
KAJIAN AWAL DATA DAN SIFAT KARAKTERISTIKA FISIS BAHAN PERISAI RADIASI UNTUK REAKTOR DAYA JENIS PWR

Pudjijanto MS.

Pusat Pengembangan Teknologi Reaktor Riset - BATAN

ABSTRAK:

KAJIAN AWAL DATA DAN SIFAT KARAKTERISTIKA FISIS BAHAN PERISAI RADIASI UNTUK REAKTOR RISET DAN DAYA JENIS PWR. Telah dipilih sejumlah material tertentu baik elemental maupun kompon (campuran atau ikatan kimia) sebagai bahan struktur perisai radiasi reaktor daya berikut rapat massa total dan komposisi elemen penyusunnya masing-masing dalam persen berat. Telah dilakukan komputasi menggunakan program XCOM31 untuk menentukan koefisien atenuasi linier totalnya terhadap foton dari sejumlah kelompok energi untuk berbagai jenis material baik elemental maupun kompon. Pembagian kelompok energi foton (18 kelompok) berdasar pada cara pengelompokan energi foton pada laju emisi foton hasil aktivasi, fisi dan aktinida yang diperoleh dari program ORIGEN2.1. Dengan hasil komputasi koefisien atenuasi ini pada tahapan penelitian lanjutan berikutnya akan digunakan sebagai data masukan pada program komputer (GRACE2) guna menentukan dan mengevaluasi ketebalan efektif perisai reaktor daya jenis PWR-1000/1300 MW(e).

Kata kunci: perisai radiasi, reaktor, foton, atenuasi

ABSTRACT:

EARLY STUDY OF DATA AND PROPERTIES OF PHYSICS CHARACTERISTIC OF RADIATION SHIELDING MATERIALS FOR RESEARCH AND PWR POWER REACTOR. A number of certain material of goodness of elemental and also of compound (chemical bond or mixture) upon which structure shielding of power reactor radiation following total density and its compiler element composition each in %w have been selected. Total linear attenuation coefficient to photon from a number of group of energies to various material type and also elemental of compound have been done by computing use program of XCOM31. Division of group of photon energy (18 group) based on the way of subdividing of photon energy at photon emission rate result of activation, and fissile of actinide obtained from program ORIGEN2.1. With result of this attenuation coefficient computing at step research of next continuation will be used as input data to computer program (GRACE2) to determine and evaluate effective thick of shield of PWR-1000 / 1300 MW(E) power reactor.

Keyword: shield of radiasi, reactor, photon, attenuation.

PENDAHULUAN

Teras reaktor nuklir (untuk selanjutnya disingkat dengan teras) adalah sebuah obyek yang dimensi volumenya nisbi besar. Zarah bermuatan dengan panjang jejak (lintas) bebas rerata kecil tak bisa meninggalkan teras dengan mudah. Pelepasan (bocoran) ini hanya mungkin untuk neutron dan sinar- γ saja, tetapi pada umumnya mereka dalam banyak hal terserap juga di dalam teras. Nilai k_0 (faktor perlipatan neutron) kecil terutama dalam reaktor berbahan bakar uranium alam mengharuskan volume teras perlu dibuat

agak besar sehingga persentase kebocoran neutron dijaga sekecil mungkin dan harus selalu diamati. Suku $(1 - \omega)$ menunjukkan fraksi neutron yang tidak diserap oleh material teras. Tidak semua neutron terhambur ke dalam ruang di sekitarnya, sebagian diserap oleh batang kendali dan reflektor. Sebagian besar dari sinar- γ teras dihasilkan dalam uranium, suatu material berat yang secara sangat efektif menyerap radiasi- γ . Moderator, reflektor neutron dan material lain juga berperan-serta dalam penyerapan sinar- γ dan hanya sebagian kecil saja dari radiasi- γ yang terhambur di luar reflektor. Kira-kira ada sekitar 3 % dari total energi pembelahan atau hingga 25 % dari energi yang terkait dengan pembentukan neutron dan sinar- γ di dalam reaktor bocor ke luar dari volume teras di luar reflektor. Nilai mutlak dari fraksi radiasi ini intensitasnya sangat tinggi. Oleh karenanya, tidak hanya sekedar perlu mempunyai perisai biologi untuk mengurangi fluks neutron dan sinar- γ dengan jutaan atau bahkan puluhan juta kali saja, tetapi juga perlu perisai khusus dari bejana reaktor (perisai termal), perisai atau pendinginan dinding depan dari perisai biologik beton dimana sebagian besar dari radiasi yang terhambur diserapnya.

Rentang energi kinetik neutron yang meninggalkan reaktor sangat lebar, dari energi pembelahan ($E_0 \sim 10$ MeV) sampai energi termal ($kT = 0,0253$ eV). Reaktor-reaktor termal (kecuali yang menggunakan moderator air) menghamburkan banyak neutron dengan energi rendah. Teras yang dimoderasi dan didinginkan dengan air ringan secara komparatif volumenya kecil dan air cukup transparan untuk neutron cepat dalam kaitannya dengan nilai tampang lintang σ_{tr} , yang kecil dari hidrogen pada energi tinggi, menyebabkan peningkatan kebocoran neutron cepat. Reaktor-reaktor cepat menghamburkan neutron cepat. Energi sinar- γ yang meninggalkan teras terletak dalam jangkauan antara 0.1–12 MeV. Sinar- γ yang dipancarkan oleh inti tereksitasi dihasilkan dalam proses pembelahan, peluruhan- β dan tangkapan radiasi neutron dengan suatu nilai energi resultan sekitar 20 MeV per aksi pembelahan. Ini adalah energi dari sekitar 10 inti terangsang yang mengalami deeksitasi sinar- γ entah satu per satu atau dalam dua tahapan atau lebih. Energi eksitasi fragmen belahan-inti setelah pancaran neutron dan inti (hasil peluruhan- β) relatif cukup kecil tetapi dalam serapan neutron ini dapat menjangkau sampai 8 MeV atau lebih sebab dalam hal ini sama dengan energi ikat mereka. Pada eksitasi besar seperti itu inti sering memancarkan kuantum energi tinggi dekat dengan energi eksitasi totalnya.

De-eksitasi beberapa inti pada umumnya disertai oleh penampilan (walaupun kemungkinannya kecil) sinar- γ keras. Yield dari sinar- γ tertangkap yang dihasilkan ditentukan oleh nilai fluks neutron dan tampang lintang makroskopik dari inti penyerap neutron, oleh banyaknya penyerapan. Ini juga ditentukan oleh yield sinar- γ dengan energi yang berbeda selama transisi dari inti yang dalam keadaan terbangkit ke keadaan tenaga dasarnya. Persentase sinar- γ energi tinggi dalam fluks total yang muncul dari reaktor tidaklah besar sebab hanya 1/3 (sepertiga) dari semua energi sinar- γ yang dihasilkan setelah satu pembelahan dipancarkan selama proses tangkapan radiatif neutron, sementara 2/3 (duapertiga) dari semua sinar- γ tertangkap dipancarkan oleh ^{238}U dan mempunyai energi tidak lebih tinggi dari 4 MeV. Sebagian dari sinar- γ mengalami hamburan Compton, yang mengurangi energi mereka sebelum mereka meninggalkan reaktor. Sebagai hasilnya, kurang dari 10 % dari semua sinar- γ yang terletak dalam rentang energi lebih dari 2 MeV, dan sekitar 1 % dari sinar- γ mempunyai energi lebih dari 4 MeV.

Sasaran yang hendak diperoleh dari kajian awal penelitian ini adalah mendapatkan data karakteristik perisai reaktor daya jenis PWR – 1300 MW sebagai berikut:

Data sifat fisis bahan perisai radiasi, terutama interaksinya terhadap radiasi pengion (foton dan neutron), tampang interaksi foton dengan materi untuk hamburan, serapan fotolistrik, dan produksi pasangan ion serta koefisien pelemahan total gayut energi (18 kelompok) dalam berbagai material elemental dan kompon (baik campuran maupun ikatan kimiawi) sebagai bahan struktur perisai reaktor riset dan daya.

Sedangkan tujuan yang hendak dicapai dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan kemudahan dalam perolehan data mengenai sifat karakteristiknya bahan (material) dalam melemahkan radiasi foton dan neutron guna merancang bangun perisai reaktor daya tipe PWR untuk PLTN I di Indonesia

DASAR TEORI

Kebutuhan bahan (material) untuk perisai adalah kontroversal. Perisai perlu menggunakan bahan yang seberat mungkin untuk melindungi terhadap radiasi- γ . Pengadaan perisai untuk neutron termal tidak begitu banyak mengalami kesukaran apapun karena dimana-mana ada banyak bahan yang bersifat penyerap neutron termal kuat. Sebagai contoh, lapisan cadmium setebal 1 mm, mampu menahan sembarang fluks

neutron termal. Sayangnya jarang atau bahkan hampir tidak ada bahan penyerap efektif dari neutron cepat dan menengah. Tampak bahwa pelambatan neutron memerlukan bahan lebih sedikit dibanding dengan penyerapan mereka pada energi tinggi, air adalah moderator terbaik dan termurah. Karena τ (umur Fermi) $\gg L^2$ (luas difusi) untuk air, maka ia tidak perlu tambahan material lain untuk menyerap neutron termal yang dihasilkan sebab inti hidrogen menyerapnya cukup kuat. Akan tetapi, air (H_2O) terdiri dari atom-atom ringan dan menyerap sinar- γ dengan lemah. Sebagai hasilnya, perisai biologi sebuah reaktor harus secara serempak memenuhi 2 (dua) syarat kebutuhan, yaitu: 1) ia harus mengandung sebanyak mungkin atom-atom hidrogen ringan (H) untuk memperlambat neutron dan, 2) ia harus pula berisi sebanyak mungkin atom-atom berat untuk penyerapan efektif sinar- γ . Kesimpulan sementara, perisai reaktor haruslah berupa suatu struktur pejal (yang masif dan besar ukurannya) dan ia harus dibuat dari bahan yang tidak begitu mahal harganya dan lazim digunakan dalam pembangunan. Perisai harus berupa suatu monolit tanpa celah sedikitpun yang dapat memancarkan bocoran radiasi. Oleh karena itu, bahan yang paling baik dapat digunakan untuk pembuatan perisai radiasi adalah beton dari kenyataan bahwa bangunan beton terdiri dari atom-atom ringan, mempunyai kepadatan (rapat massa) $2,0 \sim 2,3 \text{ g/cm}^3$ dan mengandung air dengan kerapatan sekitar $0,2 \text{ g/cm}^3$, yang adalah 5 kali lebih kecil dibanding dengan rapat massa air sendiri.

Untung (atau mungkin hanya kebetulan saja), sifat perisai beton dapat ditingkatkan dengan menggunakan bahan pengganti pasir dan kerakal / kerikil pengisi-penguat lain yang dapat meningkatkan keduanya, yaitu: 1) kandungan air dan 2) kepadatan beton. Untuk perisai reaktor nuklir, beton berat digunakan dengan bahan pengisi-penguat seperti batu besi cokelat (limonite) $2 \text{ Fe}_2\text{O} \times 3 \text{ H}_2\text{O}$, batu barite BaSO_4 , batu-besi titan (ilmenite) FeTiO_3 , dengan kepadatan mendekati $3,5 \sim 4,2 \text{ g/cm}^3$. Pada waktu yang bersamaan, beton dengan kepadatan $2,2 \sim 2,5 \text{ g/cm}^3$ sering digunakan juga sebagai bahan perisai radiasi. Perisai reaktor eksperimen atau reaktor-reaktor yang digunakan untuk tujuan transport dimana ketebalan terkecil yang dimungkinkan atau beban berat total yang sering mungkin diperlukan dibuat dari material yang agak lebih mahal. Dinding-dinding parafin, baja, timbal dan bismut, beton dengan besi cor dan beton yang diisi dengan bahan penguat lain dengan rapat massa 6 g/cm^3 bisa juga digunakan. Perisai yang dikombinasikan pun bisa dikerjakan. Dalam hal ini, lapisan pertama adalah air untuk proteksi terhadap neutron dan lapisan kedua adalah beton untuk proteksi terhadap radiasi- γ . Sebagai perisai terhadap

neutron dari kemungkinan timbulnya sumber sinar- γ serempak dari proses tangkapan radiatif, perisai beton harus selalu ditempatkan setelah perisai air dan bukan sebaliknya. Lapisan pertama dari perisai untuk reaktor cepat kadang-kala dibuat dari grafit (memoderasi neutron) dengan menambah sedikit borium (menangkap neutron termal) sebab $L^2 \gg \tau$ untuk grafit. Ketebalan air dan perisai grafit kadang-kala menjangkau hingga 1 m dan perisai beton hingga 2,53 m. Seluruh massa perisai biologi beton dalam sejumlah banyak reaktor dapat sampai mencapai ribuan dan atau bahkan puluhan ribu ton.

Akhirnya, dengan berpangkal tolak dari latar belakang masalah di atas, maka pada usulan penelitian tahun 2005 ini akan dilakukan penentuan tampang interaksi foton dengan materi untuk hamburan, serapan fotolistrik, dan produksi pasangan ion serta koefisien pelemahan total gayut energi (18 kelompok) dalam berbagai elemen dan kompon (campuran) sebagai bahan struktur perisai reaktor dan radiasi lainnya.

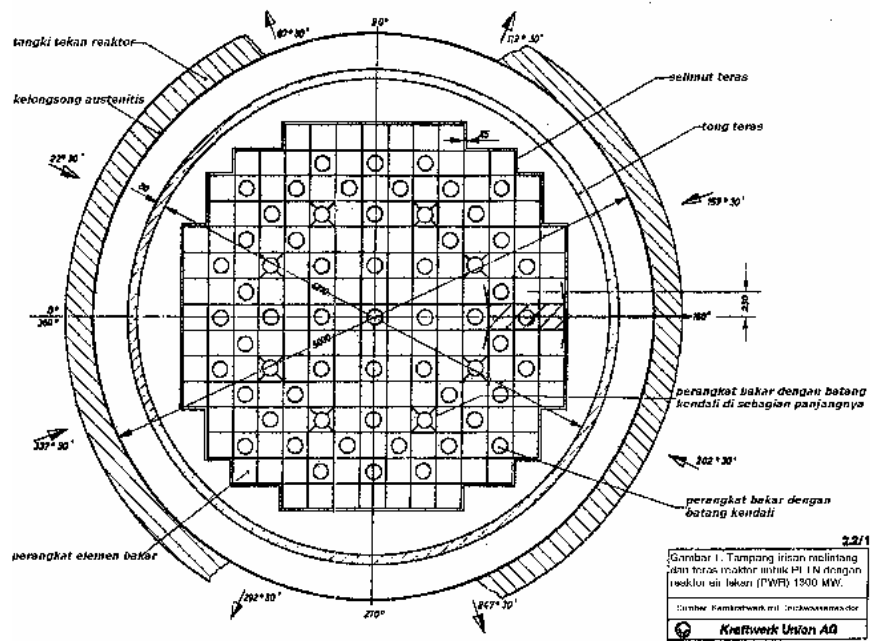
Penelitian ini merupakan suatu kajian awal data dan sifat fisis khas bahan perisai radiasi untuk reaktor riset dan daya jenis PWR

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh pada penelitian ini adalah data teknis teras reaktor daya, meliputi: selimut teras, tong teras (perisai termal) dan tangki tekan reaktor dari sebuah PLTN standar – 1300 MW elektrik rancangan “Kraftwerk Union AG”, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1, yang menyajikan suatu pandangan tampang irisan melintang dari teras reaktor, selimut teras, tong teras (perisai bahang), dan tangki tekan reaktor. Teras berisi 193 perangkat bahan bakar dengan 103 ton uranium yang diperkaya 3,2% dan 61 batang kendali. Air bertindak sebagai pendingin dan moderator pada tekanan 158 bar dengan suhu *inlet* (temperatur pintu saluran masuk) 291 °C dan suhu *outlet* (temperatur pintu saluran keluar) 326 °C. Tinggi aktif teras adalah 3,9 m dan garis tengah radial 3,45 m sepanjang sumbu (poros) utama. Tameng (perisai) bahang adalah sebuah tong (silinder) baja tahan-karat dengan garis tengah dalam 4,21 m dan tebalnya 8 cm. Tangki tekan reaktor austenitis bagian dalam mempunyai garis tengah 5 m dan tebal total 25,6 cm. Tangki tekan diselubungi dengan isolasi (penyekat panas) dan perisai beton utama yang secara normal dirancang dalam dua lapisan terpisah dengan ketebalan total 2 m.

Dimensi radial dari suatu konfigurasi tabung silindris satu-dimensi disajikan dalam Tabel 1 dan komposisi material disajikan dalam Tabel 2 s.d. 4.

Beberapa kode komputer sederhana yang kemungkinan akan digunakan, a.l. adalah: XCOM-3.1 (generator koefisien pelemahan linier foton- γ), MODAIM-6.2 (difusi neutron 1-D, banyak daerah, banyak kelompok, takgayut waktu), CADREM (shielding), GRACE1 (shielding) dan sejumlah kode bantu lokal lainnya yang sudah diuji validitasnya.



Gambar 1. Pandangan tampang irisan nelintang dari teras reaktor, selimut teras, tong teras (perisai termal) dab tangki tekan reaktor dari sebuah PLTN baku – 1300 MW. Keterangan: lihat tabel sebagai berikut di bawah ini.

Tabel 1. Dimensi radial sepanjang sumbu utama dengan perisai beton reaktor daya PWR-1300 MW termal yang disederhanakan.

Zona	Jejari Zona [cm]	Ketebalan Zona [cm]
Teras Reaktor	172.5	-
Selimut teras	175.0	2.5
1. Lapisan air (1)	210.5	35.5
Tong teras	218.5	8.0
2. Lapisan air (2)	250.0	31.5
Kelongsong austenitis	250.6	0.6
Tangki tekan	275.6	25.0
Perisai beton	475.6	200.0

Tabel 2. Komposisi bahan struktur reaktor daya PWR-1300 MW termal [10^{24} atom cm^{-3}].

Zona Nuklida	Teras Reaktor	Slimut teras, Tong teras, Kelongsong austenitis	Tangki tekan	Lapisan air (1) dan (2)	Perisai beton
H	2.8226E-02	-	-	5.0556E-02	4.4126E-03
O	2.7154E-02	-	-	2.5278E-02	4.7751E-02
Al	-	-	-	-	2.4553E-03
Si	-	-	-	-	9.4350E-03
Ca	-	-	-	-	6.6115E-03
Cr	-	1.6913E-02	-	-	-
Mn	-	1.1187E-03	-	-	-
Fe	9.8235E-04	6.4478E-02	8.465E-02	-	-
Ni	-	8.5357E-03	-	-	-
Zr	4.3246E-03	-	-	-	-
^{235}U	2.1040E-04	-	-	-	-
^{238}U	6.3087E-03	-	-	-	-

Tabel 3. Rapat massa bahan struktur reaktor daya PWR-1300 MW termal [gram cm^{-3}].

Zona Nuklida	Nomor massa	Teras Reaktor	Selimut teras, dsb.	Tangki tekan	Lapisan air (1) dan (2)	Perisai beton
H	1.0079000	0.047238			0.084608	0.007385
O	15.9994000	0.721372			0.671534	1.268551
Al	26.9815400					0.11
Si	28.0855000					0.439993
Ca	40.0800000					0.439997
Cr	51.9960000		1.4602			
Mn	54.9380000		0.102049			
Fe	55.8470000	0.091094	5.979063	7.849619		
Ni	58.6900000		0.831812			
Zr	91.2200000	0.655025				
^{235}U	235.0439252	0.082114				
^{238}U	238.0507858	2.493626				
		4.090468	8.373124	7.849619	0.756142	2.265926

Tabel 4. Persen berat bahan struktur reaktor daya PWR-1300 MW termal [persen].

Zona Nuklida	Nomor massa	Teras Reaktor	Selimut teras, dsb.	Tangki tekan	Lapisan air (1) dan (2)	Perisai beton
H	1.0079000	1.155%			11.189%	0.326%
O	15.9994000	17.635%			88.811%	55.984%
Al	26.9815400					4.855%
Si	28.0855000					19.418%
Ca	40.0800000					19.418%
Cr	51.9960000		17.439%			
Mn	54.9380000		1.219%			
Fe	55.8470000	2.227%	71.408%	100.000%		
Ni	58.6900000		9.934%			
Zr	91.2200000	16.013%				
²³⁵ U	235.0439252	2.007%				
²³⁸ U	238.0507858	60.962%				
		100.000%	100.000%	100.000%	100.000%	100.000%

Contoh data masukan interaktif dan keluaran hasil perhitungan dengan program XCOM31 untuk nilai tampang interaksi foton dengan materi untuk hamburan, serapan fotolistrik, dan produksi pasangan ion serta koefisien pelemahan total gayut energi (18 kelompok) dalam berbagai material elemental dan kompon (baik campuran maupun ikatan kimiawi) sebagai bahan struktur perisai reaktor untuk material 1 (bahan bakar) diberikan pada Tabel 5 dan 6. Sedangkan hasil keluaran untuk nilai-nilai besaran fisis yang sama untuk material yang lain (material 2 – 5) diberikan dalam Tabel 4 – 8.

Tabel 5. Data masukan interaktif bagi program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 1

```

/=====["MYXCOM31-B"]=====
| XCOM [Versi 3.1.b] ini adalah Program komputer sekaligus Data base yang
| dapat digunakan untuk menghitung tampang interaksi foton dengan materi,
| yaitu tampang lintang foton untuk hamburan koheren dan juga inkoheren,
| tampang serapan foto listrik, tampang produksi pasangan ion oleh medan
| inti atom dan medan elektron atomis, tampang atau koefisien pelemahan
| total, baik dengan maupun tanpa sumbangan dari hamburan koheren (hanya
| hamburan inkoheren saja), dalam sembarang elemen (unsur tunggal), bahan
| kompon atau campuran, dengan rentang energi dari 1 keV hingga 100 GeV.
|-----|
| Program dirancang-bangun oleh: Martin J. Berger dan John H. Hubbell, dan
| dimodifikasi seperlunya oleh: Ki Pudjijanto MS, P2TRR, BATAN, Serpong.
|-----|
| Program mulai digunakan pada : 10 Nopember 1999 hingga sekarang (200_).
|-----|
\=====

RONDE KE- 1
Hari ini: Jumat Legi ; tanggal 08-Jul-2005; Pukul: 16:37:23 Waktu PC-ku ini.
-----
Kontinyu? Tekan <Enter>!

1. Pengguna, maks. 20 char.: Ir. Pudjijanto MS.
2. Institusi, maks. 35 char.: BPTR, P2TRR, BATAN, PUSPIPTEK, Serpong.

Ketik dan <Enter> nama dari bahan/material yang akan dievaluasi!
Bahan: Bahan struktur teras reaktor daya untuk PLTN tipe PWR 1300 MW termal.

Pilihan-pilihan untuk mengkarakterisasi bahan atau material:
1 = Bahan elemental (unsur kimia), dispesifikasi dengan nomor atomnya, Z;
2 = Bahan elemental (unsur kimia), dispesifikasi dengan simbol kimianya;
3 = Bahan kompon (senyawa kimia), dispesifikasi dengan rumus molekul kimianya;
4 = Bahan campuran, terdiri dari elemen-elemen dan komponen-komponen,
dispesifikasi dengan simbol/rumus molekul kimianya dan fraksi beratnya, W.
Ketik dan <Enter> sandi pilihan Anda (1,2,3, atau 4?): 4

Ketik dan <Enter> banyaknya (jumlah) komponen dalam bahan campuran!: 6

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 1!: H
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 1.155

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 2!: O
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 17.635

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 3!: Fe
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 2.227

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 4!: Zr
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 16.013

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 5!: U
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 2.007

Ketik dan <Enter> simbol/rumus molekul kimia untuk komponen 6!: U
Ketik dan <Enter> fraksi bobot/berat untuk komponen ini!: 60.962

Periksa dulu ke"sahih"an_nya!
-----
Komponen| Fraksi | Simbol(formula)
ke: |berat(bobot):| kimia:
-----
1 1.155000 H
2 17.635000 O
3 2.227000 Fe
4 16.013000 Zr
5 2.007000 U ← maksudnya U-235
6 60.962000 U ← maksudnya U-238
-----
Jumlah : 99.999000

Pilihan-pilihan untuk menerima atau menolak data komposisi bahan:

```

Input Interaktif

```

1 = Menerima, tetapi fraksi bobot Wtot dinormalisasi = 1.0
2 = Menolak, & mengenter ulang set fraksi bobot yang baru.
Ketik dan <Enter> sandi pilihan Anda! (1 atau 2?): 1

Pilihan-pilihan Daftar (Tabel) Tenaga Foton untuk data hasil luaran:
1 = Hanya "grid" tenaga baku (standar) saja;
2 = "Grid" tenaga baku ditambah tenaga-tenaga tambahan;
3 = Hanya tenaga-tenaga tambahan saja.
Ketik dan <Enter> sandi pilihan Anda! (1, 2 atau 3?): 3

Moda pemasukan tenaga-tenaga foton tambahan:
1 = Mengetik dan meng<Enter> secara langsung dari papan tombol ketik;
2 = Mengumpukan masuk dari file data masukan yang telah disiapkan sebelumnya.
Ketik dan <Enter> sandi pilihan Anda! (1 atau 2?): 2

Spesifikasikan nama file lama yang berisi daftar tenaga tambahan ini!
(Spesifikasi dapat meliputi/termasuk "driver" & "path")
Nama file: EORG18G.DTA

Pembacaan data daftar tenaga, dalam proses.

Spesifikasikan nama file baru untuk menyimpan data hasil perhitungan XCOM ini!
(Spesifikasi dapat meliputi/termasuk "driver" & "path", maksimum 30 karakter)
Nama file: A:TERASPWR.OUT

Tabel data tampang lintang dan judulnya telah disimpan dalam e-file.
Nama filenya: A:TERASPWR.OUT

Pilihan-pilihan untuk mengelola data hasil luaran selanjutnya:
1 = Takada lagi luaran yang perlu dikelola, garapan selesai, program berhenti;
2 = Memilih deret tabel untuk disimpan dalam media disket atau "hard-disk" (HD);
3 = Main lagi mulai dari awal dengan inovasi lain dan masukan data baru.
Ketik dan <Enter> angka pilihan Anda! (1 atau 2?): 3
    
```

Tabel 6. Keluaran hasil perhitungan oleh program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 1

Ouput

TABEL TAMPANG LINTANG INTERAKSI RADIASI FOTON GAMMA (SINAR X) DENGAN MATERI.

Material: Bahan struktur teras reaktor daya untuk PLTN tipe PWR 1300 MW termal

Konstituens (Nomor Atomis: Fraksi berat/bobot)
1: .01155 8: .17635 26: .02227 40: .16013 92: .62970

Koefisien Interaksi Parsial dan Koefisien Pelemahan Total:

=====\ TENAGA HAMBURAN SERAPAN PRODUKSI PASANGAN KOEF. PELEMAH TOT. FOTON-X ----- ----- FOTO- DALAM DALAM DENGAN TANPA ATAU -G KOHEREN INKOHEREN LISTRIK MEDAN MEDAN HAMBURAN HAMBURAN (GAMMA) NUKLIR ELEKTRON KOHEREN KOHEREN (MeV) (cm2/g) (cm2/g) (cm2/g) (cm2/g) (cm2/g) (cm2/g) (cm2/g) =====\ -----\							
1.000E-02	3.878E+00	6.752E-02	1.256E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.295E+02	1.256E+02
2.500E-02	1.406E+00	9.767E-02	4.637E+01	0.000E+00	0.000E+00	4.787E+01	4.647E+01
3.750E-02	8.053E-01	1.072E-01	1.612E+01	0.000E+00	0.000E+00	1.704E+01	1.623E+01
5.750E-02	4.245E-01	1.125E-01	5.141E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.678E+00	5.254E+00
8.500E-02	2.249E-01	1.123E-01	1.779E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.116E+00	1.891E+00
1.250E-01	1.178E-01	1.078E-01	2.443E+00	0.000E+00	0.000E+00	2.669E+00	2.551E+00
2.250E-01	4.142E-02	9.498E-02	5.406E-01	0.000E+00	0.000E+00	6.770E-01	6.356E-01
3.750E-01	1.624E-02	8.075E-02	1.499E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.468E-01	2.306E-01
5.750E-01	7.259E-03	6.855E-02	5.498E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.308E-01	1.235E-01
8.500E-01	3.424E-03	5.782E-02	2.362E-02	0.000E+00	0.000E+00	8.487E-02	8.145E-02
1.250E+00	1.615E-03	4.799E-02	1.099E-02	3.055E-04	0.000E+00	6.090E-02	5.928E-02
1.750E+00	8.333E-04	4.022E-02	5.937E-03	3.020E-03	0.000E+00	5.001E-02	4.918E-02
2.250E+00	5.074E-04	3.484E-02	3.881E-03	5.934E-03	2.140E-07	4.516E-02	4.466E-02
2.750E+00	3.407E-04	3.097E-02	2.816E-03	8.490E-03	5.174E-06	4.262E-02	4.228E-02
3.500E+00	2.108E-04	2.670E-02	1.952E-03	1.178E-02	2.432E-05	4.067E-02	4.046E-02
5.000E+00	1.036E-04	2.118E-02	1.175E-03	1.716E-02	8.333E-05	3.971E-02	3.968E-02
7.000E+00	5.290E-05	1.683E-02	7.516E-04	2.276E-02	1.720E-04	4.056E-02	4.051E-02
9.500E+00	2.875E-05	1.354E-02	5.124E-04	2.831E-02	2.755E-04	4.267E-02	4.264E-02

Tabel 7. Keluaran hasil perhitungan oleh program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 2

TABEL TAMPANG LINTANG INTERAKSI RADIASI FOTON GAMMA (SINAR X) DENGAN MATERI.							
Material: Bahan struktur selimut teras reaktor daya untuk PLTN tipe PWR 1300 M							
Konstituen (Nomor Atomis: Fraksi berat/bobot)							
24: .17439 25: .01219 26: .71408 28: .09934							
Koefisien Interaksi Parsial dan Koefisien Pelemahan Total:							
=====							
TENAGA	HAMBURAN		SERAPAN	PRODUKSI	PASANGAN	KOEFS. PELEMAH TOT.	
FOTON-X	FOTO-		FOTO-	DALAM	DALAM	DENGAN	TANPA
ATAU -G	KOHEREN	INKOHEREN	LISTRIK	MEDAN	MEDAN	HAMBURAN	HAMBURAN
(GAMMA)				NUKLIR	ELEKTRON	KOHEREN	KOHEREN
(MeV)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)

1.000E-02	1.195E+00	8.565E-02	1.674E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.687E+02	1.675E+02
2.500E-02	3.738E-01	1.239E-01	1.304E+01	0.000E+00	0.000E+00	1.353E+01	1.316E+01
3.750E-02	1.981E-01	1.332E-01	3.966E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.297E+00	4.099E+00
5.750E-02	9.791E-02	1.358E-01	1.098E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.332E+00	1.234E+00
8.500E-02	5.001E-02	1.325E-01	3.326E-01	0.000E+00	0.000E+00	5.151E-01	4.651E-01
1.250E-01	2.485E-02	1.249E-01	1.014E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.511E-01	2.263E-01
2.250E-01	8.182E-03	1.077E-01	1.681E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.326E-01	1.245E-01
3.750E-01	3.034E-03	9.035E-02	3.789E-03	0.000E+00	0.000E+00	9.717E-02	9.414E-02
5.750E-01	1.306E-03	7.614E-02	1.217E-03	0.000E+00	0.000E+00	7.867E-02	7.736E-02
8.500E-01	6.008E-04	6.397E-02	4.917E-04	0.000E+00	0.000E+00	6.506E-02	6.446E-02
1.250E+00	2.786E-04	5.296E-02	2.226E-04	6.985E-05	0.000E+00	5.353E-02	5.325E-02
1.750E+00	1.424E-04	4.429E-02	1.232E-04	8.054E-04	0.000E+00	4.536E-02	4.522E-02
2.250E+00	8.605E-05	3.841E-02	8.227E-05	1.953E-03	2.357E-07	4.053E-02	4.044E-02
2.750E+00	5.764E-05	3.410E-02	6.091E-05	3.165E-03	5.701E-06	3.739E-02	3.733E-02
3.500E+00	3.561E-05	2.938E-02	4.335E-05	4.915E-03	2.682E-05	3.440E-02	3.437E-02
5.000E+00	1.745E-05	2.331E-02	2.710E-05	7.990E-03	9.205E-05	3.144E-02	3.142E-02
7.000E+00	8.902E-06	1.852E-02	1.791E-05	1.133E-02	1.905E-04	3.006E-02	3.005E-02
9.500E+00	4.833E-06	1.490E-02	1.251E-05	1.461E-02	3.058E-04	2.983E-02	2.983E-02

Tabel 8. Keluaran hasil perhitungan oleh program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 3

TABEL TAMPANG LINTANG INTERAKSI RADIASI FOTON GAMMA (SINAR X) DENGAN MATERI.							
Material: Bahan struktur tangki tekan untuk reaktor daya jenis PWR 1300 MW.							
Konstituen (Nomor Atomis: Fraksi berat/bobot)							
26:1.00000							
Koefisien Interaksi Parsial dan Koefisien Pelemahan Total:							
=====							
TENAGA	HAMBURAN		SERAPAN	PRODUKSI	PASANGAN	KOEFS. PELEMAH TOT.	
FOTON-X	FOTO-		FOTO-	DALAM	DALAM	DENGAN	TANPA
ATAU -G	KOHEREN	INKOHEREN	LISTRIK	MEDAN	MEDAN	HAMBURAN	HAMBURAN
(GAMMA)				NUKLIR	ELEKTRON	KOHEREN	KOHEREN
(MeV)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)	(cm2/g)

1.000E-02	1.201E+00	8.541E-02	1.694E+02	0.000E+00	0.000E+00	1.707E+02	1.695E+02
2.500E-02	3.764E-01	1.237E-01	1.320E+01	0.000E+00	0.000E+00	1.370E+01	1.332E+01
3.750E-02	1.994E-01	1.329E-01	4.018E+00	0.000E+00	0.000E+00	4.351E+00	4.151E+00
5.750E-02	9.858E-02	1.357E-01	1.112E+00	0.000E+00	0.000E+00	1.347E+00	1.248E+00
8.500E-02	5.038E-02	1.323E-01	3.371E-01	0.000E+00	0.000E+00	5.198E-01	4.694E-01
1.250E-01	2.504E-02	1.248E-01	1.028E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.526E-01	2.275E-01
2.250E-01	8.245E-03	1.076E-01	1.704E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.329E-01	1.246E-01
3.750E-01	3.057E-03	9.028E-02	3.840E-03	0.000E+00	0.000E+00	9.718E-02	9.412E-02
5.750E-01	1.316E-03	7.609E-02	1.234E-03	0.000E+00	0.000E+00	7.864E-02	7.732E-02
8.500E-01	6.056E-04	6.392E-02	4.984E-04	0.000E+00	0.000E+00	6.503E-02	6.442E-02
1.250E+00	2.808E-04	5.292E-02	2.256E-04	7.031E-05	0.000E+00	5.350E-02	5.322E-02

1.750E+00	1.436E-04	4.426E-02	1.248E-04	8.099E-04	0.000E+00	4.534E-02	4.520E-02
2.250E+00	8.670E-05	3.838E-02	8.338E-05	1.963E-03	2.355E-07	4.051E-02	4.043E-02
2.750E+00	5.809E-05	3.407E-02	6.174E-05	3.182E-03	5.697E-06	3.738E-02	3.732E-02
3.500E+00	3.589E-05	2.936E-02	4.394E-05	4.941E-03	2.680E-05	3.441E-02	3.438E-02
5.000E+00	1.759E-05	2.329E-02	2.747E-05	8.032E-03	9.198E-05	3.146E-02	3.144E-02
7.000E+00	8.973E-06	1.850E-02	1.815E-05	1.139E-02	1.903E-04	3.011E-02	3.010E-02
9.500E+00	4.872E-06	1.488E-02	1.268E-05	1.469E-02	3.056E-04	2.990E-02	2.989E-02

Tabel 9. Keluaran hasil perhitungan oleh program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 4.

TABEL TAMPANG LINTANG INTERAKSI RADIASI FOTON GAMMA (SINAR X) DENGAN MATERI.

Material: Bahan struktur lapisan air reaktor daya u: PLTN jenis PWR 1300 MW te

Konstituens (Nomor Atomis: Fraksi berat/bobot)
1: .11189 8: .88811

Koefisien Interaksi Parsial dan Koefisien Pelemahan Total:

TENAGA FOTON-X ATAU -G (GAMMA) (MeV)	HAMBURAN		SERAPAN FOTO- LISTRIK	PRODUKSI DALAM MEDAN (cm2/g)	PASANGAN DALAM MEDAN (cm2/g)	KOEFS. PELEMAH TOT. DENGAN HAMBURAN KOHEREN (cm2/g)		TANPA HAMBURAN KOHEREN (cm2/g)	
1.000E-02	2.305E-01	1.550E-01	4.944E+00	0.000E+00	0.000E+00	5.330E+00	5.099E+00		
2.500E-02	6.301E-02	1.812E-01	2.640E-01	0.000E+00	0.000E+00	5.082E-01	4.452E-01		
3.750E-02	3.216E-02	1.831E-01	7.020E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.854E-01	2.533E-01		
5.750E-02	1.504E-02	1.779E-01	1.718E-02	0.000E+00	0.000E+00	2.101E-01	1.951E-01		
8.500E-02	7.284E-03	1.679E-01	4.723E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.799E-01	1.726E-01		
1.250E-01	3.482E-03	1.545E-01	1.326E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.593E-01	1.559E-01		
2.250E-01	1.100E-03	1.303E-01	1.987E-04	0.000E+00	0.000E+00	1.316E-01	1.305E-01		
3.750E-01	3.987E-04	1.084E-01	4.208E-05	0.000E+00	0.000E+00	1.089E-01	1.085E-01		
5.750E-01	1.700E-04	9.106E-02	1.309E-05	0.000E+00	0.000E+00	9.124E-02	9.107E-02		
8.500E-01	7.786E-05	7.637E-02	5.310E-06	0.000E+00	0.000E+00	7.646E-02	7.638E-02		
1.250E+00	3.603E-05	6.318E-02	2.329E-06	1.777E-05	0.000E+00	6.323E-02	6.320E-02		
1.750E+00	1.839E-05	5.285E-02	1.306E-06	2.293E-04	0.000E+00	5.310E-02	5.308E-02		
2.250E+00	1.111E-05	4.574E-02	8.903E-07	5.675E-04	2.807E-07	4.632E-02	4.631E-02		
2.750E+00	7.442E-06	4.063E-02	6.687E-07	9.344E-04	6.793E-06	4.158E-02	4.157E-02		
3.500E+00	4.597E-06	3.503E-02	4.838E-07	1.473E-03	3.196E-05	3.654E-02	3.653E-02		
5.000E+00	2.252E-06	2.777E-02	3.090E-07	2.431E-03	1.097E-04	3.031E-02	3.031E-02		
7.000E+00	1.149E-06	2.206E-02	2.075E-07	3.482E-03	2.272E-04	2.577E-02	2.577E-02		
9.500E+00	6.239E-07	1.775E-02	1.467E-07	4.521E-03	3.653E-04	2.264E-02	2.264E-02		

Tabel 10. Keluaran hasil perhitungan oleh program XCOM31 untuk membangkitkan koefisien atenuasi γ bagi material 5.

TABEL TAMPANG LINTANG INTERAKSI RADIASI FOTON GAMMA (SINAR X) DENGAN MATERI.
~~~~~

Material: Bahan struktur perisai beton teras reaktor daya PLTN jenis PWR 1300

Konstituens (Nomor Atomis: Fraksi berat/bobot)  
1: .00326 8: .55983 13: .04855 14: .19418 20: .19418

Koefisien Interaksi Parsial dan Koefisien Pelemahan Total:

| /-----\   | HAMBURAN  |           | SERAPAN   | PRODUKSI PASANGAN | KOEFS. PELEMAH TOT. |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------|---------------------|-----------|-----------|
|           | FOTON-X   | FOTO-     | DALAM     | DALAM             | DENGAN              | TANPA     |           |
| ATAU -G   | KOHEREN   | INKOHEREN | LISTRIK   | MEDAN             | MEDAN               | HAMBURAN  | HAMBURAN  |
| (GAMMA)   |           |           |           | NUKLIR            | ELEKTRON            | KOHEREN   | KOHEREN   |
| (MeV)     | (cm2/g)   | (cm2/g)   | (cm2/g)   | (cm2/g)           | (cm2/g)             | (cm2/g)   | (cm2/g)   |
| -----/    |           |           |           |                   |                     |           |           |
| 1.000E-02 | 4.651E-01 | 1.196E-01 | 2.874E+01 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 2.932E+01 | 2.886E+01 |
| 2.500E-02 | 1.320E-01 | 1.526E-01 | 1.894E+00 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 2.178E+00 | 2.046E+00 |
| 3.750E-02 | 6.893E-02 | 1.576E-01 | 5.441E-01 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 7.707E-01 | 7.017E-01 |
| 5.750E-02 | 3.328E-02 | 1.559E-01 | 1.430E-01 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 3.322E-01 | 2.989E-01 |
| 8.500E-02 | 1.646E-02 | 1.489E-01 | 4.157E-02 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 2.069E-01 | 1.904E-01 |
| 1.250E-01 | 7.993E-03 | 1.380E-01 | 1.224E-02 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 1.582E-01 | 1.502E-01 |
| 2.250E-01 | 2.573E-03 | 1.170E-01 | 1.943E-03 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 1.215E-01 | 1.189E-01 |
| 3.750E-01 | 9.415E-04 | 9.757E-02 | 4.260E-04 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 9.893E-02 | 9.799E-02 |
| 5.750E-01 | 4.028E-04 | 8.200E-02 | 1.348E-04 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 8.253E-02 | 8.213E-02 |
| 8.500E-01 | 1.847E-04 | 6.879E-02 | 5.437E-05 | 0.000E+00         | 0.000E+00           | 6.903E-02 | 6.885E-02 |
| 1.250E+00 | 8.554E-05 | 5.692E-02 | 2.445E-05 | 2.966E-05         | 0.000E+00           | 5.706E-02 | 5.698E-02 |
| 1.750E+00 | 4.366E-05 | 4.760E-02 | 1.360E-05 | 3.713E-04         | 0.000E+00           | 4.803E-02 | 4.799E-02 |
| 2.250E+00 | 2.642E-05 | 4.124E-02 | 9.159E-06 | 9.168E-04         | 2.530E-07           | 4.219E-02 | 4.216E-02 |
| 2.750E+00 | 1.769E-05 | 3.662E-02 | 6.818E-06 | 1.502E-03         | 6.122E-06           | 3.815E-02 | 3.813E-02 |
| 3.500E+00 | 1.092E-05 | 3.156E-02 | 4.881E-06 | 2.357E-03         | 2.880E-05           | 3.396E-02 | 3.395E-02 |
| 5.000E+00 | 5.351E-06 | 2.503E-02 | 3.079E-06 | 3.874E-03         | 9.888E-05           | 2.901E-02 | 2.900E-02 |
| 7.000E+00 | 2.730E-06 | 1.988E-02 | 2.048E-06 | 5.533E-03         | 2.048E-04           | 2.563E-02 | 2.562E-02 |
| 9.500E+00 | 1.482E-06 | 1.600E-02 | 1.438E-06 | 7.171E-03         | 3.291E-04           | 2.350E-02 | 2.350E-02 |
| -----/    |           |           |           |                   |                     |           |           |

Catatan:

Cara pengelompokan energi foton- $\gamma$  pada tabel-tabel tampang lintang interaksi radiasi foton- $\gamma$  (sinar-X) dengan materi tersebut di atas disesuaikan dengan yang digunakan pada spektrum foton- $\gamma$  dari hasil fisi dan aktivasi radionuklida pada luaran **ORIGEN-2**.

**KESIMPULAN DAN SARAN**

Dengan diperolehnya nilai tampang interaksi foton dengan materi untuk hamburan, serapan fotolistrik, dan produksi pasangan ion serta koefisien pelemahan total gayut energi (18 kelompok) dalam berbagai material elemental dan kompon (baik campuran maupun ikatan kimiawi) sebagai bahan struktur perisai reaktor dengan kode yang sesuai (GRACE2, SABIN3) untuk berbagai material perisai maka perhitungan ketebalan efektif perisai reaktor daya dapat dilaksanakan.

---

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada semua kolega yang terkait dengan kegiatan Litbang perisai radiasi, antara lain seperti Sdr. Setiyanto, Sdr. Amir Hamzah, Sdr. Rokhmadi, dan Sdr. Tagor MS, yang telah banyak memberi dukungan moral / material dan memberi suport positif kepada diri saya dalam menyelesaikan makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. S. DUNCAN and A. B. SPEIR, "GRACE-I: An IBM 704-709 Program Designed for Computing Gamma-Ray Attenuation and Heating in Reactor Shields", NAA-SR-3719, Physics and Mathematics (54 pages), Atomic International, A Division of North American Aviation, Inc., P. O. Box 309, Canoga Park, California, U.S.A., Contract: AT(11-1)-GEN-8, (issued: June 30<sup>th</sup>, 1959).
- [2] M. J. Berger and J. H. Hubbell, "XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer," NBSIR 87-3597 (July 1987).
- [3] JOHN R. LAMARSH, "Introduction to Nuclear Engineering", 2<sup>nd</sup> edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, Massachusetts, USA (1982), Chapt.-10, p.472-531 and Appendixes.
- [4] ANL Scientist Working Group, "Reactor Physics Constants", ANL-5800 3<sup>rd</sup> Edition, Argonne National Laboratory, operated by The University of Chicago, Under Contract with the U.S. Atomic Energy Commission, Published by United States Atomic Energy Commission (USAEC), Division of Technical Information, Chapter VII (July 1963).
- [5] R. G. JAEGER et al, "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol I, New York (1975), p.178-238.