

PERHITUNGAN PERISAI RADIASI RSG-GAS MENGGUNAKAN CODE CADRE

Suryawati, Pudjijanto MS.

ABSTRAK

PERHITUNGAN PERISAI RADIASI RSG-GAS MENGGUNAKAN CODE CADRE. Telah dilakukan perhitungan parameter perisai beton RSG-GAS untuk mengkaji disain perisai RSG-GAS dengan menggunakan program CADRE yang ditulis dalam Fortran oleh Dr. James Wood, University of London, UK yang telah dimodifikasi. Program ini pada dasarnya merupakan suatu program untuk menghitung ketebalan perisai ganda atau berlapis, dari komposisi dan batasan laju dosis permukaan perisai sesuai dengan disain yang dikehendaki. Program ini juga dilengkapi dengan pilihan untuk menghitung agihan laju dosis terinci sepanjang daerah lapisan perisai. Dengan memberikan masukan daya reaktor RSG-GAS, ukuran dan parameter teras, komposisi dan parameter lapisan sistim perisai (Be, Al, air, beton), laju paparan permukaan perisai, dapat dihitung ketebalan optimum perisai beton RSG-GAS dan agihan laju dosis terinci pada permukaan lapisan Be, Al, air dan beton. Hasil perhitungan ketebalan optimum perisai beton berat menggunakan program CADRE adalah 123,75 cm, sedangkan tebal disain perisai beton berat RSG-GAS yang tertera dalam SAR RSG-GAS adalah 139 cm, untuk mendapatkan laju dosis permukaan luar perisai sebesar 0,75 mRem/jam. Ini berarti terdapat perbedaan sebesar 10 %. Menurut pustaka, hasil perhitungan dari program CADRE sangat sesuai dengan hasil eksperimen. Laju dosis untuk setiap lapisan Be, liner Al, air, tangki reaktor Al, beton berat, beton biasa masing-masing adalah $6,71E+11$; $5,77E+11$; $8,20E+07$; $7,57E+07$; $4,70E+01$, dan 0,75 (mRem/jam). Dari hasil pengkajian ini dapat disimpulkan bahwa ketebalan dan fungsi perisai radiasi RSG-GAS telah memenuhi batas keselamatan disain yang diperkenankan.

ABSTRACT

THE CALCULATION OF THE RADIATION SHIELDING PARAMETER OF MULTIPURPOSE REACTOR 30 MW USING CADRE CODE. The calculation of the concrete shielding parameter of RSG-GAS has been done to evaluated the RSG-GAS shielding design. The calculation is performed using CADRE code in Fortran language of Dr James Wood, University of London, UK, that it has been modified. Basically, the program estimates the thickness of multi-layered shield, for given composition and some desired dose rate limit at the surface of the shield. The program is provided with option of the detailed dose rate distribution across the shield region calculation. Entering data as power level, dimension and core parameter, composition and shielding parameter (berillium, alluminium, water, concrete), and desired dose rate at the shielding surface, the concrete shielding thickness of RSG-GAS and dose rate distribution across of berillium, alluminium, water and concrete can be calculated. The calculation result for heavy concrete shielding thickness is 123.75 cm. According to Safety Analysis Report of RSG-GAS, the heavy concrete shielding thickness of RSG-GAS for 0.75 mrem/hr surface dose rate is 139 cm. That is to say, the discrepancy between the output of CADRE and SAR is 10 %. According to the reference, the result of CADRE is in good agreement with the experiment result. The dose rate at each surface layer are $6,71E+11$; $5,77E+11$; $8,20E+07$; $7,57E+07$; $4,70E+01$, 0,75 mRem/hour for Be, liner Al, water, reactor tank Al, heavy concrete and light concrete shielding respectively. The conclusion of this research are thickness and radiation shielding function of RSG-GAS has been fulfilled design safety limit that permissible.

PENDAHULUAN

Reaktor Serba Guna "G.A. Siwabessy" (untuk selanjutnya disingkat **RSG-GAS**) adalah reaktor riset yang mempunyai daya termal 30 MW dengan bahan bakar U_2O_8 -Al perkayaan 19,75 %, berefektor berilium, bermoderator dan berpendingin air serta berperisai beton berat dan beton biasa. Disain perisai radiasi RSG-GAS berlapis ganda ini mempunyai komposisi dan ketebalan tertentu. Sistem perisai berlapis dari RSG-GAS berfungsi untuk memperlemah dan mengungkung radiasi nuklir yang kemungkinan lolos dari teras reaktor pada saat pengoperasian reaktor, untuk menjamin keamanan dan keselamatan pekerja radiasi dan masyarakat dari bahaya radiasi yang berasal dari pengoperasian RSG-GAS.

Mengingat pentingnya fungsi perisai radiasi suatu reaktor untuk tujuan keselamatan personal dan masyarakat maka pertimbangan yang berkaitan dengan disain suatu perisai diupayakan agar seoptimal mungkin baik ditinjau dari segi teknis, ekonomis, keamanan serta keselamatan radiasi. Ini berarti bahwa paparan radiasi dari permukaan perisai harus dalam batas-batas keselamatan yang diperkenankan sedemikian sehingga tidak akan membahayakan bagi pekerja radiasi. Besarnya paparan radiasi di permukaan luar perisai beton yang sesuai dengan batasan keselamatan radiasi akan sangat tergantung dari pemilihan jenis dan komposisi serta ketebalan perisai yang sesuai dengan daya pengoperasian reaktor.

Untuk tujuan verifikasi disain perisai RSG-GAS yang tertera dalam SAR- RSG GAS, serta untuk memanfaatkan program CADRE yang ditulis dalam Fortran IV oleh James Wood, University of London, UK, yang kemudian dilakukan modifikasi, dilaksanakan perhitungan ketebalan perisai beton berat RSG-GAS dan agihan laju dosis radiasi pada setiap titik dalam lapisan bahan reflektor, moderator dan perisai (Be, air, Al, beton). Pada tahap pertama dilakukan perhitungan ketebalan perisai beton berat untuk batasan laju dosis permukaan perisai sebesar 0,75 mrem/jam. Perhitungan tahap kedua setelah ketebalan optimum perisai diperoleh, dihitung agihan laju dosis radiasi di setiap lapisan bahan Be, air, Al dan beton berat dan ringan.

TEORI

Program komputer CADRE pada dasarnya digunakan untuk menaksir ketebalan salah satu perisai berlapis ganda yang diperlukan untuk memperlemah radiasi nuklir yang berasal dari pengoperasian reaktor di suatu tingkat daya tertentu, dari komposisi yang diberikan dan pada beberapa laju dosis yang dikehendaki di permukaan perisai.

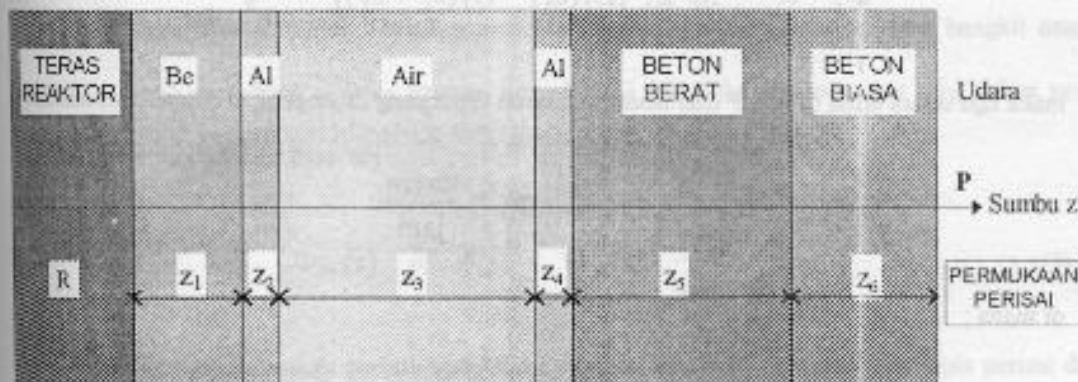
Program CADRE ini telah teruji untuk menghitung perisai radiasi dari Calderhall Reactor yang berdaya 180 MW⁽¹⁾.

Program ini juga mempunyai kemampuan untuk menghitung :

1. Salah satu dari lapisan-lapisan perisai yang dinominasi oleh pengguna, yang secara sistematis dapat diatur dalam tebal oleh program sampai menghasilkan laju dosis pada permukaan perisai sesuai dengan batas yang ditentukan.

2. Agihan laju dosis terinci di setiap titik *mesh* sepanjang daerah perisai.

Dasar perhitungan perisai radiasi RSG-GAS yang diterapkan dalam program CADRE, menggunakan teknik pemodelan sebagaimana terlukis pada Gambar 1 sebagai berikut di bawah ini :



Gambar 1. Skema lapisan perisai radiasi RSG-GAS dalam arah radial (satuan bebas).

di mana :

R = diameter ekuivalen teras, |cm|.

z = ketebalan bahan; indeks 1 untuk berilium (Be), 2 dan 4 untuk alumium (Al), 3 untuk air, 5 untuk beton berat dan 6 untuk beton ringan, |cm|.

Neutron cepat (n^1_0) diandaikan, dihasilkan secara seragam menerobos teras yang diandaikan berlengkung-tabung, dengan kuat sumber per satuan volume sama besar dengan yang ada dalam teras. Neutron cepat yang lolos keluar dari teras masuk ke dalam perisai mengikuti "pelemahan Kernel", yang secara matematis berbentuk : $\{ \exp (-\Sigma_R z) / (R^2) \}$.

Jika kuat sumber spesifik neutron cepat dalam teras reaktor adalah :

$$S_V^n = 2,5 \times 3,1209098 \times 10^{10} \times 10^6 \frac{P}{V} \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^3 \cdot \text{det}} \quad (1)$$

dan fluks neutron cepat dipermukaan luar perisai :

$$\Phi_f = \frac{1}{2} S_V^n \Sigma_r \{ E_2(b_1) - E_2(b_1 + b_2) \} \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{det}} \quad (2)$$

maka laju setara dosis di titik P dari neutron-neutron cepat yang dibangkitkan dalam teras adalah :

$$\dot{H}_f = f_e \cdot \Phi_f \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (3)$$

di mana :

Σ_R = tampang lintang removal makroskopis neutron cepat hasil belah, | cm^{-1} |;

z = ketebalan lapisan bahan perisai, |cm|;

R = diameter teras, |cm|;

- S_V^2 = kuat sumber neutron cepat, $[n/cm^3 \cdot \text{detik}]$;
- P = daya reaktor pada operasi maksimum, $[MW]$;
- V = volume teras aktif reaktor, $[cm^3]$;
- ϕ_f = fluks neutron cepat di titik P pada permukaan luar perisai, $[n/cm^2 \cdot \text{detik}]$;
- $E_2(x)$ = fungsi integral eksponensial derajat-2 dengan argumen x , $[\text{tanpa dimensi}]$;
- b_1 = tebal perlambatan neutron cepat dari perisai, $[\text{mfp}] = \text{mean free path}$,
- $b_2 = 2 \times \Sigma_R \times R$ = tebal removal neutron dari teras, $[\text{mfp}]$;
- R = laju setara dosis di titik P dari neutron-neutron cepat yang dibangkitkan dalam teras, $[\text{mrem/jam}]$;
- L = faktor konversi laju dosis yang sesuai untuk neutron cepat, $\left[\frac{\text{mrem / jam}}{n / (\text{cm}^2 \cdot \text{det.})} \right]$.

Neutron cepat yang dihasilkan dari proses pembelahan inti akan mengalami tumbukan dan hamburan removal di dalam daerah teras sedemikian sehingga akhirnya mencapai tenaga termal yang dipertimbangkan dalam CADRE. Teknik pemodelan ini menggunakan konsep faktor bangkit neutron termal (B_{th}), yang mengkaitkan fluks neutron termal (Φ_{th}) dan fluks neutron cepat (Φ_f) dalam perisai dalam bentuk linier sebagai berikut :

$$\Phi_{th}(z) = B_{th} \cdot \Phi_f(z) \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{det.}} \tag{4}$$

Untuk menyederhanakan perhitungan, fluks neutron termal (Φ_{th}) dalam tiap lapis perisai dapat didkati secara cukup akurat dengan sebuah suku eksponensial tunggal yang berbentuk :

$$\Phi_{th}(z) = S \cdot e^{-\mu z} \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{det.}} \tag{5}$$

di mana:

S = kuat sumber neutron termal, $[n/(cm^3 \cdot detik)]$;

μ = koefisien pelemahan neutron, $[cm^{-1}]$;

$\Phi_{th}(z)$ = fluks neutron termal pada jarak z dari pusat teras, $[n/(cm^2 \cdot detik)]$.

$\Phi_{(z)}$ = fluks neutron cepat pada jarak z dari pusat teras, $[n/(cm^2 \cdot detik)]$.

B_{th} = faktor bangkit neutron termal.

Foton- γ primer serentak serta dari peluruhan isotop-isotop hasil belah berumur pendek diandaikan terpancar secara seragam menerobos teras papan datar dengan kuat sumber per satuan volume yang setara dengan yang berasal dari teras sesungguhnya untuk tingkat daya yang dipertimbangkan.

Kuat sumber gamma primer adalah :

$$S_V^\gamma = \eta_c \times 3,1209098 \times 10^{10} \times 10^6 \frac{P}{V} \frac{\text{foton} - \gamma}{\text{cm}^3 \cdot \text{det.}} \quad (6)$$

dan sumbangan laju dosis gamma primer di titik P pada permukaan perisai adalah :

$$\dot{H}_e = f_c \cdot \Phi_\gamma \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (7)$$

di mana:

S_V^γ = kuat sumber gamma primer, $[\gamma/(cm^3 \cdot detik)]$.

η_c = jumlah atau banyaknya foton gamma yang dipancarkan pembelahan, $[\gamma/\text{fisi}]$.

f_c = faktor konversi laju dosis foton gamma, $\left| \frac{\text{mrem} / \text{jam}}{n / (\text{cm}^2 \cdot \text{det.})} \right|$;

Φ_γ = fluks foton gamma dititik P, $[\gamma/(cm^2 \cdot detik)]$.

Foton gamma sekunder yang dipertimbangkan dalam CADRE hanya gamma sekunder yang dibangkitkan oleh tangkapan radiatif neutron termal dalam bahan perisai.

Agihan sumber gamma sekunder mengikuti agihan fluks neutron termal dalam perisai. Kuat sumber pemancar gamma sekunder adalah :

$$S(z) = \eta_c(E) \cdot \Sigma_\gamma \cdot \Phi_{th}(z) \frac{\text{foton} - \gamma}{\text{cm}^3 \cdot \text{det.}} \quad (8)$$

Fluks foton gamma sekunder di titik P pada lapisan j yang mengandung suatu sumber yang berubah secara eksponensial terhadap ruang, diberikan oleh persamaan :

$$\Phi_\gamma^s = \frac{1}{2} \eta_c \Sigma_\gamma S \alpha \frac{e^{-\mu z} - e^{-fz}}{f - \mu} e^{-b_1} \frac{\text{foton}}{\text{cm}^2 \cdot \text{det.}} \quad (9)$$

sehingga laju setara dosis dari foton gamma sekunder pada titik P, adalah :

$$\dot{H}_s = f_s \cdot \Phi_\gamma^s \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (10)$$

di mana :

$\Phi_{th}(z)$ = fluks neutron termal bergayut posisi z dalam perisai, |neutron/(cm²detik)|;

$\eta_c(E)$ = banyaknya foton gamma yang dipancarkan dengan tenaga E per tangkapan neutron, | γ /(tangkapan n)|;

Σ_γ = tampang lintang makroskopis tangkapan radiatif neutron termal untuk bahan lapisan perisai, |cm⁻¹|;

α = konstanta faktor bangkit, |cm⁻¹|;

b_1 = tebal pelemahan dari bahan, |mfp| = *mean free path*;

μ = koefisien pelemahan linier dari bahan perisai, yang sudah meliputi serapan foto listrik, efek

Compton dan produksi pasangan, $|\text{cm}^{-1}|$;

$$f_s = \text{faktor konversi laju dosis, } \left| \frac{\text{mrem / jam}}{\text{n / (cm}^2 \cdot \text{det.)}} \right|$$

Mekanisme interaksi yang terjadi antara foton gamma dengan bahan perisai tergantung pada energi foton gamma yang mengenai perisai. Untuk foton gamma yang berenergi $< 0,1$ MeV, interaksi yang terjadi didominasi oleh efek fotolistrik, untuk foton gamma yang berenergi $\leq 0,511$ MeV, interaksi didominasi oleh efek Compton sedangkan untuk foton gamma yang berenergi $> 1,02$ MeV akan mengalami proses produksi pasangan atau *pair production*. Keseluruhan mekanisme ini sudah dipertimbangkan dalam program CADRE ini, yang dinyatakan dalam koefisien pelemahan linier bahan perisai. Dengan demikian maka laju setara dosis keseluruhan di titik P pada permukaan perisai adalah:

$$\dot{H}_{(total\ di\ P)} = \dot{H}_{(neutron\ cepat)} + \dot{H}_{(foton\ \gamma\ primer)} + \dot{H}_{(foton\ \gamma\ sekunder)} \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (11)$$

TATA KERJA

Ada beberapa tahap pelaksanaan pada terapan program CADRE, yaitu :

1. Tahapan pertama adalah melakukan perhitungan perisai radiasi RSG-GAS yang dimulai dengan penelusuran studi literatur yang berkaitan dengan spesifikasi teknis, parameter fisis teras dan sifat perisai RSG-GAS serta memahami dasar fisis perhitungan perisai dalam program CADRE.
2. Tahapan berikutnya adalah memodifikasi beberapa *syntax* instruksi yang pada awalnya program CADRE ditulis untuk diterapkan pada komputer *mainframe* CDC-7600, disesuaikan dengan *syntax* yang diterapkan pada komputer berbasis PC-XT/AT.
3. Melakukan penambahan dalam program yang ditulis oleh James Wood karena ada beberapa *statement* dalam *list* program asli yang tidak tertulis (terputus) serta pemodifikasian program yang menggabungkan program BMIX ke dalam program CADRE dan beberapa modifikasi lainnya.

4. Mempersiapkan data asupan (*input data*) yang diperlukan oleh CADRE dalam perhitungan perisai. Data asupan yang diperlukan oleh CADRE yaitu data teknis (gambaran geometri) berupa jenis, komposisi dan dimensi dari teras dan sistem perisai RSG-GAS, tertera pada Tabel 1 dan parameter fisis teras dan perisai tercantum pada Tabel 2.
5. Tahapan terakhir adalah mengkomparasi dan memverifikasi hasil perhitungan dengan rancang bangun sistem perisai RSG-GAS.

Data inputan (masukan) untuk Program CADRE :

- Daya reaktor RSG- GAS = 30 MW
- Paparan permukaan perisai 0,75 mRem/jam.

Dimensi dan komposisi teras dan perisai RSG-GAS tertera dalam Tabel 1 dan parameter fisis perisai radiasi diberikan pada Tabel 2 sebagai berikut :

Tabel 1. Dimensi dan komposisi teras dan perisai RSG-GAS.

Material/bahan	Simbol	Ketebalan (cm)
Teras	R	32,4
Reflektor Berilium	z_1	16,2
Aluminium	z_2	1,3
Air	z_3	200,1
Aluminium	z_4	1
Beton berat	z_5	? (diproduksi)
Beton ringan	z_6	60

Tabel 2. Parameter Fisis perisai radiasi RSG-GAS

Daerah	Material	τ (cm ²)	L (cm)	Σ_R (cm ⁻¹)	Σ_a (cm ⁻¹)
1	Berilium	102	21,5	0,128	0,00117
2 dan 4	Aluminium	500	18,69	0,079	0,0141
3	Air	27	2,73	0,103	0,0220
5	Beton ringan	86,9	4,96	0,095	0,0197
6	Beton berat	101	7,69	0,088	0,0059

Selain itu juga diberikan data untuk :

- Energi foton- γ sekunder setiap daerah lapisan perisai;
- Intensitas foton- γ yang dipancarkan per tangkapan neutron termal;
- Jumlah *mesh point* untuk setiap lapisan perisai;
- Koefisien perlemahan pada setiap lapisan untuk delapan (8) kelompok energi.

Parameter Fisis teras RSG-GAS (Daerah 1)

- Jari-jari, tinggi dan volume teras;
- Tampang lintang removal rata-rata teras;
- Data spektrum gamma primer untuk 8 kelompok energi;
- Parameter h untuk perhitungan faktor bangkit (*build up factor*)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketebalan lapisan perisai beton berat :

Hasil perhitungan ketebalan optimum lapisan perisai beton RSG-GAS dengan menggunakan program komputer CADRE dalam penelitian ini, dengan penentuan batasan laju dosis permukaan

perisai beton sebesar 0,75 mRem/jam dan seluruh parameter inputan yang telah diuraikan pada bagian tata kerja, adalah sebesar 123,75 cm. Sedangkan tebal beton berat RSG-GAS yang tercantum dalam SAR RSG-GAS adalah 139 cm. Ini berarti terdapat perbedaan nilai sekitar 10 %.

Hasil perhitungan ketebalan perisai beton berat RSG-GAS dalam SAR yang dilaksanakan oleh INTERATOM tidak diketahui sejauh mana metode dan asupan data yang digunakan dalam perhitungan tersebut, kecuali hanya ketebalan sistem lapisan perisai, batasan laju dosis permukaan perisai sebesar 0,75 mRem/jam. Hanya sebagai bahan pertimbangan, berdasarkan pengalaman pemantauan radiasi oleh petugas *shift* Bidang Keselamatan Kerja selama pengoperasian RSG-GAS, nilai pengukuran laju paparan radiasi di atas permukaan perisai beton RSG-GAS pada operasi daya 30 MW mempunyai harga yang sangat rendah atau bahkan tidak terdeteksi. Di samping itu, dari hasil perhitungan contoh persoalan menggunakan program CADRE ini¹¹⁾, diperoleh harga yang sesuai dengan hasil eksperimennya.

Dari pembahasan di atas dapat dikatakan bahwa desain perisai RSG-GAS telah cukup memenuhi faktor keselamatan dan keamanan. Perhitungan ketebalan perisai beton RSG-GAS menggunakan program CADRE dalam penelitian ini mempunyai ketelitian yang cukup tinggi.

2. Agihan laju dosis (mrem/jam) untuk setiap lapisan perisai

Agihan penurunan laju dosis dalam lapisan Be, liner Al, air, tangki reaktor Al, beton berat, beton biasa tertera pada Tabel 3 dan Gambar 2 dibawah ini.



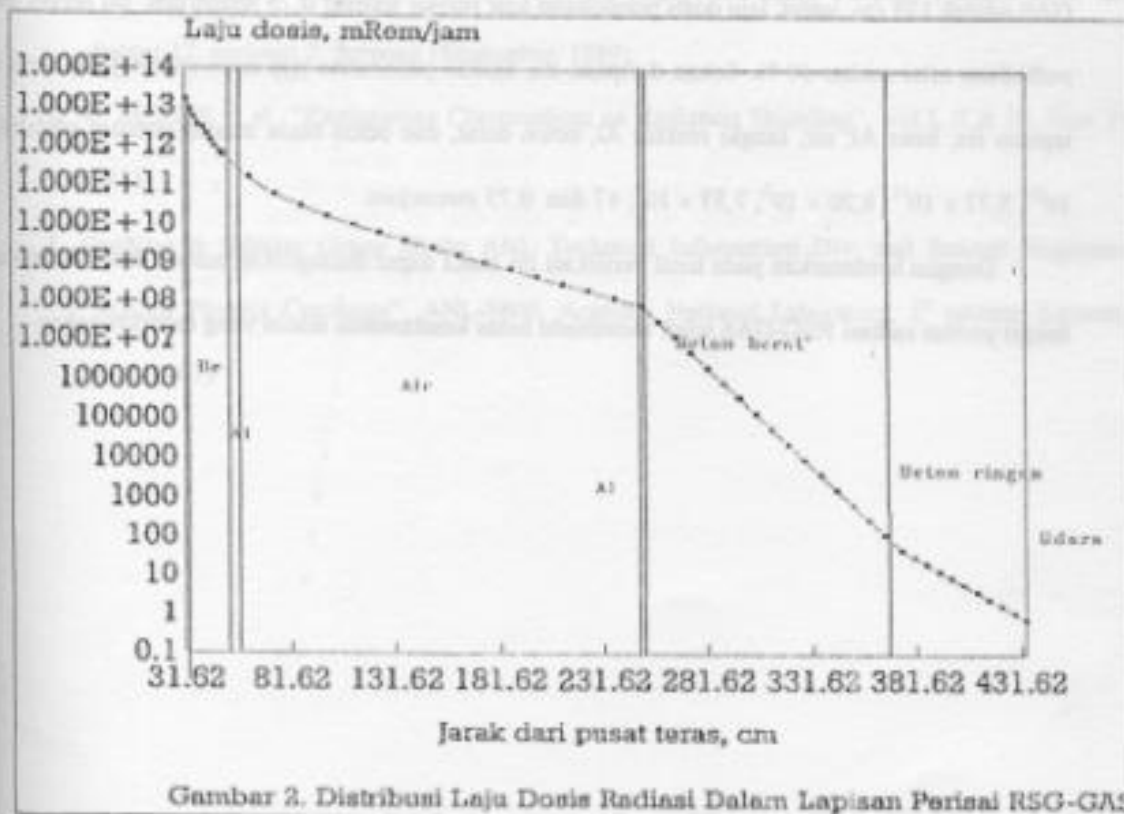
Tabel 3. Agihan laju dosis pada setiap titik *mexh* lapisan perisai radiasi.

Jarak dari pusat teras (cm)	Jarak dari antar muka lapisan (cm)	Laju dosis (mRem/jam)	Jarak dari pusat teras (cm)	Jarak dari antar muka lapisan (cm)	Laju dosis (mRem/jam)
32.4000	0.0000	1.5923E+13	257.9539	7.7339	3.0825E+07
33.6450	2.0250	8.0502E+12	265.6877	15.4677	1.2564E+07
35.6700	4.0500	4.9858E+12	273.4216	23.2016	5.1273E+06
37.6950	6.0750	3.2719E+12	281.1555	30.9354	2.0945E+06
39.7200	8.1000	2.7303E+12	288.8893	38.6693	8.5642E+05
41.7450	10.1250	1.8650E+12	296.6232	46.4032	3.5047E+05
43.7700	12.1500	1.3013E+12	304.3571	54.1370	1.4353E+05
45.7950	14.1750	9.2591E+11	312.0909	61.8709	5.8823E+04
47.8200	16.2000	6.7120E+11	319.8248	69.6048	2.4123E+04
47.8200	0.0000*	6.7120E+11	327.5587	77.3386	9.8985E+03
48.4700	0.6500	6.2279E+11	335.2925	85.0725	4.0640E+03
49.1200	1.3000	5.7781E+11	343.0264	92.8064	1.6694E+03
49.1200	0.0000**	5.7781E+11	350.7602	100.5402	6.8608E+02
61.6263	12.5063	1.5275E+11	358.4941	108.2741	2.8210E+02
74.1325	25.0125	5.8849E+10	366.2280	116.0079	1.1604E+02
86.6388	37.5188	2.9148E+10	373.9618	123.7418	4.7752E+01
99.1450	50.0250	1.6456E+10	373.9618	0.0000***	4.7752E+01
111.6513	62.5313	9.8842E+09	379.9618	6.0000	3.1481E+01
124.1575	75.0375	6.1229E+09	385.9618	12.0000	2.0760E+01
136.6638	87.5438	3.8596E+09	391.9618	18.0000	1.3694E+01
149.1700	100.0500	2.4608E+09	397.9618	24.0000	9.0360E+00
161.6763	112.5563	1.5820E+09	403.9618	30.0000	5.9639E+00
174.1825	125.0625	1.0237E+09	409.9618	36.0000	3.9374E+00
186.6888	137.5688	6.6596E+08	415.9618	42.0000	2.6002E+00
199.1950	150.0750	4.3516E+08	421.9618	48.0000	1.7175E+00
211.7013	162.5813	2.8544E+08	427.9618	54.0000	1.1348E+00
224.2075	175.0875	1.8784E+08	433.9618	60.0000****	7.5000E-01
236.7138	187.5938	1.2397E+08		*	
249.2200	200.1000	8.2024E+07			
249.2200	0.0000***	8.2024E+07			
249.7200	0.5000	7.8813E+07			
250.2200	1.0000	7.5728E+07			
250.2200	0.0000****	7.5728E+07			

Keterangan :

- * = permukaan lapisan reflektor Berilium (Be)
- ** = permukaan Aluminium (Al) liner
- *** = permukaan moderator/pendingin air
- **** = permukaan tangki Al
- ***** = permukaan lapisan perisai beton berat
- ***** = permukaan luar perisai beton

Dari data Tabel 4 di atas, dapat diungkapkan agihan penurunan laju dosis pada setiap titik *mesh* dalam sistem perisai RSG-GAS sebagaimana tertera pada Gambar 2 berikut ini.



Dari Gambar 2. di atas, tampak penurunan laju dosis berbeda dalam setiap lapisan. Perbedaan kemiringan dalam setiap lapisan reflektor Be, air, liner Al, beton berat dan beton ringan ini disebabkan oleh beberapa parameter dari setiap lapisan tersebut terlihat juga bahwa penurunan laju dosis radiasi yang tajam terjadi dalam material berilium dan beton berat, kemudian beton ringan. Hal ini didukung oleh karakter dan parameter dari berilium dan beton yang bersifat memperlemah radiasi juga membuktikan fungsinya sebagai bahan yang efektif digunakan sebagai perisai reaktor nuklir.

KESIMPULAN

Dari hasil verifikasi, ketebalan optimum perisai beton berat menggunakan program CADRE adalah 123,75 cm, sedangkan tebal disain perisai beton berat RSG-GAS yang tertera dalam SAR RSG-GAS adalah 139 cm, untuk laju dosis permukaan luar perisai sebesar 0,75 mrem/jam. Ini berarti terdapat perbedaan nilai sekitar 10 %. Selain daripada itu, agihan penurunan laju dosis (mrem/jam) untuk setiap lapisan Be, liner Al, air, tangki reaktor Al, beton berat, dan beton biasa masing-masing adalah $6,71 \times 10^{11}$; $5,77 \times 10^{11}$; $8,20 \times 10^7$; $7,57 \times 10^7$; 47 dan 0,75 mrem/jam.

Dengan berdasarkan pada hasil verifikasi ini maka dapat disimpulkan bahwa disain ketebalan dan fungsi perisai radiasi RSG-GAS telah memenuhi batas keselamatan disain yang diperkenankan.

MODIFIKASI KECEPATAN BATANG KENDALI

Serpong I, Hidayat S, M. Rizka, Tri Mubandani

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Saudara-saudara Usman Sujadi, Yus R. Akhmad dan Setiyanto yang telah membantu dalam memeriksa makalah ini sampai terselesaikan dengan baik dan benar.

DAFTAR PUSTAKA

JAMES WOOD, "Computation Methods in Reactor Shielding", Pergamon Press Ltd., New York, USA (1982).

Team Penyunting SAR-RSG, "Safety Analysis Report for Multi Purpose Reactor G.A. Siwabessy", chapter 12, revision 7, Serpong (September, 1989).

G. JAEGER et al., "Engineering Compendium on Radiation Shielding", Vol I, II & III, New York, USA (1975).

Drafting & Editing Group of the ANL Technical Information Div. and Reactor Engineering Div., "Reactor Physics Constants", ANL-5800, Argonne National Laboratory, 1st edition, Lemont, Illinois, USA (1963).

