BAB II

TEORI DOSIS PERKIRAAN TITIK KERNEL

2.1. Teori Titik Kernel

Semua sumber radiasi lebar dalam reaktor nuklir dapat dianggap sebagai kumpulan dari sumber-sumber titik. Tanggapan detektor akibat sumber lebar tersebut didapat sebagai penjumlahan pengintegralan dari sumber titik yang membentuk sumber lebar tersebut. Inilah inti metode titik Kernel. Secara matematis dapat ditulis sebagai (Broadhead, 1990) :

$$R(\bar{r}) = \int_{source} S(\bar{r})K(\bar{r}',\bar{r})\, d\bar{r}' \qquad (2.1)$$

dengan $R(\bar{r})$ adalah tanggapan titik isotrop detektor pada ruang $\bar{r}$. Yang dimaksud tanggapan di sini adalah fluks ataupun fungsi dari fluks, seperti laju radiasi. $S(\bar{r}')\, d\bar{r}'$ adalah kekuatan sumber, diukur dalam partikel per detik, dalam elemen ruang $d\bar{r}'$ di sekitar $\bar{r}'$. Elemen diferensial $d\bar{r}'$ adalah perubahan panjang, luas atau volume per satuan waktu. $K(\bar{r}',\bar{r})$ adalah tanggapan detektor yang terletak pada titik $\bar{r}$ akibat sumber titik satuan di lokasi $\bar{r}'$. Kernel tanggapan titik ini bergantung pada jenis partikel, energi dan komposisi material antara sumber dan detektor.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Selain itu, secara umum juga tergantung pada komposisi daerah yang tidak terletak pada lintasan langsung antara titik sumber dan titik detektor. Ketergantungan ini diabaikan dalam analisa titik Kernel. Kernel tanggapan titik diasumsikan tergantung pada komposisi material daerah dalam lintasan langsung antara titik sumber dan detektor, tetapi tidak pada daerah di luar itu.

Ada dua problem yang nyata dalam analisa titik Kernel. Pertama adalah penentuan dari tanggapan Kernel $K(\bar{r}',\bar{r})$. Yang kedua adalah integrasi titik Kernel sampai ke sumber. Problem pertama menyangkut masalah fisika sedangkan problem yang kedua menyangkut masalah matematika.

2.2. Titik Kernel tidak Bertumbukan

Fluks tidak bertumbukan maksudnya adalah fluks dari partikel yang bergerak antara sumber dan detektor tanpa mengalami interaksi, baik hamburan atau penyerapan. Fluks tidak bertumbukan dari satu sumber titik isotrop yang memancarkan satu partikel monoenergitik per detik, yang dideteksi oleh detektor pada jarak sejauh r (Foderado, 1968), dapat ditulis :

$$\phi_u = \frac{P_g P_a}{dA} \tag{2.2}$$

dengan P_g adalah peluang bahwa partikel akan dapat meninggalkan sumber dalam arah sedemikian sehingga dapat mencapai detektor tanpa mengalami

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

interaksi; P_a adalah peluang tidak akan terjadi interaksi antara sumber dan detektor dan dA adalah luas tampang lintang dari detektor.

Karena sumber adalah isotrop, peluang geometri P_g diberikan oleh sudut ruang agak condong ke detektor pada sumber dibagi dengan 4π, menjadi:

$$P_g = \frac{d\Omega}{4\pi} = \frac{dA}{4\pi r^2} \tag{2.3}$$

Karena detektor kecil, semua jarak antara titik sumber dan detektor dapat dianggap sama. P_a adalah peluang bahwa neutron atau foton akan berjalan antara sumber dan detektor tanpa benturan, diberikan oleh hukum Lambert's :

$$P_a = exp\left[-\left(\mu_1 x_1 + \mu_2 x_2 + \ldots + \mu_i x_i\right)\right] \tag{2.4}$$

dengan μ_i adalah tampang lintang makroskopik medium ke-i dan x_i adalah tebal daerah dalam jarak partikel antara sumber dan detektor.

Persamaan (2.3) dan (2.4) didistribusi ke persamaan (2.2) menghasilkan

$$\phi_u = \frac{1}{4\pi r^2} exp\left[-\sum_i \mu_i x_i\right] \tag{2.5}$$

Persamaan (2.5) berlaku umum fluks yang tidak bertumbukan dari sumber titik satuan, tanpa memandang jumlah atau bentuk medium antara

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

sumber dan detektor, r adalah jarak antara sumber ke detektor. Persamaan sebelah kanan pada persamaan (2.5) disebut titik Kernel untuk jumlah fluks yang tidak bertumbukan.

Dalam desain perisai, fluks tidak penting melainkan beberapa fungsinya seperti laju dosis biologi atau kadar pengendapan energi. Jika C_j adalah konstanta yang merubah fluks yang tidak bertumbukan ϕ_u ke fungsi F_{uj}, maka:

$$F_{uj} = \frac{C_j}{4\pi r^2} exp\left[-\sum_i \mu_j x_i\right] \tag{2.6}$$

2.3. Foton Titik Kernel

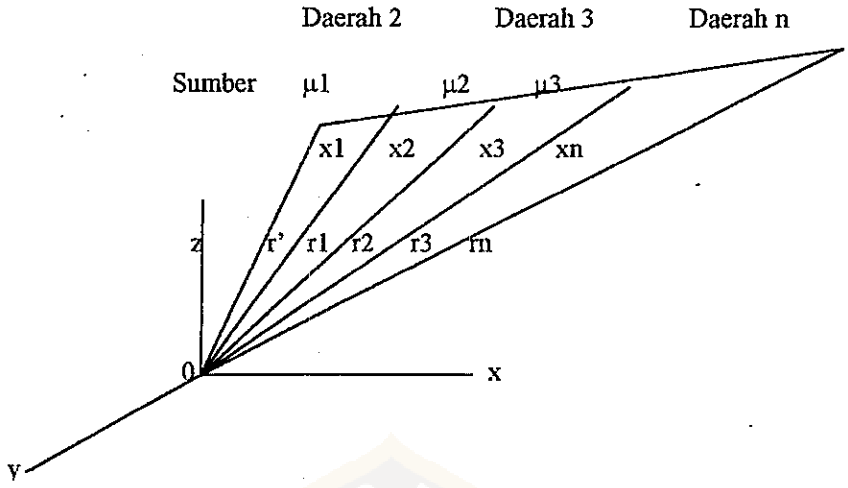
Dalam analisa atenuasi foton, kontribusi radiasi hamburan terhadap fungsi F_{uj} diperhitungkan dengan mengalikan titik Kernel yang tidak bertumbukan dengan sebuah faktor pertumbuhan (*build-up factor*) B_j

$$F_{uj} = \frac{B_j C_j}{4\pi r^2} exp\left[-\sum_i \mu_j x_i\right] \tag{2.7}$$

Dalam pemakaian analisa titik Kernel untuk perisai foton, problem yang dihadapi sering kali memerlukan integrasi titik Kernel pada rumus (2.7), dalam ruang sumber dan seluruh energi yang dipancarkan foton, yaitu

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$F_j(\bar{r}) = \int_0^\infty C_j(E) \int_0^\infty \frac{S(\bar{r}',E)B_j(E,\mu_i(E)|\bar{r}_i - \bar{r}_{i+1}|)}{4\pi|\bar{r}_n - \bar{r}'|^2} exp\left[-\sum_i \mu_i(E)|\bar{r}_i - \bar{r}_{i+1}|\right] d\bar{r}'\, dE \tag{2.8}$$



Gb. 2.1. Integrasi titik Kernel dari sumber lebar

Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.1, $S(\bar{r}',E)d\bar{r}'\,dE$ adalah jumlah foton per satuan waktu dalam daerah sumber ruang $d\bar{r}'$ di sekitar $\bar{r}'$ dan dalam daerah energi dE disekitar E. Elemen diferensial $d\bar{r}'$ adalah inkremen dari panjang, luas atau volume tergantung pada geometri sumber. Dimensi SdE adalah foton per satuan panjang, luas atau volume; $\bar{r}_i$ adalah posisi vektor pada daerah lapisan ke-i sepanjang jarak antara sumber dan detektor; $\bar{r}'$ adalah posisi vektor titik sumber, sebuah variabel; $\bar{r}_n$ adalah posisi vektor detektor, konstan dan $C_j(E)$ perubahan jumlah fluks pada fungsi F_j.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Untuk perhitungan sinar gamma, modul QADS menggunakan metode titik Kernel. Dalam metode ini, titik Kernel dianggap sebagai perpindahan energi oleh fluks yang tidak bertumbukan sepanjang garis lurus yang dikombinasi dengan pendekatan faktor pertumbuhan untuk menghitung kontribusi penyebaran foton. Dengan sumber yang terdistribusi, titik Kernel merupakan integrasi di luar sumber volume dalam energi tersebut. Seperti ditunjukkan dalam persamaan (2.9), dosis rata-rata sinar gamma pada beberapa titik oleh sumber yang tidak isotropik memancarkan foton S dari energi E per detik per volume adalah :

$$D(\bar{r}) = K\int_{v} \frac{S(\bar{r}')B(\mu|\bar{r}-\bar{r}'|E)\,exp(-\mu|\bar{r}-\bar{r}'|)dv}{4\pi|\bar{r}-\bar{r}'|^2} \qquad (2.9)$$

dengan

$D(\bar{r})$	: dosis rata-rata sinar gamma
S	: kuat sumber radiasi
E	: energi per detik per volume
K	: faktor konversi
$\bar{r}$	: titik pada nilai dosis gamma yang akan dihitung
$\bar{r}'$	: lokasi sumber dalam volume v
v	: volume daerah sumber
μ	: total koefisien atenuasi pada energi E

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$|\bar{r} - \bar{r}'|$: jarak antara titik sumber dan titik pada intensitas gamma yang dihitung.

Sedangkan faktor pertumbuhan B harus diselesaikan dengan pendekatan-pendekatan.

2.4. Pendekatan Faktor Pertumbuhan

Ada dua pendekatan untuk menghitung faktor pertumbuhan B. Pendekatan pertama digunakan untuk menghitung faktor pertumbuhan yang sesuai sebagai fungsi dari energi sinar gamma dan jumlah jarak jalan bebas rata-rata (*mean free-paths*, mfp) dari sumber ke detektor.

Pendekatan pertama adalah untuk material dengan nomor atom tinggi, polinomial yang sesuai berbentuk :

$$B(m|\bar{r} - \bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^{4} \sum_{i=0}^{3} C^{ij} \left(m|\bar{r} - \bar{r}'|\right)^{i} (E)^{j} \qquad (2.10a)$$

dan untuk material dengan nomor atom rendah mempunyai bentuk

$$B(m|\bar{r} - \bar{r}'|, E) = \sum_{j=0}^{4} \sum_{i=0}^{3} C^{ij} \left(m|\bar{r} - \bar{r}'|\right)^{i} \left(\frac{1}{E}\right)^{j} \qquad (2.10b)$$

dengan C^{ij} adalah koefisien perluasan.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Metode faktor pertumbuhan kedua adalah pendekatan progresi geometri. Metode ini memberikan hasil yang lebih teliti. Pendekatan faktor pertumbuhan tersebut:

$$B(X,E) = 1 + (b-1)\frac{K^X - 1}{K-1} \quad ;(K \neq 1)$$
$$= 1 + (b-1)X \quad ;(K = 1) \tag{2.11a}$$

$$K(X) = cX^a + d\,\frac{tanh(X / X_{k-2}) - tanh(-2)}{1 - tanh(-2)} \tag{2.11b}$$

dengan X adalah jarak sumber dengan detektor dalam satuan jarak bebas rata-rata medium (mfp), b adalah nilai faktor pertumbuhan pada 1 mfp dan K menyatakan penggandaan dosis foton per mfp penembusan. Parameter a, c, d dan X_k adalah konstanta fitting dan berubah terhadap energi. Bentuk yang sedikit berbeda, persamaan (2.11b) dapat digunakan untuk penembusan yang lebih besar dari 40 mfp.

2.5. Taksiran Dosis

Modul QADS menghitung dosis pada detektor untuk masing-masing group energi j yang telah dirubah menjadi bentuk diskrit dengan mengikuti bentuk yang ditentukan dari persamaan (2.9)

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$D_j = \sum_i K_j \frac{S_{ij}}{4\pi R_i^2} exp\left[-\sum_k \left(\mu_j t\right)_k\right] B_{jk} \tag{2.12}$$

dengan

j : indeks group energi

i : indeks titik sumber

k : indeks daerah

K : faktor konversi fluks ke dosis (rad/unit fluks)

S : kuat sumber radiasi gamma (foton/detik)

R : jarak dari titik sumber ke detektor (cm)

B : dosis faktor pertumbuhan

μ : total koefisien atenuasi (cm^{-1})

t : jarak zone penembusan (cm)

Indeks i digunakan untuk menggambarkan sumber dengan lengkap. Sumber terpecah menjadi sel mesh dengan masing-masing mesh dianggap seperti titik-titik sumber. Energi dengan indeks j dianggap seperti itu. Energi sumber diasumsikan sebagai nilai pada titik tengah dari energi ke-j atau selang grup. Semua konstanta yang ada hubungannya adalah kemudian ditentukan nilainya pada titik j dalam energi. Total dosis diperoleh dari penjumlahan masing-masing energi sumber (Foderado, 1968).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.6. Perisai Radiasi Gamma

Sinar gamma adalah radiasi elektromagnetik eka energi yang dipancarkan dari inti atom tereksitasi yang mengikuti proses peluruhan radioaktif, sebagai suatu cara membuang energi eksitasi untuk menuju ke tingkat dasarnya (Wiryosimin, 1995).

Sebagai ketentuan umum keselamatan radiasi, dengan sendirinya pada permasalahan perhitungan perisai radiasi, dosimetri dan penilaian bahaya radiasi, setiap pemancaran positron harus dikaitkan dengan terbentuknya radiasi gamma.

Untuk berkas radiasi sempit dan sejajar, berkurangnya fluks radiasi primer ϕp setelah melintasi perisai setebal x, mengikuti persamaan (Wiryosimin, 1995) :

$$\phi p(x)=\phi p(0)e^{-\mu x} \qquad (2.13)$$

bila $\phi p(x)$ menyatakan fluks radiasi primer sesudah melintasi perisai setebal x, $\phi p(0)$ melambangkan fluks radiasi primer di titik P sebelum ada perisai, dan μ adalah koefisien pengurangan total. Sedangkan fluks radiasi adalah jumlah rata-rata zarah dN(foton, sinar gamma atau sinar-X) yang menembus bidang dA yang tegaklurus pada arah lintasan zarah selama selang waktu dt tertentu, dilambangkan sebagai :

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$\phi = \frac{dN}{dA\,dt}$$

Tetapi hasil yang diperoleh dari pengukuran secara eksperimen, ternyata dosis radiasinya lebih besar dari perhitungan pada persamaan (2.13). Hal ini disebabkan oleh adanya radiasi hamburan yang terdeteksi. Untuk itu penelitian ini akan menggunakan program komputer QADS, dengan metode Kernel titik yang lebih akurat (Broadhead, 1990).

Sumber radiasi yang digunakan dalam percobaan ini adalah *stainless-steel* yang mempunyai tipe 304 (SS-304). Dan SS-304 ini secara mikrostruktur dikategorikan sebagai austenit yang secara umum merupakan campuran terutama dari besi dengan chromium, nickel dan sedikit karbon. (Van Vlack, 1992).

Komposisi kimia untuk SS-304 adalah 0,08% karbon (C), 2,00% mangaan (Mn), 0,45% fosfor (P), 0,030% sulfur (S), 1,00% silikon (Si), 18,00/20,00 % kromium (Cr), 8,00/10,50 % nikel (Ni) dan sisanya adalah besi (Fe) (Budinski, 1992). Namun dalam program komputer QADS ini, pustaka komposisi komponen pembentuk SS-304 adalah Cr, Mn, Fe dan Ni.

Komponen-komponen pembentuk SS yang telah teriradiasi dapat mempunyai radioaktivitas terutama radiasi sinar gamma yang berjangkauan jauh. Seperti terlihat dalam tabel berikut ini (Wiryosimin, 1995):

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Tabel 2.1. Pancaran spesifik sinar-γ dinyatakan dalam Satuan R/jam per curie pada jarak 1 m

Nuklida	Γ
Cr-51	0,02
Fe-59	0,64
Mn-52	1,86
Mn-54	0,47
Mn-56	0,83
Ni-95	0,31

Dikutip dari *The health physics and radiological health handbook, Nucleon Lectern Associates*, 1984

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)