belum mencapai 100% namun dari aplikasin yang pernah dilakukan oleh CERN program ini cukup akurat.