

ANALISIS TEBAL PERISAI BIOLOGI REAKTOR DAYA APR-1400 MENGGUNAKAN KODE CADREMI

Pudjianto MS

Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Kawasan PUSPIPTEK Gd. 80, Serpong, Tangerang Selatan, 15310, e-mail: pudji_ms@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS TEBAL PERISAI BIOLOGI REAKTOR DAYA APR-1400 MENGGUNAKAN KODE CADREMI. Reaktor daya berteknologi maju untuk Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan daya listrik terbangkit 1400 MW jenis APR-1400 merupakan salah satu opsi yang cukup bersaing, sepadan dan sejajar untuk diperbandingkan dan dipertimbangkan di samping berbagai opsi jenis lain yang kelak diputuskan akan dibangun di Indonesia. Masalahnya, hingga kini belum diperoleh data yang cukup komprehensif mengenai tebal desain beton penahan radiasi dari tangki tekan pengungku teras reaktor ini terhadap jaringan lunak yang lazim disebut perisai biologi. Untuk alasan itu, perlu dan telah dilakukan perhitungan tebal beton perisai radiasi reaktor ini dengan tujuan untuk mengkaji tebal disain beton perisai biologinya dengan menggunakan kode CADREMI. Kode 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. Dengan memberikan data daya reaktor, parameter teras, komposisi dan parameter lapisan sistem perisai, laju paparan permukaan perisai, tebal beton perisai radiasi dapat dihitung. Hasil perhitungan ketebalan beton berat dengan rapat massa $3,5 \text{ g/cm}^3$ untuk tingkat daya $3983 \text{ MW}_{\text{th}}$ dengan laju dosis permukaan luar perisai $2,5 \text{ mrem/jam}$ adalah $205,40 \text{ cm}$, sedangkan untuk laju dosis di posisi yang sama sebesar $0,25 \text{ mrem/jam}$ adalah $226,54 \text{ cm}$. Agar laju dosis permukaan luar perisai lebih kecil daripada $0,1 \text{ mrem/jam}$, tebal beton ini minimum 235 cm . Dengan ketebalan ini, laju dosis di setiap bidang antarmuka lapisan perisai, yaitu: permukaan teras, [teras | selimut teras], [selimut teras | air-1], [air-1 | tong teras], [tong teras | air-2], [air-2 | tangki tekan], dan [tangki tekan | beton sisi dalam] berturut-turut adalah: $9,11\text{E}+12$; $6,26\text{E}+12$; $3,43\text{E}+12$; $2,57\text{E}+12$; $1,27\text{E}+12$, $1,25\text{E}+12$ dan $1,57\text{E}+10 \text{ mrem/jam}$. Dari hasil evaluasi ini dapat disimpulkan bahwa tebal dan fungsi perisai radiasi APR-1400 telah memenuhi nilai batas keselamatan yang ditetapkan oleh BAPETEN, yaitu $2,5 \text{ mrem/jam}$ bagi pekerja radiasi dan $0,25 \text{ mrem/jam}$ bagi orang awam.

Kata Kunci: PLTN, APR-1400, neutron, foton gamma, perisai radiasi, laju dosis.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE BIO-SHIELDING THICKNESS OF POWER REACTOR APR-1400 USING CADREMI CODE. Advanced Power Reactor for Nuclear Power Plant (NPP) with 1400 MW electricity build up power of APR-1400 type represent one option which competitive enough, equivalence and parallel to be compared and considered beside various other type which later are decided will be constructed in Indonesia. The problem is up to now not yet been obtained data which comprehensive enough about the designed thickly of concrete for radiation shielding of the pressure vessel of this core reactor to tissue which is generally to be referred as a biological shielding. For this reason, it is need and have been done the calculation of the radiation shield concrete thickness of this reactor to study designed thick of biological shield concrete by using CADREMI code. This code was basically a computer program to calculates the thickness of multi-layered shielding, for a given composition and some desired dose rate limit at the outset surface of the shielding. By inserting the power of reactor, core parameters, composition and parameters of the layered shielding system and the desired dose rate limit at the outset surface of the reactor shielding, the shielding thickness can be calculated. The calculation results of the thickness of heavy concrete shielding by 3.50 g/cm^3 density for $3983 \text{ MW}_{\text{th}}$ power level are 205.40 cm for 2.5 mrem/hr dose rate at the outset surface of concrete and 226.54 cm for 0.25 mrem/hr dose rate at the same location, respectively. For the dose rate at the outside surface is less than 0.1 mrem/hr , so the minimum value of the concrete shielding thickness of this power reactor is 235 cm . Using this thickness of concrete the dose rates at the surface of core and each of the interface points between [core | baffle], [baffle | water-1], [water-1 | barrel], [barrel | water-2], [water-2 | vessel] and then [vessel | inside concrete] are $9.11\text{E}+12$; $6.26\text{E}+12$; $3.43\text{E}+12$; $2.57\text{E}+12$; $1.27\text{E}+12$, $1.25\text{E}+12$ and $1.57\text{E}+10 \text{ mrem/hr}$ respectively. The conclusion of this evaluation are the thickness and the function of the radiation shielding of APR-1400 has been fulfilled design safety limit that to be permitted by BAPETEN, these value are 2.5 mrem/hr for radiation workers and 0.25 mrem/hr for peoples.

Keywords: NPP, APR-1400, neutron, photon-gamma, radiation shielding, dose rate.

PENDAHULUAN

Advanced Power Reactor untuk PLTN dengan daya listrik terbangkit 1400 MW_e (untuk selanjutnya disingkat APR-1400) adalah sebuah reaktor daya berteknologi maju buatan Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. (KHNP) yang dirancang-bangun mempunyai daya termal nominal 3983 MW_t berbahan bakar UO₂ dengan perkayaan nominal 3,78% U-235, berpenyerap dapat bakar integral Gd₂O₃ dengan konsentrasi nominal 7% dalam bentuk batangan sepanjang 38,1 cm sebanyak 16 batang per elemen bakar nuklir, bermoderator dan pendingin air biasa (H₂O) serta berperisai beton, dengan panjang daur operasi nominal 47400 MW·hari per ton U. Rancang-bangun perisai radiasi APR-1400 berlapis ganda ini mempunyai komposisi bahan dan ketebalan tertentu. Sistem perisai berlapis dari APR-1400 ini berfungsi untuk memperlemah dan mengungkung radiasi nuklir yang lolos dari teras reaktor, agar tidak keluar dari sistem reaktor.

Mengingat pentingnya fungsi perisai radiasi suatu reaktor untuk tujuan keselamatan personil pekerja, masyarakat dan lingkungan, maka pertimbangan yang berkaitan dengan disain suatu perisai diupayakan agar seoptimal mungkin, baik dari segi teknis, ekonomis, keamanan (*security*) serta keselamatan (*safety*) radiasi nuklir. Ini berarti bahwa paparan radiasi dari permukaan perisai harus dalam batas-batas keselamatan yang diperkenankan sedemikian rupa sehingga tidak membahayakan bagi pekerja radiasi, masyarakat dan lingkungan. Besarnya paparan radiasi / laju dosis di permukaan luar perisai beton yang sesuai dengan batas keselamatan radiasi akan tergantung dari pemilihan jenis dan komposisi bahan serta ketebalan perisai beton yang sesuai dengan daya pengoperasian reaktor.

Perhitungan tebal dan komposisi bahan perisai radiasi reaktor ini dilaksanakan dengan maksud di samping sebagai sarana pendidikan dan pelatihan bagi sumber daya manusia (SDM) baik di BATAN khususnya maupun di Perguruan Tinggi umumnya dalam rangka menghadapi era nuklir di abad XXI, adalah terutama untuk peninjauan awal tebal beton perisai radiasi reaktor ini dengan tujuan untuk mengkaji lebih lanjut kelayakan tebal disain beton perisai biologinya. Untuk itu perlu dilakukan evaluasi terhadap hasil perhitungan tebal dan komposisi bahan perisai radiasi reaktor APR-1400 KHNP dengan menggunakan program CADREM1 (CADRE terubah versi 1.0 untuk perisai reaktor umum, versi aslinya khusus untuk perisai reaktor Calder Hall di Inggris Raya) seperti yang pernah penulis lakukan dalam mengevaluasi ketebalan perisai radiasi AP-600 buatan Westinghouse kira-kira lebih satu dasa warsa yang lalu.^[1] Pada waktu itu, rancang-bangun AP-600 telah dilakukan oleh

Team of Designer AP-600 Westinghouse Electric Corp. menggunakan kode (program) komputer CYLSEC dan ALBENDO.^[2] Evaluasi desain perisai AP-600 pada waktu itu dilakukan dengan memanfaatkan program CADRE yang ditulis dalam FORTRAN IV oleh James Wood (guru besar di University of London, Inggris)^[3] yang telah penulis modifikasi menjadi CADREM1^[9], pemodifikasian yang dimaksud antara lain dilakukan terhadap: pertama, cara memperoleh spektrum foton- γ primer (*prompt* dan *delay*) yang menjadi bagian tak terpisahkan dari program CADREM1 (subroutine CHIFAST) dan ke-dua, cara menyisipkan data 6 (enam) jenis bahan perisai utama (air, beton ringan, beton berat, aluminium, tungstain dan timah hitam) dalam CADREM1 sebagai *non executable* subroutine BLOCK DATA. Data bahan ini bisa ditambah sesuai kebutuhan dan kemauan pengguna secara manual, termasuk bahan teras APR-1400^[4] dan data karakteristik fisis bahan nuklir lainnya^[5, 6] dan ketiga, menyederhanakan cara penyusunan data asupan (umpan, masukan) menjadi 2 (dua) kelompok, yaitu: kelompok data *integer* sebagai sandi pilihan dan kelompok data *real* sebagai besaran fisik.

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 radiasi yang dikehendaki di permukaan perisai.^[3]

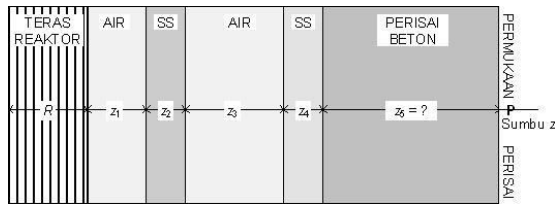
Program CADRE ini semula telah teruji untuk menghitung perisai radiasi dari Calder Hall Reactor di Inggris yang berdaya 180 MW,^[3] dan setelah dimodifikasi sebagai CADREM1 telah digunakan untuk keperluan Diklat di lingkungan BATAN, memverifikasi disain perisai RSG-GAS dan perhitungan disain perisai Reaktor Produksi Isotop (RPI).^[7, 8, 9]

Kelebihan dari program ini juga mempunyai kemampuan untuk menghitung:

- 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 (diinginkan).
- Agihan laju dosis terinci di setiap titik mesh sepanjang daerah perisai.

Dalam rangka evaluasi tebal perisai radiasi APR-1400, pertama diasumsikan susunan perisai

radiasi reaktor daya ini dalam arah radial secara skematis dilukiskan seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema lapisan bahan yang bersifat sbg. perisai radiasi reaktor daya APR-1400 dalam arah radial dalam satuan bebas, tidak dalam ukuran sebenarnya.

dimana:

R \equiv jejari efektif teras, [cm].

z \equiv tebal bahan; indeks 1 dan 3 untuk air, 2 (tong teras) dan 4 (tangki tekan) untuk stainless steel (SS), 5 untuk beton, [cm].

Dasar perhitungan perisai radiasi APR-1400 yang digunakan dalam program CADREM1, adalah menggunakan teknik pemodelan sebagai berikut:

Neutron cepat (${}_0n^1_c$) hasil fisi yang dihasilkan di dalam teras reaktor secara seragam menerobos keluar secara radial yang diandaikan geometrinya berbentuk tabung, dengan kuat sumber per satuan volume sama besar dengan yang ada dalam teras, memancarkan zarah neutronik secara isotropis. Neutron cepat yang lolos keluar dari teras masuk ke dalam perisai mengikuti hukum "pelemahan Kernel titik", yang secara matematis berbentuk sebagai: $\{ \exp(-\Sigma_R z) / (4 \pi R^2) \}$. Setiap pembelahan termal inti ${}^{235}\text{U}$ akan menghasilkan tenaga pukul rata ≈ 200 MeV, yang setara dengan $200 \times 1,60210 \times 10^{-13}$ joule = $3,2042 \times 10^{-11}$ watt-detik. Ini berarti bahwa sebuah reaktor nuklir berbahan nuklir ${}^{235}\text{U}$ dengan daya termal $P_{th} = 1$ watt harus menghasilkan sebanyak $3,1209098 \times 10^{10}$ fisi inti berat (U) setiap detiknya, dengan melahirkan $\sim 2,5$ neutron cepat baru rerata setiap pembelahannya. Oleh karenanya, kuat sumber spesifik neutron cepat (per satuan volum) dalam teras untuk reaktor termal dengan daya nominal P (dalam MW), dapat dirumuskan sebagai:

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

Jika fluks neutron cepat di permukaan luar perisai diberikan oleh:

$$\phi_f = \frac{1}{2} \cdot S_V^{n_f} \cdot \Sigma_r \cdot [E_2(b_1) - E_2(b_1 + b_2)] \cdot \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{detik}} \quad (2)$$

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

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

dimana:

Σ_r \equiv tampang lintang removal makroskopis neutron cepat hasil pembelahan, [cm^{-1}];

z \equiv tebal lapisan bahan perisai, [cm];

R \equiv jejari efektif teras, [cm];

$S_V^{n_c}$ \equiv kuat sumber volumetrik neutron cepat, [${}_0n^1 / (\text{cm}^3 \cdot \text{detik})$];

P \equiv daya termal reaktor pada operasi nominal, [MW];

V \equiv volume teras aktif reaktor, [cm^3];

ϕ_f \equiv fluks neutron cepat di titik P di permukaan luar perisai, [${}_0n^1 / (\text{cm}^2 \cdot \text{detik})$];

E_2 \equiv fungsi integral eksponensial derajat-2;

b_1 \equiv tebal perlambatan neutron cepat dari perisai;

$b_2 = 2 \times \Sigma_R \times R$ \equiv tebal removal neutron dari teras;

\dot{H}_f \equiv laju setara dosis di titik P dari neutron-neutron cepat yang dibangkitkan dalam teras, [mrem/jam];

f_f \equiv faktor konversi laju dosis yang sesuai untuk neutron cepat.

Neutron cepat yang dihasilkan dari proses pembelahan inti akan mengalami tumbukan dan hamburan removal di dalam daerah teras aktif, sedemikian sehingga akhirnya mencapai tenaga termal yang dipertimbangkan dalam CADREM1. 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 persamaan linier sebagai berikut:

$$\phi_{th}(z) = B_{th} \cdot \phi_f(z) \cdot \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{detik}} \quad (4)$$

dimana B_{th} dirumuskan oleh [3, 5]:

$$B_{th} \approx \begin{cases} \frac{\Sigma_R \cdot e^{(\Sigma_R^2 \cdot \tau - h)}}{\Sigma_a \cdot \{1 - (\Sigma_R L)^2\}}; & L \leq \frac{1}{\Sigma_R} \\ \frac{\Sigma_R \cdot e^{(\Sigma_R^2 \cdot \tau - h)}}{\Sigma_a \cdot \{(\Sigma_R L) - 1\}} \cdot e^{\left\{ \left(\Sigma_R - \frac{1}{L} \right) \cdot z - 1 \right\}}; & L > \frac{1}{\Sigma_R} \end{cases} \quad (5)$$

untuk mana: z , L , τ , Σ_a , Σ_R dan h berturut-turut adalah jarak titik yang ditinjau dalam medium dari sumber (cm), panjang difusi dari medium (cm), parameter "umur" Fermi dari medium (cm^2), tampang serapan neutron termal makroskopis (cm^{-1}) dan tampang removal neutron cepat makroskopis (cm^{-1}) dan terakhir, faktor koreksi serapan neutron selama fase perlambatan, yang harganya untuk masing-masing bahan diberikan dalam Tabel 2.

Untuk menyederhanakan perhitungan, fluks neutron termal (ϕ_{th}) dalam tiap lapis perisai dapat

didekati secara cukup akurat dengan sebuah suku eksponensial tunggal yang berbentuk:

$$\phi_{th}(z) = S_V^{n_{th}} \cdot e^{-\mu \cdot z} \frac{\text{neutron}}{\text{cm}^2 \cdot \text{detik}} \quad (6)$$

dimana:

$S_V^{n_{th}}$ \equiv kuat sumber volumetrik neutron termal, $[\text{o}n^1/(\text{cm}^3 \cdot \text{detik})]$.

μ \equiv koefisien pelemahan linier, $[\text{cm}^{-1}]$.

$\phi_{th}(z)$ \equiv fluks neutron thermal pada jarak z dari pusat teras, $[\text{o}n^1/(\text{cm}^2 \cdot \text{detik})]$.

$\phi_f(z)$ \equiv fluks neutron cepat pada jarak z dari pusat teras, $[\text{o}n^1/(\text{cm}^2 \cdot \text{detik})]$.

B_{th} \equiv faktor bangkit neutron termal.

Foton- γ primer yang berasal dari hasil belah seketika serta dari hasil luruh berbagai radioisotop hasil belah umur pendek diandaikan terpancar seragam menerobos teras dengan kuat sumber per satuan volum setara dengan yang berasal dari teras sesungguhnya untuk tingkat daya yang diberikan.

Kuat sumber volumetrik foton- γ primer adalah:

$$S_V^\gamma = 3,1209098 \times \eta_c \times 10^6 \cdot \frac{P}{V} \frac{\text{foton}}{\text{cm}^3 \cdot \text{detik}} \quad (7)$$

Fluks foton- γ primer di permukaan luar perisai diberikan oleh:

$$\phi_\gamma^p = S_V^\gamma \cdot \frac{1}{2 \mu_s} \cdot \bar{\alpha} \cdot e^{-b_1} \cdot [1 - e^{-2 \mu_s R_c}] \frac{\text{foton-}\gamma}{\text{cm}^2 \cdot \text{detik}} \quad (8)$$

dan laju dosis foton- γ primer di titik P adalah:

$$\dot{H}_c = f_c \cdot \phi_\gamma \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (9)$$

dimana:

S_V^γ \equiv kuat sumber foton- γ primer, $[\gamma/(\text{cm}^3 \cdot \text{detik})]$;

η_c \equiv jumlah atau banyaknya foton- γ primer yang dipancarkan per pembelahan, $[\gamma/\text{fisi}]$;

f_c \equiv faktor konversi dari fluks foton- γ primer ke laju dosis foton- γ , $\left| \frac{\text{mrem} \cdot \text{cm}^2}{3600 \text{ foton-}\gamma} \right|$

ϕ_γ^p \equiv fluks foton- γ primer di P, $[\gamma/(\text{cm}^2 \cdot \text{detik})]$.

R_c \equiv jejari teras, $[\text{cm}]$.

Selain di dalam daerah teras, foton- γ juga dibangkitkan oleh tangkapan radiatif neutron termal dalam bahan perisai, yang lazim disebut sebagai foton- γ sekunder.

Agihan sumber foton- γ sekunder mengikuti secara hampir sebanding linier dengan agihan fluks neutron termal dalam perisai. Kuat sumber volumetrik pemancar foton- γ sekunder di dalam perisai pada jarak z dari teras adalah:

$$S(z) = \eta_c(E) \cdot \Sigma_\gamma \cdot \phi_{th}(z) \frac{\text{foton}}{\text{cm}^3 \cdot \text{detik}} \quad (10)$$

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

$$\phi_\gamma^s = \frac{1}{2} \cdot \eta_c \cdot \Sigma_\gamma \cdot S \cdot \alpha \cdot \frac{e^{-\mu \cdot z} - e^{-f \cdot z}}{f - \mu} \cdot e^{-b_1} \frac{\text{foton}}{\text{cm}^2 \cdot \text{detik}} \quad (11)$$

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

$$\dot{H}_s = f_s \cdot \phi_\gamma^s \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (12)$$

dimana:

$\phi_{th}(z)$ \equiv fluks neutron termal bergayut ruang dalam perisai, $[\text{o}n^1/(\text{cm}^2 \cdot \text{detik})]$;

$\eta_c(E_\gamma)$ \equiv banyaknya foton- γ yang dipancarkan dengan tenaga E_γ per tangkapan neutron.

Σ_γ \equiv tampang lintang makroskopis tangkapan radiatif neutron termal untuk bahan lapisan perisai, $[\text{cm}^{-1}]$.

α \equiv konstanta faktor bangkit, $[\text{cm}^{-1}]$.

b_1 \equiv tebal pelemahan dari bahan.

μ \equiv koefisien pelemahan linier dari bahan perisai, yang sudah meliputi serapan foto listrik, efek Compton dan produksi pasangan, $[\text{cm}^{-1}]$;

f_s \equiv faktor konversi dari fluks foton- γ sekunder ke laju dosis, $\left| \frac{\text{mrem} \cdot \text{cm}^2}{3600 \text{ foton-}\gamma} \right|$.

Mekanisme interaksi yang terjadi antara foton- γ dengan bahan perisai tergantung pada energi foton- γ yang mengenai perisai. Untuk foton- γ yang berenergi $< 0,1$ MeV, interaksi yang terjadi didominasi oleh efek fotolistrik; sementara untuk foton- γ 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 (*pair production*). Keseluruhan mekanisme ini sudah dipertimbangkan dalam program CADRE (dan tentu saja CADREM1), yang dinyatakan dalam koefisien pelemahan linier bahan perisai. Dengan demikian maka laju setara dosis keseluruhan di titik P pada permukaan perisai adalah:

$$\dot{H}_{\text{tot di P}} = \dot{H}_{n \text{ cepat}} + \dot{H}_{\gamma \text{ primer}} + \dot{H}_{\gamma \text{ sekunder}} \frac{\text{mrem}}{\text{jam}} \quad (13)$$

TATA KERJA

Tata kerja dalam melaksanakan penelitian ini terbagi menjadi 4 (empat) tahapan kerja, yaitu sebagai berikut:

Tahap pertama adalah melakukan pemilihan bahan dan pendekatan sifat-sifat fisis bahan yang

sesuai dengan bahan-bahan perisai yang digunakan pada reaktor APR-1400, misalnya:

- Baja tahan karat (*Stainless Steel*) disubstitusi dengan bahan Besi { $Z = 26$, $A = 55,847$, $\rho = 7,87 \text{ gram/cm}^3$, $\sigma_a = 2,53 \text{ barn}$, $\sigma_s = 11 \text{ barn}$, $\sigma_R = (1,98 + 0,08) \text{ barn}$ }.
- Beton berat diwakili oleh beton berat tipe BA-a { $Z \approx 15,2845$, $A \approx 33,16775$, $\rho = 3,50445 \text{ gram/cm}^3$, (σ_a , σ_s , dan σ_R)_{efektif} menyesuaikan berdasarkan komposisi bahan} [4, 5].
- Sifat-sifat interaksi fotonik dalam teras APR-1400 dianggap sama seperti interaksi antara foton- γ dan bahan bakar campuran (zirkaloi-4 + oksida uranium + air pendingin primer).

Tahap ke-dua adalah mempersiapkan data masukan yang diperlukan oleh program. Data masukan yang diperlukan adalah data teknis (gambaran geometri) berupa jenis, komposisi dan dimensi dari teras dan sistim perisai APR-1400 seperti tertera pada Tabel 1 dan parameter fisis teras dan perisai seperti tercantum pada Tabel 2.

Tahap ke-tiga adalah melaksanakan perhitungan rancang bangun sistim perisai APR-1400.

Tahap ke-empat melakukan komparasi dengan prakiraan disain APR-1400 dari hasil perhitungan KHNP Co., Ltd. yang bolehjadi ada dan tertuang dalam Standard SAR-APR-1400.[4]

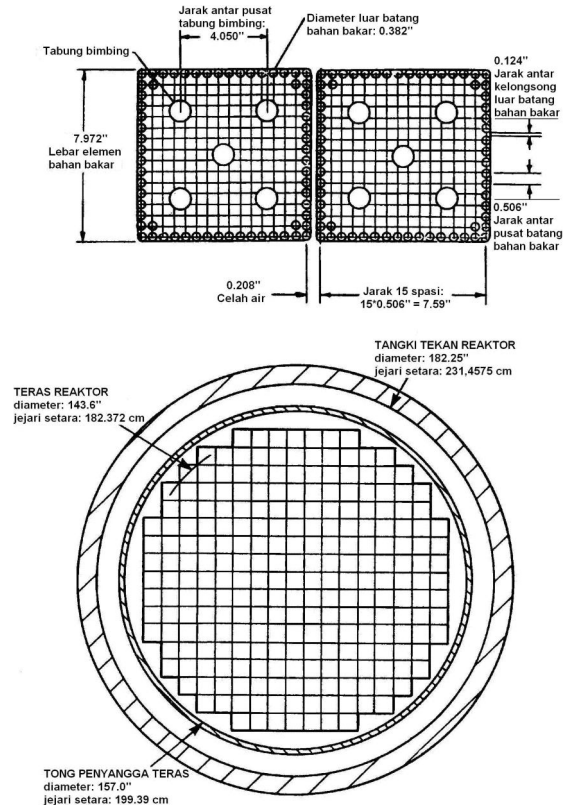
Data masukan untuk Program CADREM1:

- Daya reaktor APR-1400: $P = 3983 \text{ MW}_{th}$.
- Laju dosis setara di permukaan perisai: $\dot{H} = 2,50; 0,25 \text{ dan } 0,10 \text{ mrem/jam}$ (divariasi).
- Dimensi dan komposisi dari teras dan beberapa lapis bahan yang bersifat sebagai perisai radiasi tertera dalam Tabel 1. Bahan yang dirancang khusus dan berfungsi utama sebagai perisai biologi dari radiasi neutron dan foton- γ adalah hanya beton berat saja, yang terletak di sisi lapisan terluar.

Tabel 1. Dimensi dari teras dan perisai APR-1400 dalam arah radial.[4]

No. Bahan perisai radiasi	Tebal z_i , [cm]	Jejari R_i , [cm]	Jumlah "mesh"
0. Teras	182,37	182,37 [†]	-
1. Selimut teras	2,50	184,87	2
2. Air dalam tong	14,52	199,39 [†]	16
3. Tong teras SS	8,00	207,39	8
4. Air luar tong	24,07	231,46 [†]	16
5. Austenitis SS	0,60	232,06	2
6. Tanki tekan Fe	25,00	257,06	16
7. Beton berat	250,00	507,06	20

[†] = dari acuan [4], lebih jelasnya, lihat Gambar 2.



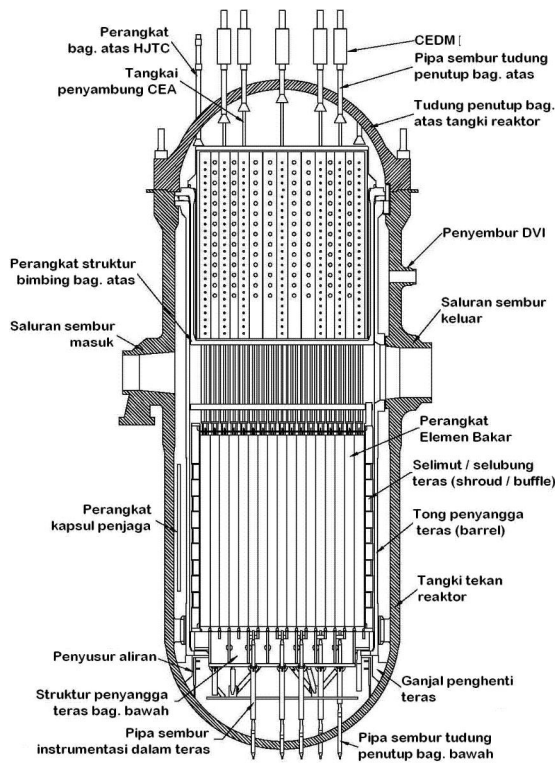
Gambar 2. Tampang irisan lintang teras, tong dan tangki tekan reaktor daya AP-1400.

Selain daripada itu juga masih diperlukan data berikut:

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

Tabel 2. Parameter fisis beberapa bahan baku guna perisai radiasi reaktor APR-1400.[4, 5, 6]

Material Perisai Radiasi	Umur Fermi, τ (cm ²)	Panjang Difusi, L (cm)	Tampang Removal, Σ_R (cm ⁻¹)	Tampang Serapan, Σ_a (cm ⁻¹)	Faktor "h"
Air/H ₂ O	27	2,73	0,103	0,022	1
Besi Fe	200(?)	1,429	0,166(?)	0,1903	1
Baja SS Taharat	200	1,33	0,166	0,215	1
Beton Ringan	86,9	4,96	0,095	0,0197	1
Beton Berat	101	7,69	0,088	0,0059	1



Gambar 3. Tampang irisan bujur teras, tong penyangga dan tangki tekan reaktor daya AP-1400.

Parameter Fisis teras APR-1400 (Daerah 1):

- Jejari (R), tinggi (H) dan volume (V) teras.
- Tampang lintang removal rerata teras ($\Sigma_{R,c}$).
- Data "yield" (intensitas) mutlak foton- γ primer (η_c) untuk 8 kelompok energi.^[5]
- Parameter " h " digunakan untuk perhitungan koreksi faktor bangkit neutron termal B_{th} (lihat persamaan 5) yang harganya diperoleh secara empirik (yang biasanya berkisar di sekitar 1).

Struktur dan komposisi teras

Seperti dilukiskan dalam Gambar 2, kisi teras APR-1400 tersusun atas $(17 \times 17) = 289$ sektor luasan bujur sangkar (segi-4 sama sisi) seukuran tampang irisan lintang elemen bakar yang dengan mengurangi sebanyak $(4 \times 12) = 48$ sektor di keempat sudutnya, sehingga tinggal $(289 - 48) = 241$ sektor membentuk luasan tampang irisan teras aktif yang berpola lingkaran. Lebar sisi bujur sangkar elemen bakar = $7.972'' = 20.24888$ cm. Lebar celah air antar elemen bakar = $0.208'' = 0.52832$ cm \rightarrow Lebar efektif sisi bujur sangkar elemen bakar = $8.18'' = 20.7772$ cm dengan luas 66.9124 m² = 431.692 ... cm², maka luas setara lingkaran teras = 16125.8884 m² = 104037.7816 ... cm² \rightarrow Diameter setara teras = 143.29 ...'' = 363.95 ... cm. Karena menurut data yang tertulis sedikit lebih besar, yaitu $\varnothing = 143.6$ '' = 364.744 cm sehingga diambil jejari setara teras = 71.8 '' =

182.372 cm, maka data inilah yang kelak akan digunakan seterusnya. Berdasar diameter ini, luas tampang irisan teras aktif efektif adalah 16195.664 m² = 104487.9465 ... cm². Jika panjang aktif perangkat elemen bakar atau tinggi aktif teras = $150'' = 381$ cm \rightarrow volume aktif efektif = 2429349.6167 m³ = 39809907.6476 ... cm³.

Komposisi bahan yang terkandung di dalam teras aktif selain air biasa (H₂O) yang berfungsi sebagai pendingin primer dan moderator, ada 6 (enam) macam perangkat elemen bakar masing-masing dengan jumlah, tingkat pengayaan dan sifat-sifat khas lainnya seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Pemuatan perangkat elemen bakar APR-1400 daur pertama dengan lobang air dan batang penyerap dapat bakar.^[4]

Jenis perangkat bakar	Banyak perangkat bakar	Persen pengayaan U-235	#batang per perangkat	#batang RDB per perangkat	Persen Gd
A0	81	1,60	236	0	-
B0	28	3,28	236	0	-
B1	48	3,28/2,78	172/52	12	8
B2	4	3,28/2,78	124/100	12	8
C0	20	3,78/3,28	184/52	0	-
C1	60	3,78/3,28	120/100	16	8
Jumlah	241 bh				

Catatan / keterangan:

- Seluruh batang penyerap kuat / racun dapat bakar (RDB) gadolinia (Gd₂O₃) mempunyai bahan bakar UO₂ dengan U-alam (0,711% U-235).
- Gd (sebagai Gd₂O₃) 90% hanya terdapat di pusat saja dari batang RDB. Bagian atas dan bawah (total sepanjang 15'') dari batang RDB tidak mengandung gadolinia.

Berdasar semua data tersebut di atas, maka dapat dan telah dihitung komposisi semua unsur yang terkandung di dalam material teras seperti tertera dalam Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi unsur yang terkandung di dalam volume aktif setara teras.

No.	Nama unsur	Simbol	Massa, kilogram	Persen berat
1	Uranium	U ₉₂	103420,000	59,891
		²³⁵ U ₉₂	2813,024	1,629
		²³⁸ U ₉₂	100606,976	58,262
2	Oksigen	O ₈	32888,000	19,046
3	Hidrogen	¹ H ₁	2376,000	1,376
4	Zirkonium	Zr ₄₀	33394,958	19,339
5	Tin	Sn ₅₀	492,952	0,285
6	Besi	Fe ₂₆	71,393	0,041
7	Krom	Cr ₂₄	33,997	0,020
8	Hafnium	Hf ₇₂	3,400	0,002
	Total		172680,700	100,000

Catatan: Dalam tabel ini, komposisi unsur gadolinium dalam gadolinia tidak diperhitungkan, karena persentasenya dianggap nisbi cukup kecil.

Dari massa total teras aktif yang diberikan dalam Tabel 4 dan volume teras efektif aktif terhitung, maka dapat diperkirakan rapat massa "bubur unsur" teras adalah sekitar 4.3376... g/cm³.

Format data masukan

Susunan dan tata-cara penulisan data masukan untuk program CADREM1 telah penulis buat lebih sederhana dibanding dengan program aslinya, y.i. CADRE. Semula CADRE memerlukan semua informasi yang meliputi berbagai opsi dan data nuklir bahan (baik untuk perisai maupun teras reaktor), memerlukan minimal 18 s.d. 22 baris data dan harus ditulis dalam tatanan tetap / terikat (*fixed format*) sehingga lebih rumit dan rentan terhadap kesalahan pengguna. Sementara pada CADREM1, semua data nuklir bahan untuk perhitungan perisai radiasi gamma telah penulis siap-sediakan dalam perbendaharaan program dan terintegrasi di dalamnya, di bawah pernyataan BLOCK DATA sebagai *non executable statement*. Data nuklir bahan yang masih perlu dibaca masuk (selain opsi atau pilihan yang dikehendaki pengguna) adalah tinggal data nuklir bahan untuk perhitungan neutronik 1 (satu) kelompok, sehingga total hanya memerlukan 14 baris data saja dan bisa ditulis dengan cara bebas (*free format*) sehingga lebih luwes (*flexible*) dan hingga kini masih terus dikembangkan.

Format umum penulisan data masukan dalam file data elektronik untuk dibaca masuk oleh kode CADREM1 adalah sebagai berikut:

1. TEKS
.....
Catatan atau keterangan seperlunya mengenai pokok masalah yang hendak diselesaikan (alfa-numerik), cukup sebaris saja.
2. KPRIN, NREGS, NERGS, MATER(0), IXP, LOPT1, LOPT2, ICASE
.....
Moda cetak, banyak daerah, banyak energi, sandi bahan teras, nomor daerah yang hendak dilacak tebalnya (jika LOPT = 1), pilihan garapan, pilihan cetak laju dosis terinci (1) atau tidak (0), sandi geometri (1 = planar / papan datar, 2 = tabung / silindris, 3 = bola / sferis).
3. (MATER(I), I = 1, NREGS)
.....
Sandi bahan: M₀ untuk teras; M_i, i ≥ 1 untuk perisai; i = nomor bahan.
4. (NDD(I), I = 1, NREGS)
.....
Banyaknya "mesh" daerah perisai ke-i, ≤ 20.

5. (ZR(I), I = 1, NREGS)
.....
Tebal lapisan perisai daerah-i, cm.
6. (EPHS(I), I = 1, NREGS)
.....
Energi foton-γ gamma sekunder daerah-i, MeV.
7. (ETAS(I), I = 1, NREGS)
.....
"Yield" foton-γ sekunder daerah-i (nondim)
8. (REMOV(I), I = 1, NREGS)
.....
Tampang removal neutron cepat makroskopis daerah-i, cm⁻¹.
9. (CAPTUR(I), I = 1, NREGS)
.....
Tampang serapan / tangkapan neutron termal makroskopis daerah-i, cm⁻¹.
10. (DL(I), I = 1, NREGS)
.....
Panjang difusi neutron termal daerah-i, cm.
11. (TAU(I), I = 1, NREGS)
.....
"Umur" Fermi neutron cepat daerah-i, cm².
12. (HT(I), I = 1, NREGS)
.....
Faktor koreksi perlambatan neutron cepat daerah-i; biasanya diberikan h = 1, |nondim|.
13. CORF, CHTF, POW, CREM, DMXWL
.....
Jejari teras (cm), tinggi teras (cm), daya termal nominal (MW), tampang removal neutron cepat makroskopis daerah teras reaktor (cm⁻¹), laju dosis radiasi terencana di permukaan perisai, titik P (mrem/jam).
14. EPHC(J), J = 1, NERGS)
.....
Energi foton-γ primer kelompok-j, MeV, untuk 1 ≤ j ≤ 8.

Dengan mengumpukan data masukan ke *running* kode CADREM1 yang disiapkan dalam e-file ASCII bernama katakan misalnya APR1400.INP sesuai dengan format penulisan yang dianjurkan di atas seperti contoh yang tertera pada Tabel 5, maka dalam tempo singkat < 0,1 detik akan diperoleh e-file hasil perhitungan bernama katakan misalnya APR1400.OUT. Isi file keluaran hasil perhitungan ini tidak ditampilkan sepenuhnya di makalah ini karena memakan tempat, tetapi hasil akhirnya telah disunting dan disajikan dalam Tabel 6 dan dilukiskan dalam Gambar 4.

Tabel 5. Contoh data masukan untuk program CADREM1 dalam file ASCII bernama APR1400.INP.

← format 80 kolom →

```

Analisis tebal perisai biologi reaktor daya APR-1400 menggunakan kode CADREM1
  1      7      8      16      7      1      1      2
  9      5      9      5      9      16      6
  2     16      8     16      2     16     20
 2.5000 14.5200  8.0000 24.0700  0.6000 25.0000 250.0000
 7.0000  5.0000  6.0000  5.0000  5.0000  5.0000  5.0000
 1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000
 0.1660  0.1030  0.1660  0.1030  0.1660  0.1660  0.0880
 0.2150  0.2200  0.2150  0.2200  0.2150  0.2150  0.5900
 1.3300  2.7300  1.3300  2.7300  1.3300  1.3300  7.6900
200.0000 27.0000 200.0000 27.0000 200.0000 200.0000 101.0000
 0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000  0.1000
182.3700 381.0000 3983.0000  0.1280  2.5000 ←[divariansi dengan harga 1.0000 dan
0.2500]
 1.0000  2.0000  3.0000  4.0000  5.0000  6.0000  7.0000
 8.0000
    
```

HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketebalan lapisan perisai beton

Hasil perhitungan tebal lapisan perisai beton APR-1400 menggunakan program komputer CADREM1 untuk tingkat daya 3993 MW_{th} dalam penelitian ini, dengan laju dosis permukaan luar perisai 2,5 mrem/jam adalah 205,4 cm, sedangkan untuk laju dosis 1 mrem/jam adalah 215,65 cm dan untuk 0,25 mrem/jam adalah 226,54 cm. Tebal perisai beton APR-1400 yang mengelilingi tabung tekan menurut disain yang diterapkan oleh KHNP Co., Ltd. berdasarkan SSAR APR-1400^[2] agar laju dosis permukaan luar perisai < 0,25 mrem/jam tidak (belum) ditemukan dalam dokumen itu. Jika ketebalan ini dihitung ulang menggunakan CADREM1 maka akan diperoleh laju dosis permukaan sebesar 0,1 mRem/jam untuk ketebalan 234,97 cm (dibulatkan 235 cm).

Hasil perhitungan tebal perisai beton berat APR-1400 dalam SSAR APR-1400 yang dilaksanakan oleh tim KHNP Co., Ltd. tidak diketahui sejauh mana metode dan inputan data yang dipergunakan dalam perhitungan tersebut, kecuali hanya ketebalan sistem lapisan perisai dengan batasan paparan permukaan perisai < 0,25 mrem/jam dan tidak diketahui pula kode komputer apa yang digunakan untuk menghitungnya.

Hasil perhitungan ketebalan perisai biologi reaktor APR-1400 dengan menggunakan program CADREM1 ini,^[10, 11] diperoleh harga yang sesuai dengan hasil perkiraannya, yaitu ~ 2,5 meter.

Dari pembahasan di atas dapat dikatakan bahwa disain perisai APR-1400 telah memenuhi faktor keselamatan dan keamanan. Perhitungan tebal perisai beton APR-1400 menggunakan kode CADREM1 dalam penelitian ini boleh dikatakan mempunyai ketelitian yang cukup memadai.

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

Agihan penurunan laju dosis dalam lapisan selimut teras, air-1, tong penyangga teras *stainless steel* (SS), air-2, austenitis pelapis tangki (SS), tangki tekan dan beton berat, tertera pada Tabel 6 dan Gambar 4.

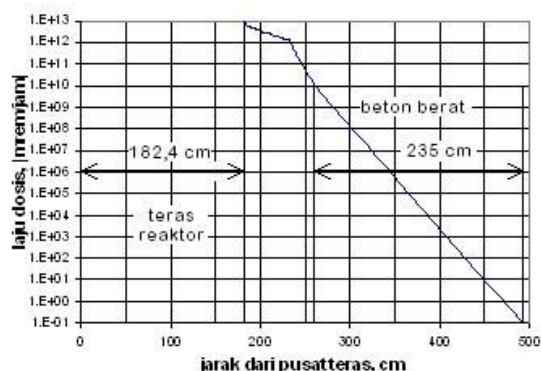
Tabel 6. Agihan laju dosis di setiap titik mesh lapisan perisai.

No. Titik mesh	Jarak dari pusat, cm	Jarak dalam perisai, cm	Laju dosis (mrem/jam) di setiap titik "mesh"	
			linier	log
1.	182.37	0.00	9.11E+12	12.959
2.	184.87	2.50	6.26E+12	12.797
3.	184.87	0.00	6.26E+12	12.797
4.	185.84	0.97	5.87E+12	12.769
5.	186.81	1.94	5.54E+12	12.744
6.	187.77	2.90	5.26E+12	12.721
7.	188.74	3.87	5.00E+12	12.699
8.	189.71	4.84	4.78E+12	12.680
9.	190.68	5.81	4.75E+12	12.677
10.	191.65	6.78	4.54E+12	12.657
11.	192.61	7.74	4.35E+12	12.639
12.	193.58	8.71	4.18E+12	12.622
13.	194.55	9.68	4.03E+12	12.605
14.	195.52	10.65	3.89E+12	12.590
15.	196.49	11.62	3.76E+12	12.575
16.	197.45	12.58	3.64E+12	12.561
17.	198.42	13.55	3.53E+12	12.548
18.	199.39	14.52	3.43E+12	12.535
19.	199.39	0.00	3.43E+12	12.535
20.	200.53	1.14	3.29E+12	12.517
21.	201.68	2.29	3.15E+12	12.499
22.	202.82	3.43	3.03E+12	12.481
23.	203.96	4.57	2.90E+12	12.463
24.	205.10	5.71	2.79E+12	12.445

No. Titik mesh <i>i</i>	Jarak dari pusat, cm	Jarak dalam perisai, cm	Laju dosis (mrem/jam) di setiap titik "mesh"	
			linier	log
25.	206.25	6.86	2.68E+12	12.428
26.	207.39	8.00	2.57E+12	12.410
27.	207.39	0.00	2.57E+12	12.410
28.	208.99	1.60	2.45E+12	12.389
29.	210.60	3.21	2.33E+12	12.368
30.	212.20	4.81	2.22E+12	12.347
31.	213.81	6.42	2.12E+12	12.326
32.	215.41	8.02	2.02E+12	12.306
33.	217.02	9.63	1.93E+12	12.285
34.	218.62	11.23	1.84E+12	12.265
35.	220.23	12.84	1.76E+12	12.245
36.	221.83	14.44	1.68E+12	12.224
37.	223.44	16.05	1.60E+12	12.204
38.	225.04	17.65	1.53E+12	12.184
39.	226.65	19.26	1.46E+12	12.164
40.	228.25	20.86	1.39E+12	12.144
41.	229.86	22.47	1.33E+12	12.124
42.	231.46	24.07	1.27E+12	12.104
43.	231.46	0.00	1.27E+12	12.104
44.	232.06	0.60	1.25E+12	12.096
45.	232.06	0.00	1.25E+12	12.096
46.	233.73	1.67	9.31E+11	11.969
47.	235.39	3.33	6.95E+11	11.842
48.	237.06	5.00	5.19E+11	11.715
49.	238.73	6.67	3.88E+11	11.588
50.	240.39	8.33	2.90E+11	11.462
51.	242.06	10.00	2.16E+11	11.335
52.	243.73	11.67	1.62E+11	11.208
53.	245.39	13.33	1.21E+11	11.082
54.	247.06	15.00	9.01E+10	10.955
55.	248.73	16.67	6.73E+10	10.828
56.	250.39	18.33	5.03E+10	10.702
57.	252.06	20.00	3.76E+10	10.575
58.	253.73	21.67	2.81E+10	10.448
59.	255.39	23.33	2.10E+10	10.322
60.	257.06	25.00	1.57E+10	10.195
61.	257.06	0.00	1.57E+10	10.195
62.	269.43	12.37	3.99E+09	9.601
63.	281.79	24.73	1.02E+09	9.008
64.	294.16	37.10	2.60E+08	8.415
65.	306.53	49.47	6.66E+07	7.824
66.	318.89	61.83	1.71E+07	7.232
67.	331.26	74.20	4.38E+06	6.641
68.	343.63	86.57	1.12E+06	6.051
69.	355.99	98.93	2.89E+05	5.460
70.	368.36	111.30	7.42E+04	4.871
71.	380.73	123.67	1.91E+04	4.281
72.	393.09	136.03	4.92E+03	3.692
73.	405.46	148.40	1.27E+03	3.104
74.	417.83	160.77	3.28E+02	2.516
75.	430.19	173.14	8.48E+01	1.928
76.	442.56	185.50	2.19E+01	1.341
77.	454.93	197.87	5.69E+00	0.755
78.	467.30	210.24	1.48E+00	0.169
79.	479.66	222.60	3.84E-01	-0.416

No. Titik mesh <i>i</i>	Jarak dari pusat, cm	Jarak dalam perisai, cm	Laju dosis (mrem/jam) di setiap titik "mesh"	
			linier	log
80.	492.03	234.97	1.00E-01	-1.000
81.	492.03	0 (titik P)	1.00E-01	-1.000

Dari Tabel 6 dan Gambar 4 dapat diamati laju dosis di permukaan tabung teras dan di setiap bidang antarmuka, yaitu berturut-turut permukaan tabung teras, yaitu (teras | selimut teras, SS), (selimut teras | air-1), (air-1 | tong teras SS), (tong teras | air lagi), (air-2 | austenitis pelapis tong, SS), (austenitis | tangki tekan Fe) dan (tangki tekan | beton berat) berturut-turut adalah: 9,11E+12; 6,26E+12; 3,43E+12; 2,57E+12; 1,27E+12, 1,25E+12 dan 1,57E+10 mrem/jam.



Gambar 4. Laju dosis di dalam lapisan perisai radiasi reaktor daya APR-1400 sebagai fungsi jarak dari pusat teras.

Dari Gambar 4 dan atau Tabel 6 tampak bahwa penurunan laju dosis berbeda dalam setiap lapisan. Perbedaan kemiringan dalam setiap lapisan perisai SS, air, SS dan beton ini disebabkan oleh perbedaan parameter dari setiap lapisan material yaitu nomor atom, berat jenis dan koefisien perlemahan, dsb. Tampak pula bahwa penurunan laju dosis radiasi yang tajam terjadi dalam material beton. Hal ini didukung oleh karakter dan parameter fisis dari beton yang bersifat memperlemah radiasi, di samping juga membuktikan fungsinya sebagai bahan yang efektif dipergunakan sebagai perisai reaktor nuklir.

KESIMPULAN

- Dari hasil perhitungan, tebal optimum perisai beton berat APR-1400 menggunakan program CADREM1 dengan laju dosis permukaan luar perisai 2,5 mrem/jam adalah 205,4 cm, sedangkan untuk laju dosis permukaan luar perisai 0,25 mrem/jam adalah 226,54 cm.
- Jika tebal perisai ini dihitung ulang menggunakan CADREM1 maka akan

diperoleh laju dosis permukaan sebesar 0,1 mrem/jam untuk ketebalan beton perisai biologis 235 cm.

- Perhitungan prakiraan disain perisai APR-1400 menggunakan program CADREM1 yang telah dimodifikasi telah cukup akurat.
- Disain ketebalan dan fungsi perisai radiasi reaktor APR-1400 telah memenuhi batas keselamatan disain yang diperkenankan oleh badan regulasi yang berwenang untuk itu (dhi. BAPETEN).

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama, penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Ir. Suharno, M.Sc. yang dahulu pernah membantu dalam mendapatkan informasi mengenai perisai radiasi reaktor AP-600 Westinghouse. Ke-dua kepada Ir. Endiah Puji Hastuti, M.Eng. dan Drs. Amir Hamzah, M.Si. yang telah membantu memberi banyak informasi data tentang APR-1400 serta Anis Rohanda, ST yang telah membantu mengolah data komposisi teras reaktor yang dimaksud.^[4] Ke-tiga kepada Dr. Setiyanto M.Sc., Ir. Suryawati Syarief, M.Si., Dr. M. Budi Setiawan, M.Eng. dan Dr. Yus Rusdian Akhmad yang dahulu pernah saya ajak dan mau berkecimpung bersama dalam “kolam masalah” perisai radiasi dan pemanasan gamma serta telah sudi pula meluangkan banyak waktu, kesempatan dan tenaga untuk saya ajak berdiskusi dalam upaya pemecahan masalah iptek reaktor dan keselamatan nuklir semacam ini sehingga secara simultan dapat terselesaikannya penulisan makalah ini dengan baik, benar dan ... sudah barang tentu bermanfaat bagi semua. Semoga!

DAFTAR PUSTAKA

1. SURYAWATI S. dan PUDJIJANTO MS, “Evaluasi Perisai Reaktor Daya (AP600) Menggunakan Program CADRE Terubah (CADRMOD1)”, Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir V di Gedung Perasten, Kawasan PPTA Pasar Jumat, Jakarta Selatan, 18-19 Maret 1998.
2. Team of Designer, “Simplified Passive Advanced Light Water Reactor Plant Program, AP600 Standard Safety Analysis Report”, 4th, 6th and 7th -Volume, DE-AC03-90SF18495, Westinghouse Electric Corporation, (1992).
3. JAMES WOOD, “Computation Methods in Reactor Shielding”, Pergamon Press, Ltd., New York, (1982).
4. Team of Designer, “Advanced Power Reactor, APR-1400 Standard Safety Analysis Report (APR1400 SSAR)”, Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., (2000).
5. R. G. JAEGER et al, “Engineering Compendium on Radiation Shielding”, Vol I, II & III, New York, (1975).
6. Team of Scientist, “Reactor Physics Constants”, Argonne National Laboratory (ANL)-5800, Illionis, (1963).
7. SURYAWATI S. dan PUDJIJANTO MS, “Perhitungan Perisai Radiasi RSG-GAS Menggunakan Program CADRE”, Prosiding Hasil-hasil Litbang PRSG Tahun 1995 / 1996, ISSN: 0854 5728, p.106-120, Serpong, (Desember 1996).
8. PUDJIJANTO MS, SURYAWATI S. dan SETIYANTO, “Perhitungan Perisai Beton Reaktor Produksi Isotop (RPI) Menggunakan Program CADREM1”, Dokumen Laporan Internal (tidak dipublikasi), Serpong, (1994/1995).
9. PUDJIJANTO MS, SURYAWATI S., SETIYANTO dan BUDI SETIAWAN, “Komputasi Perisai Reaktor”, Diktat intern BATAN untuk Diklat Aspek Neutronika dan Thermohidrolika PLTN I, PPTKR-PRSG-Pusdiklat, Serpong, (19 September -14 Oktober 1994).
10. PUDJIJANTO MS, “Penentuan Fraksi Kelompok Gamma Primer Hasil Belah Termal Seketika dengan Metode Agihan Spektrum Gamma Kontinyu-diferensiabel”, Makalah intern untuk mengkonsumsi subroutine XIFAST pada program CADREM1, tidak dipublikasi, Revisi-0 (25 Juni 1996), yang kemudian disempurnakan dengan judul “Penentuan Parameter Fungsi Distribusi dan Spektrum Foton Gamma Primer”, Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir “Tri Dasa Mega, Vol. 9 No. 3, Oktober 2007, ISSN 1411-240X, terakreditasi No. 81/AKRED-LIPI/P2MBI/5/2007.
11. PUDJIJANTO MS, “CADREM1, Program CADRE Terubah Untuk Perhitungan Perisai Reaktor Multi Lapis”, Makalah intern (tidak dipublikasi), Revisi-0 (1994).
12. PUDJIJANTO MS, “Rekalkulasi Tebal Perisai Radiasi Radial dan Aksial Reaktor Riset TRIGA-2000 pada Tingkat Daya 2 MW_{th}”, disajikan dalam acara Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir (PPI PDIPTN) tahun 2010 di PTAPB BATAN Yogyakarta, hari Selasa, tgl. 20 Juli 2010.

TANYA JAWAB

Pertanyaan :

Berapa nilai optimal pemilihan tebal shielding yang didasarkan pada laju dosis permukaan luar shielding?

(Syahrir, PTLR-BATAN)

Jawaban :

Dalam perhitungan analisis saya, pemilihan tebal perisai biologi pada reaktor daya berdasarkan atas laju dosis di permukaan luar perisai tidak lebih daripada 2,5 mrem/jam. Hal ini mengingat perisai biologi masuk dalam daerah kerja radiasi(di bawah sungkup reaktor).