

KARAKTERISTIK NEUTRONIK DARI REAKSI SPALLASI PROTON-MERKURI PADA SISTEM TARGET ADS

Silakhuddin, Slamet Santosa

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan, BATAN

ABSTRAK

KARAKTERISTIK NEUTRONIK DARI REAKSI SPALLASI PROTON-MERKURI PADA SISTEM TARGET ADS. Telah dilakukan perhitungan dan analisis dari yield, distribusi fluks dan spektrum neutron hasil spallasi antara proton energi tinggi dan target merkuri pada sistem target dari Accelerator Driven System (ADS). Perhitungannya menggunakan program FLUKA. Target merkuri dimodelkan sebagai silinder berjari-jari 20 cm dan panjang 80 cm. Rentang energi proton yang dipakai antara 100 MeV hingga 1000 MeV. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk energi proton beberapa ratus MeV, diperoleh yield neutron dalam besaran 10^{16} n/det/MA-proton. Untuk energi proton hingga 500 MeV target Hg mempunyai yield yang kira-kira sama dengan target Pb dan W dan untuk rentang energi 500-1000 MeV melampauinya. Pada daerah energi 200 hingga 500 MeV karakteristik distribusi fluks neutron di sekitar target dan spektrum neutron di dalam target adalah hampir serupa. Intensitas tertinggi dari neutron dicapai pada energi 300 keV.

Kata kunci : target spallasi, ADS

ABSTRACTS

NEUTRONICS CHARACTERISTIC OF PROTON-MERCURY SPALLATION REACTION ON A TARGET SYSTEM OF ADS. Calculation and analysis of neutron yield, neutron flux and neutron spectrum of spallation reaction between high energy proton and mercury on a target system of Accelerator Driven System (ADS) have been carried out. The calculation by using a FLUKA program. The mercury target was modeled as a cylinder of 20 cm radius and 80 cm long. The range of proton energy is between 100 MeV and 1000 MeV. The calculation shows that in the hundreds MeV of proton energy it can be obtained neutron yield in the around of 10^{16} n/sec/MA-proton. For proton energy until 500 MeV, yield of Hg target is approximately equal with Pb and W targets and leading in the energy range of 500-1000 MeV. In the proton energies between 200 and 500 MeV, the characteristic of neutron flux distribution around the target and neutron spectrum inside the target are almost similar. In the neutron spectrum, neutron maximum intensity is located in the around of 300 keV.

Key words : spallation target, ADS

PENDAHULUAN

Salah satu isu penting dalam introduksi PLTN di Indonesia adalah menyangkut masalah penanganan limbah nuklir hasil operasi PLTN, karena suatu kenyataan bahwa operasi PLTN akan meninggalkan dampak lingkungan khususnya masalah limbah nuklir umur panjang. Untuk mencapai kondisi penerimaan masyarakat (*public acceptance*) dalam introduksi PLTN, maka masalah kemampuan penanganan limbah nuklir (disamping masalah budaya keselamatan) harus menjadi topik penting dalam kegiatan litbang di Indonesia. Antisipasi kearah itu sebenarnya sudah dilakukan, terbukti dengan telah dimasukkannya topik dalam Agenda Riset Nasional tentang kajian teknologi pengolahan limbah nuklir dan proses penyimpanan bahan bakar nuklir bekas^[1]. Pengolahan limbah nuklir menggunakan teknologi transmudasi dalam

fasilitas Accelerator Driven System (ADS) merupakan suatu metode untuk mengurangi bahkan menghilangkan dampak negatif dari limbah nuklir umur panjang. Dengan penguasaan teknologi transmudasi dengan ADS akan memberikan suatu opini positif di masyarakat bahwa SDM Indonesia telah siap masuk kedalam era PLTN.

Salah satu program litbang di PTAPB adalah pengembangan teknologi ADS untuk transmudasi limbah nuklir. Dalam tahap-tahap awal telah dan sedang dilakukan pengkajian dan perhitungan-perhitungan untuk desain sistem akselerator partikel energi tinggi dan target spallasi. Sistem akselerator energi tinggi telah diperoleh hasil kajian bahwa sistem akselerator Linac adalah yang sesuai untuk penggunaan dalam ADS. Untuk target spallasi akan diteliti beberapa material seperti timbal, wolfram dan merkuri.

Dalam suatu ADS sumber neutron yang terkendali dihasilkan oleh suatu reaksi spallasi antara proton atau deuteron energi tinggi dengan suatu target inti berat. Proton atau deuteron energi tinggi berasal dari bagian akselerator dan target inti berat berada pada sistem target. Penentuan yield neutron hasil spallasi berguna untuk keperluan desain daya akselerator yaitu intensitas dan energi partikel penembak^[2].

Target untuk proses spallasi yang kini tengah dikaji ada yang berbentuk padat dan ada yang cair. Target cair menjadi bahan pertimbangan kajian karena beberapa pertimbangan antara lain: transfer panas berlangsung secara konveksi, tidak ada stress yang disebabkan gradient termal di dalam target dan keaktifan yang dihasilkan lebih rendah dalam volume target yang lebih besar.

Merkuri merupakan salah satu kandidat target cair yang kini tengah dikaji, berbentuk cair pada suhu kamar sehingga tidak memerlukan pemanasan tambahan untuk mencegah pembekuan. Dibanding PbBi, target merkuri merupakan sumber neutron yang lebih kuat dan densitasnya 30% di atasnya. Merkuri juga mudah dalam proses pemurniannya, tidak menghasilkan produk aktif alfa dan hanya mempunyai satu isotop umur panjang (Hg-194) yang juga produk spallasi yang langka. Tampang lintang serapan neutron termal yang tinggi merupakan satu kerugian bila dioperasikan pada reaktor termal tetapi tidak perlu dipandang masalah untuk operasi reaktor neutron cepat. Atas dasar alasan-alasan tersebut merkuri telah merupakan salah satu pilihan sebagai material target untuk pembangkitan sumber neutron spallasi^[3]. Material-material target lainnya yang sekarang sedang dikaji adalah: bismuth, wolfram, tungsten (di KENS dan ISIS), uranium 238 (di Proyek SNS USA) dan timbal.

Banyak masalah yang harus dikaji dalam masalah target spallasi dalam ADS, tetapi pada makalah ini hanya dikhususkan pada analisis hasil perhitungan yield neutron, distribusi fluks dan spektrum neutron yang dihasilkan pada reaksi proton untuk target merkuri. Masalah ini merupakan masalah sentral untuk proses-proses sebelumnya dan sesudahnya dalam ADS; karena pemilihan jenis akselerator pada dasarnya tertuju untuk menghasilkan neutron hasil spallasi yang kuat dan proses unjuk kerja reaktor subkritik sangat ditentukan oleh sumber neutron spallasinya.

Perhitungan ini merupakan bagian dari kegiatan litbang Kajian Transmutasi Limbah Nuklir Menggunakan ADS yang telah dicanangkan mulai tahun 2007 untuk selama tiga tahun. Sasaran tahun ini adalah diperoleh karakteristik umum tentang

teknologi akselerator energi tinggi dan sistem target spallasi. Perhitungan dilakukan menggunakan program FLUKA yang telah digunakan oleh beberapa negara Eropa untuk mendesain ADS. Hasil perhitungan ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap masalah sejauh mana merkuri dapat digunakan sebagai material target yang layak digunakan.

DASAR PERHITUNGAN

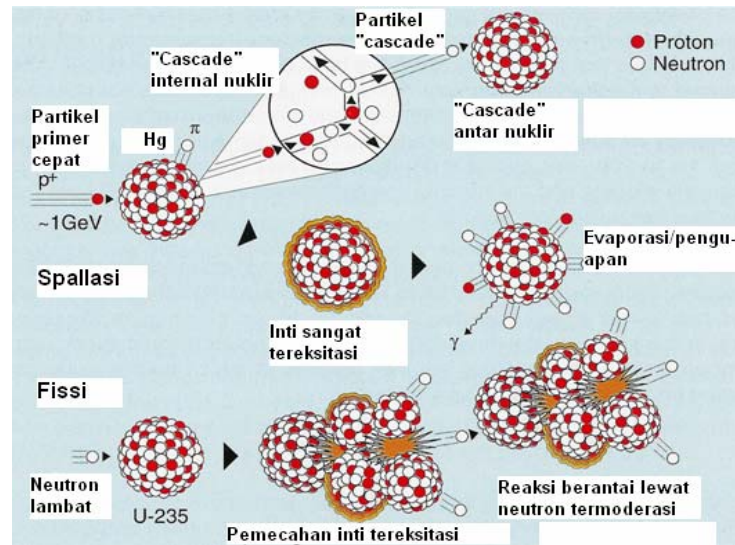
Reaksi Spallasi

Jika suatu partikel (misal proton atau deuteron) energi tinggi menumbuk target unsur berat, beberapa neutron akan terlontarkan oleh reaksi spallasi^[4]. Dalam tahap pertama proses spallasi, partikel datang berinteraksi secara langsung dengan nukleon individu inti target dan partikel sekunder berenergi sangat tinggi terlontarkan. Tahap ini di dalam teori fisika nuklir disebut sebagai *intra nuclear cascade*. Energi dipindahkan dari partikel datang ke inti target, menyebabkan inti tersebut berada di tingkat eksitasi tinggi. Partikel-partikel yang dilontarkan di dalam proses ini adalah neutron, proton atau pion. Dalam proses tahap kedua yaitu tahap *inter nuclear cascade*, inti-inti target "menguapkan" sejumlah besar nukleon-nukleon atau *cluster* kecil nukleon dengan energi lebih rendah (beberapa MeV) seperti neutron, proton dan deuteron. Sebagai hasil dari proses-proses tersebut sejumlah besar neutron dihasilkan.

Pada Gambar 1 diperlihatkan skema proses spallasi dan dipertandingkan dengan proses fisi. Perbedaan yang prinsip dari keduanya adalah bahwa pada proses spallasi tidak bersifat *sustainable* seperti pada proses fisi, yaitu proses tidak dapat berlangsung terus tanpa ada partikel penembak yang datang.

Program FLUKA

FLUKA akronim dari FLUktuierende Kas-kade merupakan program yang secara umum dipakai untuk mensimulasikan interaksi radiasi dengan bahan^[5]. Kode fisika ini diaplikasikan untuk menyelesaikan problem-problem yang sangat luas, mulai dari fisika energi tinggi hingga fisika medik dan fisika radiasi termasuk di dalamnya untuk mengkaji desain ADS. Dalam teknologi ADS baik untuk tujuan transmudasi limbah maupun produksi energi, kode ini juga telah cukup banyak digunakan untuk mensimulasi reaksi nuklir spallasi yang dihasilkan oleh proton energi tinggi pada target spallasi^[6].



Gambar 1. Skema reaksi spallasi oleh proton menghasilkan neutron dan proses fisi.

Program FLUKA menetapkan input target yang berbentuk silinder sedangkan jenis partikel datang, energi kinetik dan komposisi material target dapat divariasikan, dengan maksud untuk mempelajari efek-efek dari parameter-parameter tersebut pada karakteristik neutronik dari sistem. File output akan menunjukkan distribusi partikel, deposisi energi pada target, kerapatan fisi dan spektrum energi di dalam target, yang akan memungkinkan pengambilan kesimpulan berguna berkenaan dengan desain sistem.

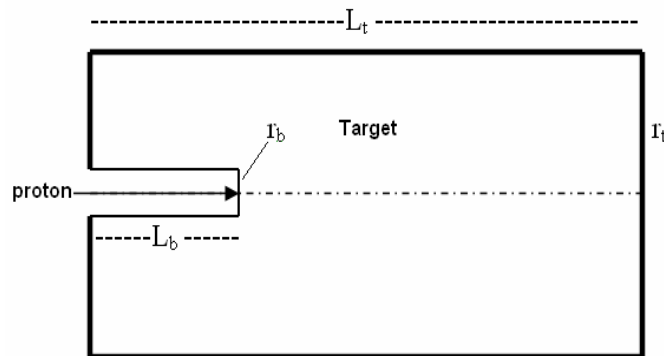
Reaksi spallasi antara proton dengan energi 0,1 hingga 1 GeV dengan target merkuri (Hg) bermassa atom 200,6. Berkas dianggap mengarah ke z terdistribusi secara *gaussian* dengan standar deviasi 5 mm dalam arah x dan y . Target mempunyai panjang (L_t) 80 cm dan radiusnya (r_t) 20 cm. Pada Gambar 2 diperlihatkan geometri dari sistem target.

Berkas proton didesain masuk kedalam silinder melalui lorong vakum yang mempunyai radius (r_b) 2 cm dan panjang (L_b) 20 cm. Kemudian akan dihitung:

1. yield neutron
2. distribusi fluks neutron di sekitar target
3. spektrum neutron di dalam target

TATA KERJA

Obyek Analisis



Gambar 2. Model sistem target spallasi.

Sarana Perhitungan

Analisis diperoleh dari suatu perhitungan menggunakan program FLUKA. Untuk menjalankan Program ini diperlukan input yang terdiri atas baris-baris (*lines*)^[7]:

TITLE (Judul)

Walaupun judul hanya optional tetapi dianjurkan untuk dibuat, dalam hal ini misal “Perhitungan Yield Neutron dari Reaksi Proton hingga 1 GeV dengan Target Merkuri”.

BEAM (Berkas Partikel)

Mendefinisikan tentang karakteristik berkas : energi, profil, jenis partikel. Energi dinyatakan dalam satuan GeV; profil intensitas dapat dalam bentuk homogen atau bentuk Gaussian; jenis partikel dinyatakan dalam tulisan NAMA partikelnya. Untuk kasus dalam analisis ini ditulis sebagai:

- energi: 0.1 – 1.0 GeV
- profil: Gaussian
- jenis partikel PROTON

BEAMPOS (Posisi Berkas)

Baris ini memberikan input posisi awal berkas. Penentuan posisi dapat diambil di suatu koordinat asalkan tidak pada koordinat batas daerah *blackhole*.

Geometry Definition (Definisi geometri)

Mendefinisikan tentang:

- geometri dari *blackhole*
- geometri target: bola, bidang, silinder

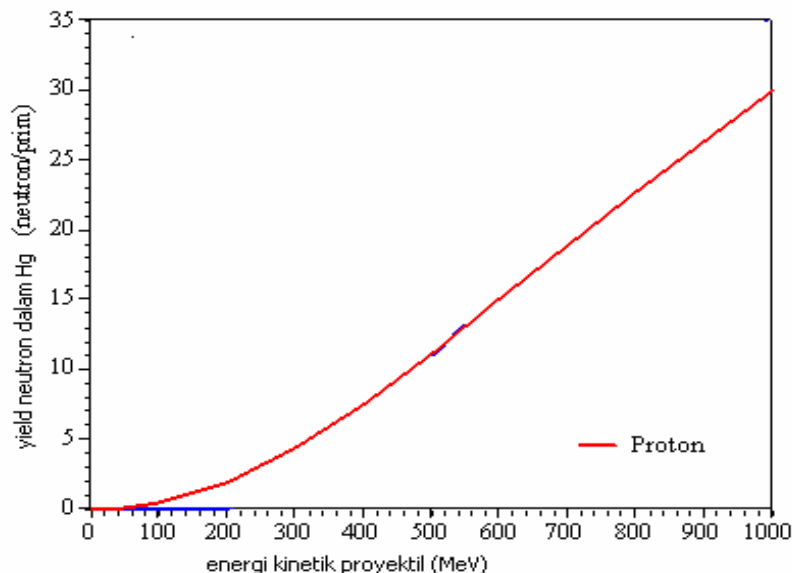
HASIL DAN PEMBAHASAN

Yield neutron

Hasil perhitungan yield neutron ditunjukkan pada Gambar 3.

Data pada Gambar 3 menunjukkan bahwa untuk energi hingga 500 MeV kenaikan *yield* neutron sebagai fungsi energi proyektil mengikuti fungsi eksponensial dan di atas 500 MeV kenaikannya linear. Jumlah proton datang untuk suatu arus proton I amper adalah : $\Phi = 6.25 \times \frac{I \times 10^{18}}{Z}$, dengan Z adalah muatan proton dalam satuan muatan elektron (sme). Sehingga jika diambil sebagai ilustrasi, *yield* yang diperoleh dari reaksi spallasi oleh proton adalah seperti dicantumkan pada Tabel 1.

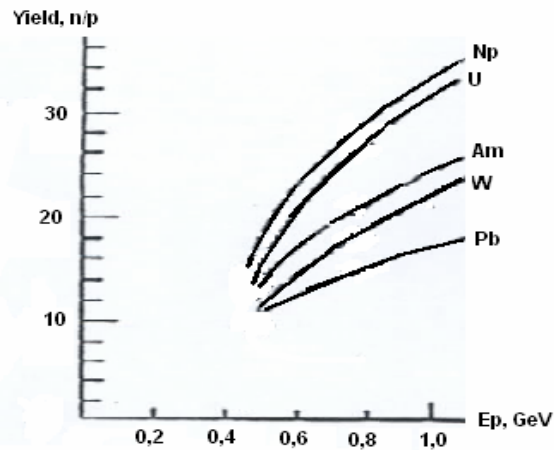
Yield neutron per proton (n/p) dari Hg dapat dibandingkan dengan material lain seperti ditunjukkan pada Gambar 4^[2].



Gambar 3. Yield neutron sebagai fungsi energi proton.

Tabel 1. Data yield neutron.

No	Energi proton, MeV	Yield nneutron, n/p	Yield neutron, n/mA-proton
1	100	<1	Sukar diamati
2	200	2	$1,25 \times 10^{16}$
3	300	4	$2,50 \times 10^{16}$
4	400	7	$4,40 \times 10^{16}$
5	500	11	$6,90 \times 10^{16}$
6	1000	30	



Gambar 4. Yield neutron/proton dari beberapa material.

Di sekitar 500 MeV, target merkuri kira-kira mempunyai yield n/p yang sama dengan material berat konvensional seperti Pb dan W. Di banding material fisil misal disini Am, U dan Np material Hg memang ada dibawahnya, tetapi material-material uranium dan di dekatnya mempunyai energi deposisi yang jauh lebih tinggi dibanding material berat lainnya disebabkan fisi dan pembentukan aktinida.

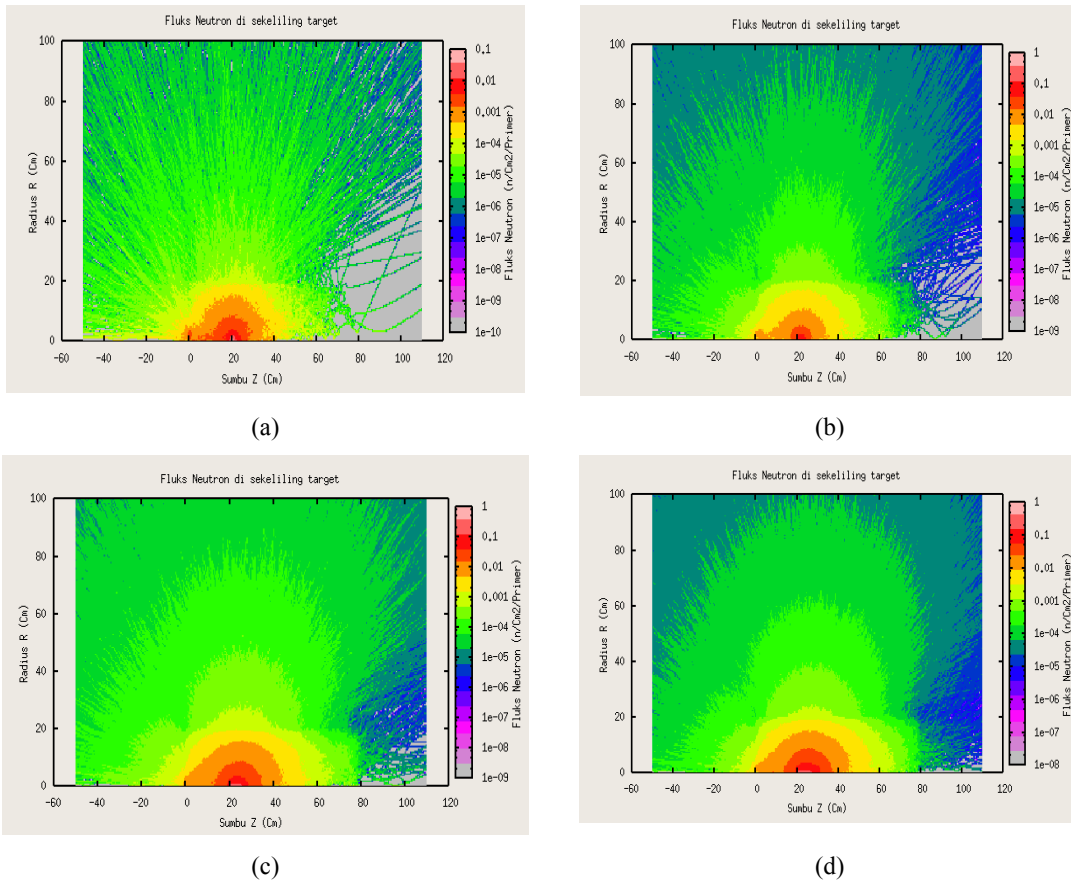
Pada energi di atas 500 MeV, yield target Hg mengungguli target-target Pb dan W dan terus menanjak dengan linear sementara target jenis lain naik dengan kecenderungan kearah jenuh. Pada energi proton 1 GeV, yield dari target Hg mencapai sekitar 30, nilai ini bersaing dengan yield yang didapat dari target U dan jauh mengungguli yield dari Pb dan W.

Distribusi fluks neutron

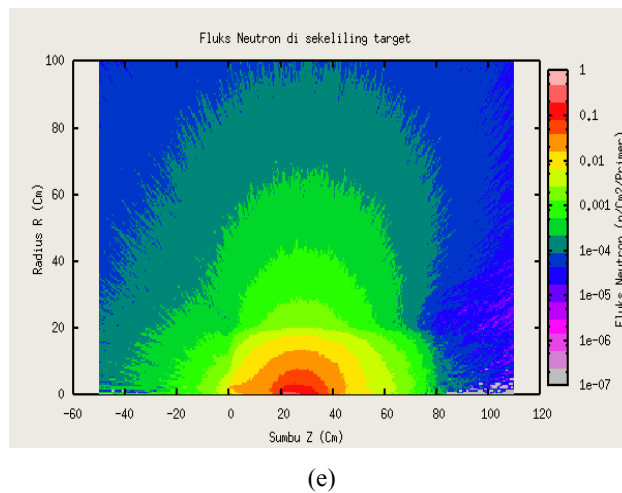
Distribusi fluks neutron di dalam dan di sekitar target silinder dicantumkan pada Gambar 5; posisi nol adalah ujung awal dari target silinder.

Dari pengamatan energi proton 100, 200, 300, 400 dan 500 MeV dapat diambil hal-hal sebagai berikut:

1. Terjadi lompatan yang nyata dari energi 100 MeV ke 200 MeV, dan di atas 200 MeV perubahannya tidak terlalu nyata
2. Melihat bentuk distribusi fluks pada radius 20 cm yaitu radius target, bentuknya menyerupai bentuk silinder target, yang berarti bahwa proton terhambur atau energinya terdeposisi keseluruhan target. Pada energi 100 MeV proton terhambur sampai dengan panjang 60 cm dan di atas 200 MeV terhambur hingga 80 cm, hal inilah yang menyebabkan mengapa fenomena yang disebutkan pada butir 1 di atas terjadi
3. Distribusi fluks yang seolah berhenti pada posisi 80 cm dan masih cukup nyata pada posisi < 0 cm ini berarti bahwa penggunaan target Hg yang berbentuk silinder sebaiknya ditempatkan pada lebih ke posisi ujung /dasar dari reaktor subkritik.



Gambar 5. Distribusi fluks neutron didalam dan disekitar target, untuk energi-energi proton: (a) 100 MeV, (b) 200 MeV, (c) 300 MeV, (d) 400 MeV.



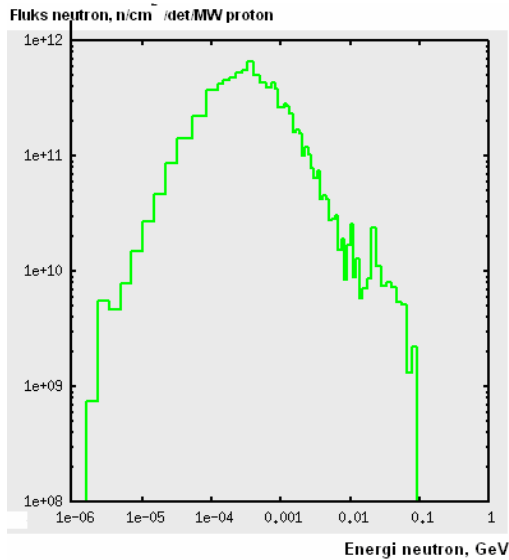
Gambar 5(e). Distribusi fluks neutron didalam dan disekitar target, untuk energi proton 500 MeV.

Spektrum Neutron

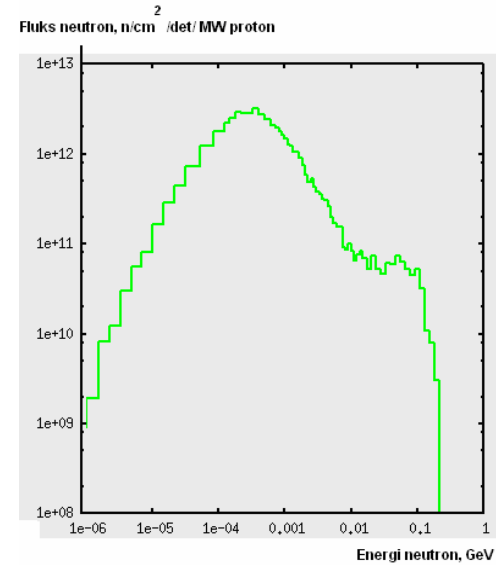
Hasil Fluka untuk perhitungan spektrum neutron spallasi di dalam target ditunjukkan pada Gambar 6(a) hingga 6(e), dalam satuan neutron /cm²/det/MW berkas proton.

Spektrum untuk kelima energi memperlihatkan yaitu kemiripan-kemiripan dalam hal:

1. Bentangan energi neutron berkisar antara beberapa ratus eV hingga ratusan MeV
2. Puncak spektrum terletak pada kira-kira 300 keV.

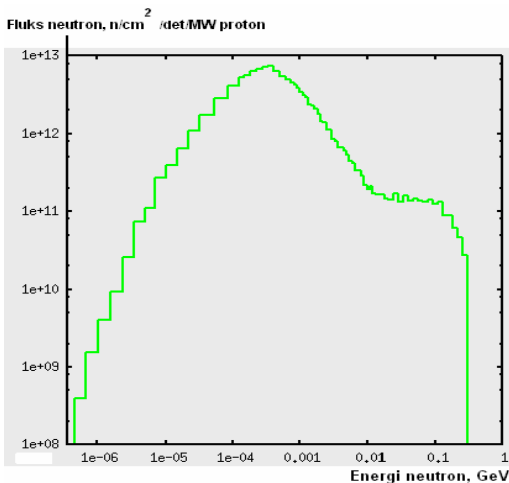


(a)

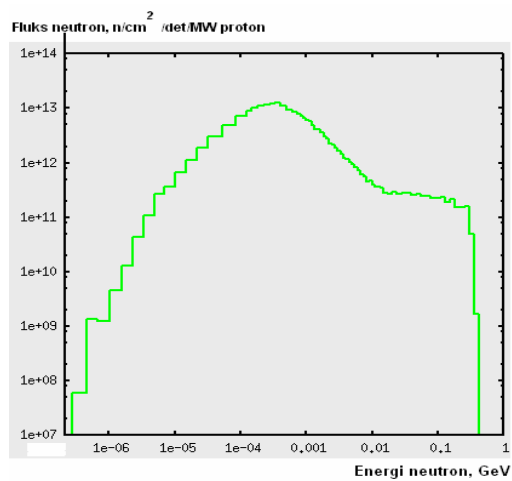


(b)

Gambar 6. (a) Spektrum neutron spallasi un-tuk energi proton 100 MeV dan (b) un-tuk energi neutron 200 MeV.

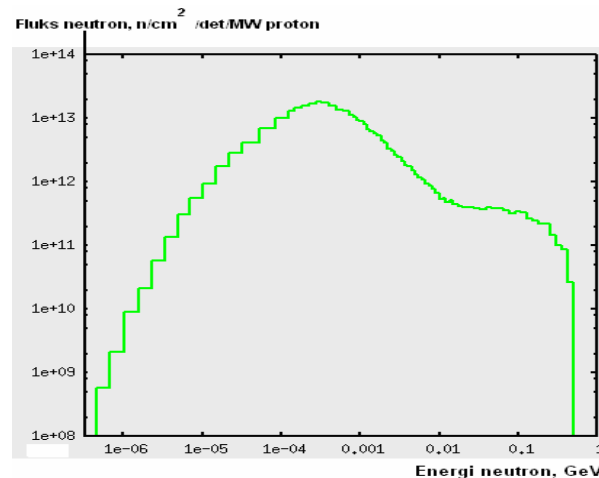


(c)



(d)

Gambar 6. (c) Spektrum neutron spallasi un-tuk energi proton 300 MeV dan (d) un-tuk energi neutron 400 MeV.



(e)

Gambar 6(e). Spektrum neutron spallasi untuk energi proton 500 MeV.

Energi puncak 300 keV ini sesuai benar dengan perhitungan Adonai Herrera dkk^[8]. Sesungguhnya energi penguapan rata-rata dalam teori spallasi adalah 2-3 MeV, akan tetapi disebabkan oleh hamburan berkali-kali neutron di dalam target sehingga energi puncaknya hanya 300 keV.

KESIMPULAN

1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa reaksi spallasi proton-merkuri pada energi beberapa ratus MeV menghasilkan yield neutron dalam besaran 10^{16} n/detik/mA-proton.
2. Target Hg mempunyai yield neutron yang kira-kira sama dengan target Pb dan W pada energi proton hingga 500 MeV dan *yield* yang lebih tinggi di atas energi tersebut.
3. Pada daerah energi 200 hingga 500 MeV karakteristik distribusi fluks neutron di sekitar target tidak menunjukkan perbedaan kuantitas yang menyolok dan polanya hampir mirip.
4. Bentuk spektrum juga memperlihatkan bentuk yang mirip dan intensitas tertinggi dari neutron dicapai pada energi 300 keV. Data ini sesuai dengan energi neutron hasil perhitungan referensi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] *Buku Agenda Riset Nasional 2006-2009, halaman 94 butir (h-1) (4)*, Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia.

- [2] KADI Y., *'Physics of Spallation and Sub-critical Cores: Fundamentals*, Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.
- [3] GUNTER S. BAUER, *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.
- [4] MUKAIYAMA T., *Safeguards Aspects of High Power Proton Accelerator Driven System*, Proceedings of 3rd Workshop on Science and Modern Technology for Safeguards, Tokyo Japan 13-16 November 2000.
- [5] A. FASSO *et al*, *'FLUKA: Status and Prospective for Hadronic Application*, Proceedings of Monte Carlo 2000 Conference, Lisbon, October 23 – 26 2000.
- [6] KADI Y., *The EA-MC Monte Carlo Package*, Proceeding of the Fifth International Meeting on Simulating Accelerator Environment, OECD Headquarters, Paris, France, July 2000.
- [7] *Online Fluka manual*, www.fluka.org/manual/sect/s002/text.html
- [8] A. HERRERA *et al*, *Accelerator Driven System Design, Fluka Calculation*, Materials of Workshop on Technology and Applications of Accelerator Driven System, ICTP Trieste Italy, 17 – 28 Oktober 2005.

TANYA JAWAB**Sudjatmoko**

- *Yang dipakai untuk reaksi spallasi apakah proton atau neutron.*
- *Apakah dalam perhitungan dengan FLUKA, materialnya dapat divariasi.*

Silakhuddin

- Dalam penelitian ini telah dihitung hasil reaksi spallasi antara target merkuri dengan proton.
- Ya, dengan FLUKA dapat dipilih/divariasi jenis material target sehingga dapat dibandingkan material satu dengan lainnya.