

IDENTIFIKASI SOURCE-TERM REAKTOR SERBA GUNA-G.A. SIWABESSY UNTUK KESELAMATAN OPERASIONAL

JAJA. SUKMANA, MASHUDI, JONNIE A. KORUA
*Pusat Reaktor Serba Guna-BATAN
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15310, Banten
Telp. 021.7560908, Faks. 7560573*

Abstrak

IDENTIFIKASI SOURCE-TERM REAKTOR SERBA GUNA-G.A. SIWABESSY UNTUK KESELAMATAN OPERASIONAL. Telah dilakukan identifikasi source-term reaktor nuklir jenis reaktor riset sebagai bagian dari analisis terhadap keselamatan industrialisasi nuklir. Source term di reaktor nuklir berasal dari teras reaktor aktif, elemen bakar bekas, pendingin reaktor, udara di reaktor, dan fasilitas percobaan. Source-term reaktor nuklir di lingkungan Batan berupa radionuklida hasil fisi dapat diperhitungkan menggunakan paket program ORIGEN-2. Sistem keselamatan nuklir yang menyangkut keselamatan instalasi, proteksi radiasi, lepasan radiasi ke lingkungan menjadi bagian yang penting diterapkan pada setiap fasilitas nuklir. Dan source-term serta pengendaliannya ini dapat dijadikan acuan untuk keselamatan fasilitas industrialisasi nuklir di masa sekarang.

Kata kunci: source-term, radionuklida, keselamatan nuklir

Abstract

IDENTIFY SOURCE-TERM OF MULTIPURPOSE REACTOR-G.A. SIWABESSY FOR OPERATIONAL SAFETY. Has been identified source-term of nuclear reactor of research reactor type as part to analysis for safety of nuclear industrialization. Source Term in nuclear reactor come from core of active reactor, spent fuel, reactor cooling system, air in reactor, and the experiment facility. Source-Term of nuclear reactor at Batan in the form of radionuclide result of fissile can calculated of use packet ORIGEN-2 program. System of nuclear safety which is concerning installation safety, radiation of protection, radiation release to environment become important applied in each facility of nuclear. And Source-Term and also its control referable for the safety facility of nuclear industrialization in a period of now.

Keywords : source-term, radionuclide, nuclear of safety

PENDAHULUAN

Tenaga nuklir sebagai pengganti energi jenis lain semakin dibutuhkan, begitu pula aplikasi teknologi nuklir semakin banyak digunakan dan diperlukan untuk kemakmuran dan kemajuan bangsa. Pemanfaatan nuklir terbesar di Indonesia hingga saat ini ialah dengan berdirinya reaktor riset di Bandung, Yogyakarta, dan Serpong-Banten. Sebagai suatu reaktor riset dan untuk produksi radioisotop tentu saja reaktor Serba Guna G.A.

Siwabessy (RSG-GAS) Serpong berupaya agar operasionalnya memenuhi keperluan pengguna. Namun demikian keselamatan harus menjadi prioritas utama seperti tertuang dalam kebijakan Kepala Batan tentang keselamatan fasilitas nuklir. Berkenaan dengan keselamatan radiologi operasional, setiap reaktor menuangkan Kebijakan Proteksi Radiasi dalam *Safety Analysis Report (SAR)* yang mendukung tujuan proteksi radiasi seperti tercantum dalam Keputusan Kepala Bapeten N0.05/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Desain Reaktor Penelitian dan

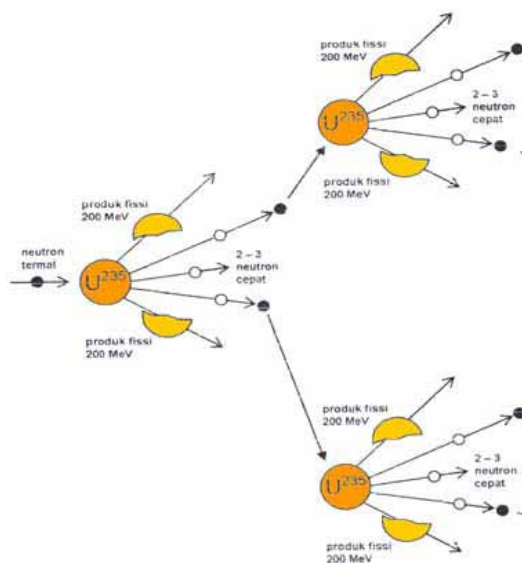
Keputusan Kepala Bapeten N0.01/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi.

Paparan radiasi yang ditimbulkan oleh operasi reaktor dijaga dan dikendalikan agar dosis yang diterima oleh personil pengoperasi atau masyarakat umum harus serendah mungkin (prinsip *ALARA: As low as reasonable achievable*). Untuk menjamin bahwa paparan operasional serendah mungkin, reaktor dilengkapi dengan prosedur administratif dan fasilitas/peralatan keselamatan diri. Desain peralatan sistem keselamatan ini membutuhkan data *source-term* (sumber radiasi) reaktor sebagai dasar untuk perhitungan. Sehubungan dengan itu dalam tulisan ini akan diuraikan *source-term* reaktor riset (RSG-GAS) sebagai pembandingan dan antisipasi untuk perhitungan keselamatan dalam menyongsong era industrialisasi nuklir atau PLTN di Indonesia.

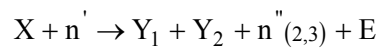
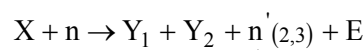
TEORI

Sumber radiasi di reaktor umumnya berawal dari reaksi fisi elemen bakar reaktor. Reaksi fisi yang seterusnya menjadi reaksi berantai terkendali, dua diantaranya menghasilkan neutron dan radiasi foton gamma. Neutron thermal dan epithermal serta foton gamma mengiradiasi radionuklida di sekitarnya sehingga menimbulkan zat radioaktif yang juga memancarkan radiasi atau meluruh sesuai karakteristik radionuklida yang terbentuk.

Skema reaksi fisi berantai, digambarkan secara umum sebagai berikut:



Gambar 1. Reaksi Fisi Berantai

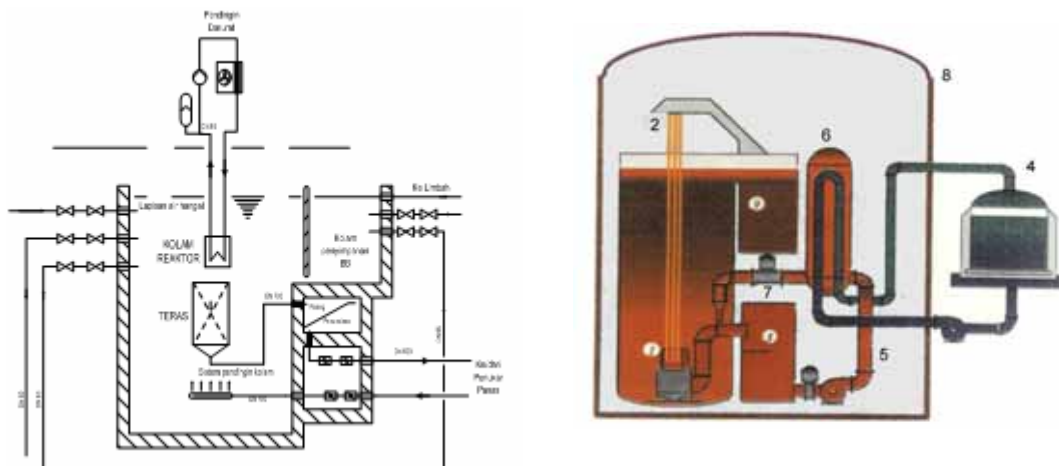


Keterangan:

- X : radionuklida (bahan) fisi
- Y : radionuklida hasil fisi
- n, n', n'' : neutron (pertama, kedua, dan seterusnya)
- E : energi nuklir (f. gamma, panas, cahaya dll)

Reaksi fisi di teras reaktor mengakibatkan terjadi reaksi berantai dan iradiasi terhadap segala bahan yang berada dalam jangkauan neutron atau terjadinya radiasi primer dan radiasi sekunder di teras. Dari teriradiasinya struktur teras, bahan/sampel, pendingin reaktor, dan komponen lainnya maka radionuklida yang terbentuk harus dianalisis serta harus diantisipasi pengaruhnya terhadap lingkungan di reaktor ataupun ke luar gedung reaktor. Radiasi yang terpantau umumnya dihitung dan terukur dengan satuan laju dosis (mrem/jam), konsentrasi aktivitas (Ci/m^3) atau laju pelepasan (Ci/jam). Sedangkan aktivitas radionuklida hasil hitungan diperoleh dalam satuan Curie (Ci). Susunan material dan sistem reaktor riset yang perlu diperhitungkan pada RSG-GAS dapat dilihat pada Gambar 1.

Aktivitas radionuklida yang timbul akibat operasional reaktor dihitung menggunakan program ORIGEN-2. Paket program komputer ini telah menjadi suatu kebutuhan pokok di reaktor nuklir di lingkungan BATAN dan digunakan pula pada tipe reaktor konvensional seperti PWR, BWR, LMFBFR, dan Candu^[2]. Program ORIGEN-2 menghitung akumulasi radioaktif dan peluruhan sejumlah besar nuklida-nuklida. Bank data program ini, diantaranya meliputi umur paruh, skema peluruhan, penampang lintang serapan neutron, dan data jenis-jenis radionuklida.



Gambar 2. Sistem dan Material Reaktor Riset (RSG-GAS)

Keterangan:

1. teras reaktor
2. batang kendali
3. ruang tunda
4. pendingin sekunder
5. pendingin primer
6. penukar panas
7. katup isolasi
8. gedung reaktor sebagai pengungkung lepasan ZRA
9. kolam bahan bakar segar

Source-term reaktor nukir harus dikendalikan, baik dengan secara desain material (*sheilding*) atau pengungkung dan secara teknis. Dari Gambar 1, terungkap bahwa timbulnya *source-term* dijaga dengan sistem keselamatan berlapis. Semua peralatan-peralatan pengungkung reaktor, sistem ventilasi, dan perisai biologi yang mengelilingi teras reaktor serta sistem lapisan air hangat reaktor dan tangki tunda ditujukan agar paparan operasional serendah mungkin.

METODOLOGI

Metode dalam pelaksanaan identifikasi dan evaluasi *source-term* ini meliputi:

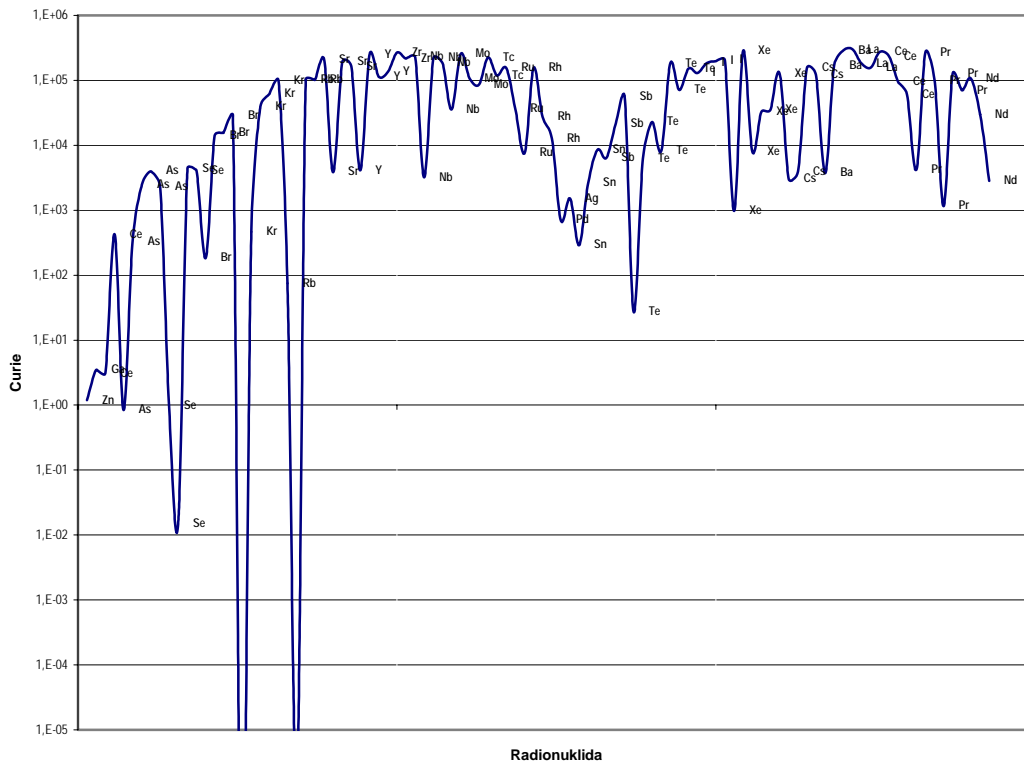
1. Penyusunan dan pemeriksaan data mengenai:
 - a. komponen dan meterial reaktor. Terutama data jenis bahan bakar reaktor, material-material sekitar teras reaktor termasuk sistem pendingin reaktor.
 - b. Studi terhadap perangkat program ORIGEN2. Data inisial *input* untuk paket ini diantaranya: fluks neutron,

waktu iradiasi, radionuklida target, dan *decay* (peluruhan). Sedangkan *output* yang dihasilkan dapat berupa: aktivitas, radioisotop, sisa bakar, *thermal power*, dsb^[5]. Data hasil program ini telah menjadi dokumen yang diantaranya berada dalam LAK RSG-GAS.

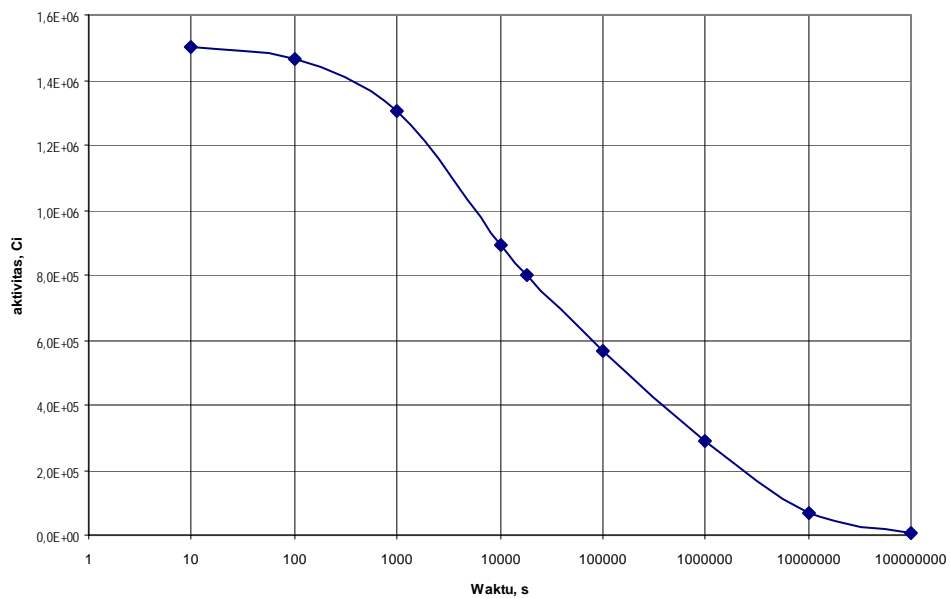
2. Evaluasi dan perbandingan data dari:
 - a. Laporan analisis keselamatan RSG-GAS. Data mengenai sumber radiasi potensial di reaktor, dalam LAK revisi 9 diuraikan dalam Bab XII. Untuk lebih memudahkan evaluasi data hasil perhitungan ORIGEN-2 dipilah-pilah sehingga diperoleh hasil yang lebih signifikan.
 - b. Tinjauan pustaka dan evaluasi terhadap laporan sumber radiasi atau paparan radiasi lingkungan.
3. Menampilkan data-data penting *source-term* reaktor, memberikan evaluasi dan saran dari segi keselamatan serta memberikan kesimpulan yang mendukung perlu berkembangnya industri nuklir dengan mengutamakan keselamatan.

HASIL

Data *source-term* reaktor riset dari hasil perhitungan desain disajikan dalam bentuk tabel-tabel. Tabel 1: Rincian produk fisi dari elemen bakar reaktor. Tabel 2: Konsentrasi dan laju lepasan radionuklida penting di Balai Reaktor (perhitungan model untuk hasil fisi). Tabel 3: Laju lepasan pada cerobong (perhitungan model).



Gambar 3. Unsur Hasil Fisi U-235 di Reaktor



Gambar 4. Jumlah Aktivitas Radionuklida Hasil Fisi U-235 di Reaktor

Hasil perhitungan ORIGEN-2, yang ditunjukkan dengan kedua Gambar di atas sebagai hasil fisi elemen bakar Uranium-Oksida mengeluarkan radionuklida dengan aktivitas

signifikan. Gambar 3 menunjukkan berbagai jenis radionuklida produk fisi dengan aktivitas totalnya masing-masing sedangkan pada Gambar 4 kondisi aktivitas dari radionuklida

berdasar waktu. Radionuklida yang aktivitasnya cukup tinggi pada 10.000 s (2,8 jam) diantaranya: Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Rh, Te, I, Xe, Ba, La, Ce, Pr, dan Nd. Sedangkan yang terhitung masih beraktivitas signifikan pada $1e+8$ s (3,2 tahun) adalah Kr-85, Sr-90, Y-90, Ru-105, Rh-106, Sb-125, Te-125m, Cs-134, Cs-137, Ba-137m, Ce-144, dan Pr-144.

Dari Tabel 2, radionuklida yang berada di Balai Reaktor terpantau jenis halogenida dan gas mulia dengan konsentrasi yang cukup rendah. Jumlah laju aktivitas halogenida berkisar $1e-10$ Ci/m³ dan jumlah laju aktivitas gas mulia sekitar $6e-6$ Ci/m³. Laju aktivitas radiasi lebih besar terhitung berada di bagian sistem *ventingnya*. Dari Tabel 3, zat radioaktif yang lepas ke cerobong terukur dalam laju aktivitas juga yaitu halogenida (Iodine, Brom) $1,5e-6$ Ci/jam dan gas mulia (Krypton, Xenon) dalam jumlah $8,5e-2$ Ci/jam sedangkan jenis unsur lainnya terhitung lebih rendah dalam jumlah $3,6e-9$ Ci/jam.

Menurut hasil penelitian tahun 1999^[4], radionuklida yang memberikan sumbangan terbesar pada radioaktivitas air kolam (hasil paket program CADRMOD1) adalah Argon-41 dan Na-24, sedangkan radionuklida yang terindikasi (hasil ukur saat itu) di udara di balai operasi adalah Ar-41 dan Xe-135. Konsentrasi Ar-41, di kolam reaktor terhitung $7,38e-3$ Ci/m³.

Sumber-sumber radiasi di reaktor menurut desain reaktor, dalam hal ini RSG-GAS berasal dari: elemen bakar (U₃O₈), teras reaktor, air pendingin, ZRA terbawa udara, dan dari fasilitas percobaan. Dalam pendingin primer, terjadi aktivasi air kolam, aktivasi kandungan garam, pembentukan tritium, aktivasi gas dalam air (Ar-41), aktivasi C-14 di air, kontaminasi pelat elemen bakar, aktivasi struktur korosi^[1]. Sedangkan dalam fasilitas percobaan dapat terjadi aktivasi gas mulia hasil fisi, halogenida, aerosol radioaktif. Sumber radiasi pada fasilitas ini bergantung pada perbedaan dan jumlah percobaan radiasi selama masa operasi. Misalnya di RSG-GAS tersedia fasilitas *Hot cell*, *rabbit system*, *PRTF*, dan radiografi neutron, serta bergantung pada posisi iradiasi di teras dan reflektor.

PEMBAHASAN

Sumber gamma yang timbul serentak dari fisi dan proses penangkapan neutron serta

proses peluruhan produk fisi disebut sebagai gamma primer. Total kerapatan sumber gamma di daerah aktif teras^[1] adalah $1,36e+14$ MeV/s.cm³. Radiasi gamma ini diantisipasi dengan air kolam atau perisai biologis. Sedangkan nuklida produk fisi dan aktinida dari elemen bakar serta nuklida teraktivasi dari sistem pendingin diperpanjang waktu alirannya (45 s) dengan menempatkan tangki tunda sebelum pipa/pompa pendingin primer.

Perbedaan tekanan antara sistem pendingin primer dan sekunder sedemikian hingga hanya ada kesempatan kecil pendingin primer yang dipindah ke pendingin sekunder dalam hal bocornya penukar panas. Selain itu, dekat alat penukar panas dipasang sensor konsentrasi aktivitas γ (gamma) sebagai pengendali operasi pendinginan.

Gas radioaktif, gas mulia, halogenida, dan aerosol radioaktif sebelum dibuang ke cerobong terlebih dahulu mendapat hambatan, misalnya dengan sistem pemurnian air kolam, lapisan air hangat, dan filter-filter dalam sistem ventilasi.

Sumber radiasi yang sangat potensial ini, ternyata terkendali. Terbukti dengan hasil pelaksanaan pemantauan lingkungan di sekitar RSG-GAS sejak dioperasikan 1987 hingga sekarang. Hasil pemantauan berdasarkan evaluasi secara statistika, metode pembobotan dan perbandingan terhadap baku mutu radioaktivitas di lingkungan, menunjukkan bahwa^[3]:

1. laju dosis dan dosis kumulatif di udara di sekitar RSG-GAS, dan lepas kawasan tidak menunjukkan adanya perubahan ataupun kecenderungan peningkatan.
2. tidak teramati adanya radionuklida hasil fisi ataupun aktivasi dalam komponen lingkungan di sekitar reaktor dan lepas kawasan, yang teramati umumnya adalah radionuklida alam dan radionuklida jatuhan dari percobaan bom nuklir di atmosfer yang konsentrasinya sangat rendah.
3. berdasar kedua data di atas menyatakan bahwa tidak terjadi peningkatan penerimaan dosis oleh anggota masyarakat yang berada di sekitar reaktor.

Dengan demikian, maka dapat dikatakan bahwa paparan radiasi yang ditimbulkan oleh

operasional RSG-GAS terjadi dan dikendalikan hingga serendah mungkin, dengan:

- a. Pengungkung reaktor dan sistem ventilasi untuk menjaga lepasan radionuklida ke lingkungan selalu memenuhi *ALARA*.
- b. Sistem lapisan air hangat reaktor atau sejenisnya dalam mengurangi jumlah radionuklida yang lolos dari air kolam reaktor.
- c. Tangki tunda akan mengurangi aktivitas air pendingin primer sebelum memasuki pompa primer dan penukar panas.
- d. Perisai biologi yang mengelilingi teras reaktor terdiri dari beton berat untuk menjamin bahwa radiasi berada pada tingkat selamat bagi personil pengoperasi.

KESIMPULAN

Source-term di reaktor nuklir berasal dari elemen bakar, teras reaktor aktif, pendingin reaktor, udara di reaktor, dan fasilitas percobaan. Jenis radiasi gamma di sekitar kolam berasal dari gamma primer dan sekunder di teras aktif, elemen bakar bekas di kolam penyimpanan dan produk aktivasi air pendingin primer. Sedangkan kontaminasi material radioaktif di udara berasal dari aktivasi gas dan aerosol yang terlarut dalam air pendingin, kontaminasi elemen bakar dan material lain yang terlarut dalam air pendingin primer yang

lepas ke udara. *Source-term* reaktor nuklir berupa radionuklida yang lepas keluar di antaranya gas mulia dan golongan halogenida, tetap terkendali. *Source-term* reaktor ditekan agar paparan operasionalnya serendah mungkin dengan perlengkapan keselamatan, seperti: pengungkung reaktor, sistem ventilasi, sistem lapisan air hangat reaktor, tangki tunda, dan perisai biologi yang mengelilingi teras reaktor.

PUSTAKA

1. PRSG-BATAN, "Laporan Analisis Keselamatan (LAK) RSG-GAS", Revisi 9.
2. M. DANDANG P, 1999, "Metode Penyesuaian Pustaka ORIGEN-2 untuk RSG-GAS, Proseding P2TRR", Serpong.
3. ERWANSYAH LUBIS, 2003, "Keselamatan Radiasi Lingkungan Dalam Pengelolaan Limbah Radioaktif di Indonesia", Jurnal TPL, P3LR-Batan.
4. SURYAWATI S, 1999, "Evaluasi Paparan Radiasi di Atas dan Sekitar Kolam Balai Operasi RSG-GAS", Proseding PRSG, Serpong.
5. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1996, "Computer Code Collection Origen 2.1", Tennessee,.

LAMPIRAN

Tabel 1. Rincian Produk Fisi Elemen Bakar Reaktor^[1]

POWER= .76000E+00 MW BURNUP= .12000E+03 MWD FLUX= .12050E+15 1/(CM2'S)
NUCLIDE RADIOACTIVITY, CURIES

| | discharge | 1,00E+01 | 1,00E+02 | 1,00E+03 | 1,00E+04 | 1,80E+04 | 1,00E+05 | 1,00E+06 | 1 | | discharge | 1,00E+01 | 1,00E+02 | 1,00E+03 | 1,00E+04 | 1,80E+04 | 1,00E+05 | 1,00E+06 | 1,1 |
|---------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----|
| Zn 72 | 1,82E-01 | 1,82E-01 | 1,82E-01 | 1,81E-01 | 1,75E-01 | 1,69E-01 | 1,20E-01 | 2,89E-03 | 1 | Rh 103 m | 1,97E+04 | 1,97E+04 | 1,97E+04 | 1,97E+04 | 1,96E+04 | 1,96E+04 | 1,93E+04 | 1,61E+04 | 2,1 |
| Ga 73 | 6,83E-01 | 6,83E-01 | 6,81E-01 | 6,38E-01 | 4,61E-01 | 3,36E-01 | 1,32E-02 | 5,03E-18 | 1 | Rh 105 | 4,02E+03 | 4,02E+03 | 4,02E+03 | 4,04E+03 | 4,17E+03 | 4,18E+03 | 3,02E+03 | 2,03E+01 | 1, |
| Ce 73 m | 6,84E-01 | 6,83E-01 | 4,81E-01 | 4,38E-01 | 4,61E-01 | 3,34E-01 | 1,32E-02 | 5,03E-18 | 1 | Rh 106 | 3,65E+03 | 3,07E+03 | 1,13E+03 | 8,52E+02 | 8,51E+02 | 8,51E+02 | 8,50E+02 | 8,33E+02 | 6,1 |
| Ce 78 | 1,01E+02 | 1,01E+02 | 9,95E+01 | 8,83E+01 | 2,67E+01 | 9,24E+00 | 1,73E-04 | 0,00E+00 | 1 | Pd 112 | 1,14E+02 | 1,14E+02 | 1,14E+02 | 1,13E+02 | 1,04E+02 | 9,60E+01 | 4,30E+01 | 7,89E-03 | 1 |
| As 76 | 1,34E-01 | 1,34E-01 | 1,34E-01 | 1,33E-01 | 1,24E-01 | 1,17E-01 | 6,34E-02 | 8,84E-05 | 1 | Ag 111 | 2,11E+02 | 2,11E+02 | 2,11E+02 | 2,11E+02 | 2,09E+02 | 2,08E+02 | 1,90E+02 | 7,23E+01 | 4, |
| As 77 | 4,96E+01 | 4,96E+01 | 4,96E+01 | 4,94E+01 | 4,80E+01 | 4,66E+01 | 3,33E+01 | 3,98E-01 | 1 | Sn 123 | 3,42E+01 | 3,42E+01 | 3,42E+01 | 3,42E+01 | 3,42E+01 | 3,41E+01 | 3,40E+01 | 3,21E+01 | 1,1 |
| As 81 | 1,20E+03 | 1,08E+03 | 1,81E+02 | 6,18E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Sn 127 | 5,79E+02 | 5,79E+02 | 5,74E+02 | 5,29E+02 | 2,34E+02 | 1,13E+02 | 6,39E-02 | 0 | 1 |
| As 83 | 2,44E+03 | 1,51E+03 | 1,49E+01 | 1,27E-19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Sn 128 | 2,15E+03 | 2,15E+03 | 2,11E+03 | 1,77E+03 | 3,04E+02 | 6,33E+01 | 6,75E-06 | 0 | 1 |
| As 84 | 1,79E+03 | 5,48E+02 | 1,17E-02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Sb 127 | 9,29E+02 | 9,29E+02 | 9,29E+02 | 9,28E+02 | 9,17E+02 | 9,05E+02 | 7,63E+02 | 1,14E+02 | 6, |
| Se 77 m | 1,51E-01 | 1,50E-01 | 1,49E-01 | 1,48E-01 | 1,44E-01 | 1,40E-01 | 9,99E-02 | 1,19E-03 | 1 | Sb 129 | 4,20E+03 | 4,20E+03 | 4,19E+03 | 4,06E+03 | 2,73E+03 | 1,92E+03 | 5,01E+01 | 2,28E-16 | 1 |
| Se 79 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1,47E-03 | 1 | Sb 131 | 1,55E+04 | 1,55E+04 | 1,49E+04 | 9,57E+03 | 1,04E+02 | 1,87E+00 | 2,43E-18 | 0 | 1 |
| Se 81 m | 1,24E+03 | 1,24E+03 | 1,22E+03 | 7,16E+02 | 1,10E+01 | 1,73E+00 | 1,13E-07 | 0 | 1 | Te 125 m | 2,56E+00 | 2,56E+00 | 2,56E+00 | 2,56E+00 | 2,57E+00 | 2,57E+00 | 2,59E+00 | 2,85E+00 | 4, |
| Se 83 | 1,16E+03 | 1,16E+03 | 1,11E+03 | 6,99E+02 | 6,88E+00 | 1,13E-01 | 5,88E-20 | 0 | 1 | Te 127 | 8,75E+02 | 8,75E+02 | 8,75E+02 | 8,75E+02 | 8,72E+02 | 8,69E+02 | 7,89E+02 | 1,92E+02 | 4, |
| Br 82 | 2,84E+01 | 2,84E+01 | 2,84E+01 | 2,83E+01 | 2,70E+01 | 2,58E+01 | 1,65E+01 | 1,23E-01 | 1 | Te 129 | 3,94E+03 | 3,94E+03 | 3,94E+03 | 3,92E+03 | 3,28E+03 | 2,59E+03 | 7,04E+02 | 5,25E+02 | 6, |
| Br 83 | 3,14E+03 | 3,14E+03 | 3,13E+03 | 2,98E+03 | 1,51E+03 | 2,96E+02 | 1,11E+00 | 0 | 1 | Te 129 m | 1,05E+03 | 1,05E+03 | 1,05E+03 | 1,05E+03 | 1,04E+03 | 1,04E+03 | 1,03E+03 | 8,27E+02 | 9, |
| Br 84 | 3,68E+03 | 3,68E+03 | 3,65E+03 | 4,38E+03 | 1,67E+02 | 9,15E+00 | 1,06E-12 | 0 | 1 | Te 132 | 2,67E+04 | 2,67E+04 | 2,67E+04 | 2,66E+04 | 2,61E+04 | 2,55E+04 | 2,09E+04 | 2,26E+03 | 5, |
| Br 87 | 1,28E+04 | 1,17E+04 | 3,89E+03 | 3,42E-02 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Te 133 m | 1,81E+04 | 1,81E+04 | 1,78E+04 | 1,47E+04 | 2,26E+03 | 4,25E+02 | 1,59E-05 | 0 | 1 |
| Kr 81 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 7,62E-10 | 1 | Te 134 | 4,02E+04 | 4,01E+04 | 3,91E+04 | 3,05E+04 | 2,57E+03 | 2,84E+02 | 4,56E-08 | 0 | 1 |
| Kr 85 | 4,78E+01 | 4,78E+01 | 4,78E+01 | 4,78E+01 | 4,79E+01 | 4,79E+01 | 4,79E+01 | 4,78E+01 | 4 | I 131 | 1,77E+04 | 1,77E+04 | 1,77E+04 | 1,77E+04 | 1,77E+04 | 1,75E+04 | 1,63E+04 | 6,73E+03 | 8, |
| Kr 85 m | 7,67E+03 | 7,67E+03 | 7,66E+03 | 7,43E+03 | 5,05E+03 | 3,58E+03 | 1,04E+02 | 1,69E-15 | 1 | I 132 | 2,69E+04 | 2,69E+04 | 2,69E+04 | 2,69E+04 | 2,66E+04 | 2,62E+04 | 2,15E+04 | 2,33E+03 | 5, |
| Kr 87 | 1,48E+04 | 1,48E+04 | 1,47E+04 | 1,29E+04 | 3,28E+03 | 9,71E+02 | 3,75E-03 | 0 | 1 | I 134 | 4,62E+04 | 4,62E+04 | 4,61E+04 | 4,42E+04 | 1,27E+04 | 2,82E+03 | 5,94E-05 | 0 | 1 |
| Kr 88 | 2,09E+04 | 2,09E+04 | 2,08E+04 | 1,96E+04 | 1,05E+04 | 6,08E+03 | 2,16E+01 | 0 | 1 | I 135 | 3,87E+04 | 3,87E+04 | 3,86E+04 | 3,76E+04 | 2,89E+04 | 2,29E+04 | 2,08E+03 | 7,78E-09 | 1 |
| Rb 86 | 9,84E+00 | 9,84E+00 | 9,84E+00 | 9,84E+00 | 9,80E+00 | 9,76E+00 | 9,43E+00 | 6,40E+00 | 1 | Xe 131 m | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,25E+02 | 1,01E+02 | 4, |
| Rb 87 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1,01E-07 | 1 | Xe 133 m | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,77E+04 | 1,07E+04 | 1, |
| Rb 88 | 2,11E+04 | 2,11E+04 | 2,11E+04 | 2,07E+04 | 1,18E+04 | 6,79E+03 | 2,42E+01 | 0 | 1 | Xe 135 | 1,15E+03 | 1,15E+03 | 1,15E+03 | 1,15E+03 | 1,15E+03 | 1,14E+03 | 1,04E+03 | 5,27E+01 | 4, |
| Rb 89 | 2,82E+04 | 2,82E+04 | 2,78E+04 | 1,64E+04 | 1,77E+01 | 4,05E-02 | 0 | 0 | 1 | Xe 135 m | 1,60E+03 | 1,61E+03 | 1,68E+03 | 2,38E+03 | 7,68E+03 | 1,05E+04 | 7,00E+03 | 7,65E-05 | 1 |
| Sr 89 | 2,61E+04 | 2,61E+04 | 2,61E+04 | 2,61E+04 | 2,60E+04 | 2,60E+04 | 2,37E+04 | 2,23E+04 | 5 | Xe 138 | 6,87E+03 | 6,86E+03 | 6,79E+03 | 6,20E+03 | 4,42E+03 | 3,50E+03 | 3,18E+02 | 1,19E-09 | 1 |
| Sr 90 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3,90E+02 | 3 | Cs 134 | 3,75E+04 | 3,73E+04 | 3,47E+04 | 1,67E+04 | 1,10E+01 | 1,64E-02 | 0 | 0 | 1 |
| Sr 91 | 3,47E+04 | 3,47E+04 | 3,47E+04 | 3,41E+04 | 2,84E+04 | 2,41E+04 | 4,56E+03 | 5,26E-05 | 1 | Cs 137 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,28E+02 | 3,25E+02 | 2,1 |
| Sr 92 | 3,50E+04 | 3,50E+04 | 3,48E+04 | 3,26E+04 | 1,72E+04 | 9,75E+03 | 2,88E+01 | 0,00E+00 | 1 | Cs 138 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,96E+02 | 3,95E+02 | 3,1 |
| Y 90 | 4,28E+02 | 4,28E+02 | 4,28E+02 | 4,28E+02 | 4,27E+02 | 4,26E+02 | 4,18E+02 | 3,92E+02 | 3 | Cs 139 | 3,94E+04 | 3,94E+04 | 3,93E+04 | 3,51E+04 | 1,93E+03 | 1,08E+02 | 1,81E-11 | 0 | 1 |
| Y 91 | 3,07E+04 | 3,07E+04 | 3,07E+04 | 3,07E+04 | 3,07E+04 | 3,07E+04 | 3,05E+04 | 2,70E+04 | 7 | Ba 137 m | 3,86E+04 | 3,85E+04 | 3,88E+04 | 1,19E+04 | 1,65E+01 | 7,99E-06 | 0 | 0 | 1 |
| Y 91 m | 2,00E+04 | 2,00E+04 | 2,00E+04 | 2,00E+04 | 1,77E+04 | 1,32E+04 | 2,88E+03 | 3,32E-05 | 1 | Ba 139 | 3,76E+02 | 3,76E+02 | 3,75E+02 | 3,74E+02 | 3,74E+02 | 3,74E+02 | 3,74E+02 | 3,74E+02 | 3,1 |
| Y 94 | 3,82E+04 | 3,81E+04 | 3,73E+04 | 2,22E+04 | 9,32E+01 | 7,19E-01 | 1,60E-22 | 0 | 1 | Ba 140 | 3,92E+04 | 3,92E+04 | 3,92E+04 | 3,71E+04 | 1,11E+04 | 3,65E+03 | 4,20E-02 | 0 | 1 |
| Zr 95 | 3,28E+04 | 3,28E+04 | 3,28E+04 | 3,28E+04 | 3,28E+04 | 3,27E+04 | 3,24E+04 | 2,90E+04 | 9 | La 140 | 3,88E+04 | 3,88E+04 | 3,88E+04 | 3,88E+04 | 3,86E+04 | 3,84E+04 | 3,05E+04 | 2,07E+04 | 7,1 |
| Zr 97 | 3,60E+04 | 3,60E+04 | 3,60E+04 | 3,56E+04 | 3,21E+04 | 2,94E+04 | 1,14E+04 | 3,79E-01 | 1 | La 141 | 3,96E+04 | 3,96E+04 | 3,96E+04 | 3,96E+04 | 3,96E+04 | 3,95E+04 | 3,88E+04 | 2,38E+04 | 8,1 |
| Nb 95 | 2,64E+04 | 2,64E+04 | 2,64E+04 | 2,64E+04 | 2,64E+04 | 2,64E+04 | 2,65E+04 | 2,73E+04 | 1 | La 142 | 3,57E+04 | 3,57E+04 | 3,57E+04 | 3,53E+04 | 2,36E+04 | 1,58E+04 | 2,68E+02 | 9,52E-18 | 1 |
| Nb 95 m | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,91E+02 | 3,66E+02 | 1 | Ce 141 | 3,56E+04 | 3,56E+04 | 3,56E+04 | 3,39E+04 | 1,15E+04 | 4,24E+03 | 1,49E-01 | 0 | 1 |
| Nb 97 | 3,61E+04 | 3,61E+04 | 3,61E+04 | 3,61E+04 | 3,40E+04 | 3,13E+04 | 1,16E+04 | 4,10E-01 | 1 | Ce 143 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,50E+04 | 3,44E+04 | 2,76E+04 | 3,1 |
| Nb 97 m | 3,11E+04 | 3,11E+04 | 3,10E+04 | 3,07E+04 | 2,77E+04 | 2,53E+04 | 9,88E+03 | 3,27E-01 | 1 | Ce 144 | 3,63E+04 | 3,63E+04 | 3,63E+04 | 3,62E+04 | 3,45E+04 | 3,29E+04 | 2,04E+04 | 1,07E+02 | 1 |
| Nb 102 | 2,36E+04 | 1,07E+04 | 1,08E+03 | 3,68E-07 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | Ce 146 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,06E+04 | 8,1 |
| Mo 99 | 3,82E+04 | 3,82E+04 | 3,82E+04 | 3,81E+04 | 3,71E+04 | 3,62E+04 | 2,85E+04 | 2,07E+03 | 1 | Pr 142 | 1,80E+04 | 1,80E+04 | 1,88E+04 | 8,06E+03 | 5,32E+00 | 7,94E-03 | 0 | 0 | 1 |
| Mo 101 | 3,12E+04 | 3,12E+04 | 2,92E+04 | 1,43E+04 | 1,16E+01 | 2,06E-02 | 0 | 0 | 1 | Pr 143 | 6,91E+02 | 6,91E+02 | 6,90E+02 | 6,84E+02 | 6,25E+02 | 5,77E+02 | 2,53E+02 | 2,99E-02 | 1, |
| Mo 102 | 2,64E+04 | 2,63E+04 | 2,43E+04 | 9,54E+03 | 8,16E-01 | 1,98E-04 | 0 | 0 | 1 | Pr 144 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,51E+04 | 3,46E+04 | 2,17E+04 | 1,1 |
| Tc 99 m | 3,30E+04 | 3,30E+04 | 3,30E+04 | 3,30E+04 | 3,29E+04 | 3,26E+04 | 2,69E+04 | 1,96E+03 | 1 | Pr 144 m | 1,19E+04 | 1,19E+04 | 1,18E+04 | 1,14E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,09E+04 | 1,06E+04 | 8,1 |
| Tc 101 | 3,12E+04 | 3,12E+04 | 3,12E+04 | 2,54E+04 | 9,34E+01 | 2,62E-01 | 0 | 0 | 1 | Pr 145 | 1,31E+02 | | | | | | | | |

Tabel 2. Konsentrasi dan Laju Lepas Radionuklida Di Balai Reaktor
(Perhitungan Model Untuk Hasil Fisi)^[1]

| Nuklida | Balai Reaktor / Ci/m ³ / | Venting kolam / Ci/jam / | Venting tangki tunda / Ci/m ³ / |
|----------|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| I-131 | 3,33E-12 | 3,11E-08 | 1,46E-05 |
| I-132 | 7,67E-12 | 7,16E-08 | 7,60E-08 |
| I-133 | 4,51E-11 | 4,21E-07 | 1,70E-06 |
| I-134 | --- | 1,15E-09 | 1,05E-10 |
| I-135 | 4,76E-11 | 4,44E-07 | 1,27E-06 |
| Br-82 | --- | --- | 7,83E-12 |
| Br-83 | --- | 1,00E-09 | 1,13E-08 |
| Jumlah | 1,04E-10 | 9,70E-07 | 1,77E-05 |
| Sr-89 | --- | 8,40E-10 | --- |
| Sr-90 | --- | 5,17E-12 | --- |
| Y-90 | --- | 1,67E-08 | --- |
| Y-91 | --- | 9,03E-10 | --- |
| Zr-95 | --- | 8,52E-10 | --- |
| Nb-95 | --- | 1,67E-09 | --- |
| Ru-103 | --- | 2,33E-08 | --- |
| Rh-103 m | --- | 8,73E-11 | --- |
| Ru-106 | --- | 9,94E-12 | --- |
| Rh-106 | --- | 5,94E-10 | --- |
| Sn-125 | --- | 1,17E-11 | --- |
| Sb-125 | --- | --- | --- |
| Te-127 m | --- | 1,41E-11 | --- |
| Te-129 m | --- | 3,55E-10 | --- |
| Te-131 m | --- | 1,60E-08 | --- |
| Te-132 | --- | 1,01E-08 | --- |
| Cs-137 | --- | 5,15E-12 | --- |
| Ba-140 | --- | 4,32E-08 | --- |
| La-140 | --- | 2,63E-08 | --- |
| Ce-141 | --- | 1,68E-09 | --- |
| Ce-144 | --- | 1,72E-10 | --- |
| Pr-144 | --- | 9,71E-18 | --- |
| Nd-147 | --- | 1,74E-09 | --- |
| Jumlah | 1,55E-11 | 1,45E-07 | 0,00E±00 |
| Kr-83 m | 1,46E-07 | 1,30E-03 | 1,17E-07 |
| Kr-85 | 8,42E-07 | 1,06E-08 | 2,93E-07 |
| Kr-85 m | 2,09E-06 | 6,66E-03 | 1,51E-06 |
| Kr-88 | 4,45E-07 | 1,88E-02 | 4,43E-06 |
| Xe-131 m | 1,16E-05 | 1,37E-03 | 1,11E-04 |
| Xe-133 | 1,39E-07 | 7,86E-03 | 3,03E-04 |
| Xe-133 m | 1,14E-02 | 1,95E-02 | 2,82E-04 |
| Xe-135 | 7,13E-07 | 4,15E-03 | 2,62E-04 |
| Xe-135 m | 2,01E-06 | 1,08E-11 | --- |
| Xe-138 | --- | --- | --- |
| Jumlah | 6,39E-06 | 5,97E-02 | 9,64E-04 |

*) < 10⁻¹² Ci/m³

Tabel 3. Laju Lepasn ZRA Pada Cerobong (Perhitungan Model)^[1]

| Nuklida | Cerobong | |
|----------|-----------|----------|
| | Ci/jam | Ci/tahun |
| I-131 | 1,64E-07* | 1,44E-03 |
| I-132 | 1,04E-07 | 9,11E-04 |
| I-133 | 6,16E-07 | 5,40E-03 |
| I-134 | 4,02E-09 | 3,53E-05 |
| I-135 | 6,46E-07 | 5,66E-03 |
| Br-82 | 1,35E-10 | 1,19E-06 |
| Br-83 | 1,85E-09 | 1,62E-05 |
| Jumlah | 1,54E-06 | 1,35E-02 |
| Sr-89 | 1,83E-11 | 1,61E-07 |
| Sr-90 | 1,13E-13 | 9,88E-10 |
| Y - 90 | 3,79E-10 | 3,32E-06 |
| Y - 91 | 1,97E-11 | 1,73E-07 |
| Zr-95 | 1,86E-11 | 1,63E-07 |
| Nb-95 | 3,66E-11 | 3,20E-07 |
| Ru-103 | 6,95E-10 | 6,09E-06 |
| Rh-103 m | 9,90E-11 | 8,68E-07 |
| Ru-106 | 2,17E-13 | 1,90E-09 |
| Rh-106 | 8,58E-12 | 7,52E-08 |
| Sn-125 | 1,69E-13 | 1,48E-09 |
| Sb-125 | 1,10E-13 | 9,62E-10 |
| Te-127 m | 2,89E-12 | 2,53E-08 |
| Te-129 m | 1,56E-10 | 1,37E-06 |
| Te-131 m | 3,12E-10 | 2,73E-06 |
| Te-132 | 1,45E-10 | 1,27E-06 |
| Cs-137 | 3,32E-10 | 2,91E-06 |
| Ba-140 | 8,53E-10 | 7,47E-06 |
| La-140 | 3,88E-10 | 3,40E-06 |
| Ce-141 | 2,54E-11 | 2,22E-07 |
| Ce-144 | 2,28E-11 | 1,99E-07 |
| Pr-144 | 1,34E-11 | 1,17E-07 |
| Nd-147 | 2,49E-11 | 2,18E-07 |
| Sm 151 | 1,76E-15 | 1,54E-11 |
| Jumlah | 3,55E-09 | 3,11E-05 |
| Kr-83 m | 1,85E-03 | 1,62E01 |
| Kr-85 | 1,76E-08 | 1,54E-04 |
| Kr-85 m | 9,51E-03 | 8,33E01 |
| Kr-88 | 2,68E-02 | 2,35E02 |
| Xe-131 m | 1,95E-03 | 1,71E01 |
| Xe-133 | 1,12E-02 | 9,83E01 |
| Xe-133 m | 2,80E-02 | 2,45E02 |
| Xe-135 | 5,94E-03 | 5,20E01 |
| Xe-135 m | 4,97E-08 | 4,36E-04 |
| Xe-138 | 4,75E-08 | 4,16E-04 |
| Jumlah | 8,53E-02 | 7,47E02 |

