

PENGARUH TINGGI CEROBONG TERHADAP DOSIS AWAN GAMMA DARI PELEPASAN RUTIN RADIONUKLIDA PLTN

Yarianto S Budi Susilo*)

Abstrak

PENGARUH TINGGI CEROBONG TERHADAP DOSIS AWAN GAMMA DARI PELEPASAN RUTIN RADIONUKLIDA PLTN. Tinggi cerobong mempunyai peran penting dalam menentukan pola penyebaran radionuklida di udara pada pelepasan rutin. Optimasi tinggi cerobong suatu fasilitas nuklir dapat dilakukan dengan simulasi perhitungan dosis awan gamma dari berbagai ketinggian titik pelepasan. Data meteorologi yang digunakan sebagai masukan berupa data dari calon tapak PLTN di Ujung Lemahabang. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan paket program komputer PC CREAM, dengan Modul PLUME. Untuk perhitungan awan gamma digunakan model yang umum dipakai, yaitu model *finite cloud*. Semakin tinggi titik pelepasan (tinggi cerobong) maka semakin kecil konsentrasi radionuklida di tingkat permukaan, demikian juga tingkat dosis awan gammanya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dosis awan gamma maksimum dari pelepasan radionuklida untuk PLTN tunggal PWR 900MWe untuk tinggi cerobong 20 m, 60 m dan 100 m berturut-turut adalah $2,2 \cdot 10^{-4}$; $8,9 \cdot 10^{-8}$ dan $5,4 \cdot 10^{-8}$ mSv/tahun. Dosis ini masih jauh di bawah batas ambang, yaitu 5 mSv./tahun.

Abstract

INFLUENCE OF HEIGHT OF STACK TO THE GAMMA CLOUD DOSE AT NPP ROUTINE RELEASE. Height of stack will contribute to determine pattern of radionuclides dispersion in atmosphere at routine release. Optimization of high level of stack of nuclear facility can be determined by simulation of gamma cloud dose at several high level of release point. Meteorological data input are used Ujung Lemahabang site data. Calculation is performed by PC CREAM with PLUME Module. Gamma cloud calculation is used finite cloud model that is general model. The higher of release point will induce less activity as well as gamma cloud dose at near ground level. The calculation results show that maximum gamma cloud dose of radionuclides released by NPP of 900 MWe PWR type for height of stack 20, 60, and 100 meter are $2,2 \cdot 10^{-4}$; $8,9 \cdot 10^{-8}$ dan $5,4 \cdot 10^{-8}$ mSv/year respectively. The doses are still under limited dose of 5 mSv./year.

*) Bidang Penerapan Sistem Energi P2EN - BATAN

I. PENDAHULUAN

Radioaktivitas lingkungan adalah salah satu isu utama dampak lingkungan dalam suatu proyek fasilitas nuklir. Sebelum dilakukan pembangunan fasilitas nuklir, maka perlu terlebih dahulu disusun parameter desain sehingga akan dicapai tingkat keselamatan yang paling *reasonable*. Salah satu aspek penting yang harus dikaji sebagai persyaratan internasional maupun nasional pada tahapan *siting* adalah penyebaran radionuklida di lingkungan. Pada kondisi operasi normal dari suatu PLTN, radionuklida yang terlepas ke atmosfer merupakan bagian terpenting dibanding radionuklida yang terlepas ke media lain. Penyebaran radionuklida melalui media atmosfer, sangat dipengaruhi oleh kondisi meteorologi dan topografi setempat yang merupakan parameter alamiah. Namun penyebaran radionuklida di atmosfer juga akan dipengaruhi oleh parameter yang diintroduksi oleh manusia, seperti keadaan tataruang di sekitar PLTN dan desain cerobong sebagai titik awal lepasnya radionuklida ke atmosfer.

Tinggi cerobong mempunyai peran dalam pola penyebaran radionuklida di udara, yang pada akhirnya akan mempengaruhi tingkat radioaktivitas lingkungan dan dosis radiasi yang akan diterima oleh penduduk di sekitar fasilitas nuklir tersebut. Untuk keperluan rancang bangun PLTN, tinggi cerobong perlu ditentukan, dengan pertimbangan utama keselamatan masyarakat di sekitar PLTN atau fasilitas nuklir. Selain itu faktor ekonomi juga menjadi pertimbangan rancang bangun tersebut. Indikator keselamatan penduduk dapat dilihat dari dosis yang akan diterima masyarakat dan dibandingkan dengan ketentuan proteksi radiasi.

Dalam kondisi operasi normal, zat radioaktif hasil fisi maupun aktivasi neutron khususnya gas mulia, akan terlepas ke lingkungan melalui cerobong. Jenis dan jumlah radionuklida yang terlepas ke lingkungan sangat bergantung pada teknologi PLTN dan kapasitasnya, serta jenis radionuklida itu sendiri. Gas mulia seperti xenon dan kripton akan lebih mudah terlepas ke lingkungan dibanding gas lain dan partikulat. Jumlah radionuklida yang terlepas ke lingkungan akan berkorelasi dengan inventori (*Fission Product Inventory*). Data masukan untuk lepasan radionuklida diambil dari data Newjec^[6], untuk PWR 900 MWe. Lepasnya radionuklida diasumsikan hanya berasal dari:

- a) Tangki peluruhan
- b) Sistem ventilasi pengungkung reaktor
- c) Sistem ventilasi gedung *auxiliary*
- d) Lepasannya radionuklida dari pengungkung reaktor ketika *shutdown*

Efluen radioaktif yang keluar dari cerobong mempunyai kecepatan vertikal tertentu dan akan mempengaruhi tinggi pelepasan karena adanya *plume rise* (Δh) ini, sehingga akan merubah tinggi efektif cerobong. Tinggi pelepasan radioaktif akan mempengaruhi pola penyebaran radionuklida di atmosfer, yang disebabkan oleh beberapa hal sebagai berikut:

- a) Kecepatan angin akan berubah terhadap ketinggian
- b) Dalam pendekatan statistik dengan distribusi normal (gaussian), konsentrasi efluen akan semakin menipis dengan bertambahnya jarak dari garis tengah plume, sehingga akan berpengaruh terhadap konsentrasi di permukaan tanah.
- c) Adanya batasan ruang dispersi, yaitu *mixing layer height* (MLH) dan permukaan tanah, sehingga tinggi pelepasan akan mempengaruhi pola penyebaran efluen.

Dalam makalah ini, analisis lebih dititikberatkan pada optimasi tinggi cerobong, sehingga jumlah lepasan radionuklida yang diasumsikan diharapkan tidak akan mempengaruhi hasil. Optimasi tinggi cerobong didasarkan pada hasil perhitungan dosis awan gamma, karena sampai dengan ketinggian 100 m, dosis radiasi akan lebih didominasi oleh dosis awan gamma dibanding dosis inhalasi, dan dosis ingesti. Hal ini berdasarkan catatan penulis pada perhitungan dosis radiasi menggunakan PC CREAM modul *Assessor*, yang menunjukkan dosis awan radiasi berkisar 20.000 kali dosis inhalasi.

II. DASAR TEORI

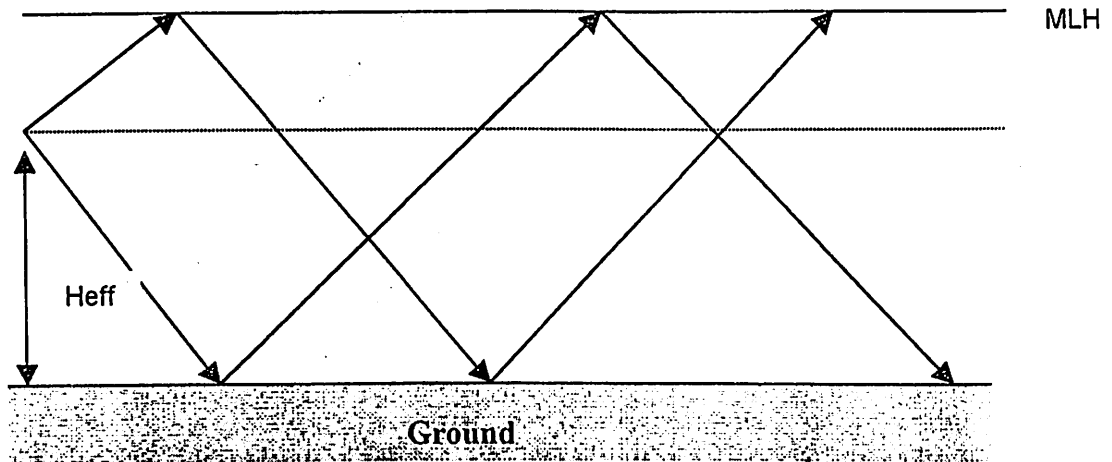
Efluen radioaktif bilamana terlepas ke atmosfer melalui cerobong, akan segera terdifusi dan membentuk suatu *plume* dengan suatu pola dispersi tertentu. Tinggi pelepasan/cerobong tersebut akan mempengaruhi pola dispersi di atmosfer, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan *Gaussian Plume Model*^[2].

$$\chi(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

- $\chi(x,y,z)$: konsentrasi zat radioaktif di udara (Bq/m^3), pada koordinat x, y, z.
- x : jarak downwind (m)
- y : jarak crosswind (m)
- z : ketinggian (m)
- Q : laju lepasan (Bqs^{-1})
- u : kecepatan angin (ms^{-1})
- σ_y, σ_z : parameter difusi (m) sebagai fungsi jarak *downwind* x dan stabilitas atmosfer.
- h : tinggi efektif lepasan (m)

Radionuklida yang terlepas pada suatu ketinggian tertentu sebagian akan mengalami dispersi ke arah permukaan tanah (*ground*) dan kemudian akan dipantulkan kembali ke atmosfer. Demikian juga dengan sebagian radionuklida yang terdispersi ke atas, akan dipantulkan kembali oleh lapisan MLH. Hal ini tentu akan menambah tingkat radioaktivitas di permukaan. Model percampuran konsentrasi awan (*cloud concentration*) ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Konsentrasi Awan yang Dibatasi oleh Permukaan Tanah dan Lapisan Percampuran Atas (MLH).

Tinggi batas lapisan percampuran di atmosfer bervariasi, tergantung pada gradien temperatur. Material yang terdispersi akan terjebak dalam ruang antara permukaan tanah dan MLH. Dengan memperhitungkan kedua batasan tersebut, menurut Clark ^[5] konsentrasi radionuklida pada suatu titik memenuhi persamaan berikut:

$$\chi(x, z) = \frac{Q_0}{2\pi x \sqrt{2\pi} u} \sum_{s=0}^{\infty} \exp\left[-\frac{(2sz_{max} \pm h \pm z)^2}{2\sigma_z^2}\right] \dots\dots\dots (2)$$

$s = 0, 1, 2, 3 \dots$ (jika $s=0$, maka hanya z bernilai positif yang dipakai)

Untuk memprakirakan radiasi eksternal dari plume, pertama harus dihitung dahulu dosis absorpsi di udara kemudian dikonversi ke dalam dosis ekuivalen.

Pada model semi infinit, konsentrasi radionuklida dalam suatu volume udara dianggap seragam. Jumlah energi yang diserap oleh suatu elemen dalam awan sama

dengan energi yang dipancarkan oleh elemen yang sama, sehingga dapat dituliskan seperti persamaan (3).

$$D_\gamma = k_1 \chi \sum_{j=1}^n I_j E_j \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

- D_γ : Laju dosis absorpsi dalam Gy/tahun
- χ : Konsentrasi radionuklida di udara (Bq/m³)
- E_j : Energi foton (elektron) j (MeV)
- I_j : Fraksi foton (elektron) berenergi E_j
- n : Jumlah kategori foton (elektron) berdasarkan energi
- k_1 : $2 \cdot 10^{-6}$ untuk foton dan $4.6 \cdot 10^{-6}$ untuk elektron (dalam Gy/tahun per MeVm⁻³s⁻¹)

Untuk energi foton yang lebih besar dari 20 keV, maka untuk menghindari besarnya kesalahan (*error*), digunakan model *finite cloud*. Fluks foton pada jarak tertentu dari titik sumber mempunyai dua komponen, yaitu flux tak terhambur (*unscattered*) dan fluks terhambur (*scattered*). Fluks efektif foton pada jarak r dari suatu titik sumber dapat dihitung dengan *multiple scattering build-up factor* dengan persamaan (4).

$$F = \frac{qB(E_\gamma \mu r) e^{-\mu r}}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (4)$$

Dimana:

- F : Fluks efektif (γm⁻²s⁻¹)
- q : kekuatan sumber (γs⁻¹)
- r : jarak dengan sumber (m)
- B : Energi deposition build-up factor
- E_γ : Energi foton awal.

Sehingga untuk awan dengan konsentrasi χ , maka fluks foton menjadi:

$$F_c = \int_v \frac{\chi B(E_\gamma \mu r) e^{-\mu r}}{4\pi r^2} dV' \dots\dots\dots (5)$$

Konversi dosis absorpsi dari energi awal foton dan fluks efektif mengacu pada tabel yang diberikan oleh *Commission of the European Communities* ^[5].

Dosis efektif ekuivalen dapat dihitung berdasarkan persamaan (6).

$$H_E = \sum_T W_T H_T \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

- W_T :Faktor bobot untuk jaringan T
- H_T :Dosis ekivalen untuk jaringan T

Laju dosis ekuivalen di kulit untuk fluks elektron dalam lapisan 70 μ m adalah:

$$H_{\mu} = 0.5e^{-\mu l} D_{\mu} QF \dots\dots\dots (7)$$

Dimana:

- H_{μ} : Laju dosis ekuivalen untuk kulit (Sv/tahun)
- QF : Faktor kualitas untuk radiasi β
- μ : Koefisien absorpsi dalam jaringan (m^{-1})
- l : Ketebalan lapisan epidermal = $7 \cdot 10^{-5}$ m.

Penipisan konsentrasi plume dapat terjadi sebagai akibat deposisi kering dan deposisi basah. Deposisi kering tergantung pada sifat material itu sendiri serta keadaan lingkungan atmosfer, dan dapat diestimasi dengan menggunakan konsep kecepatan deposisi V_g . Kecepatan deposisi ini didefinisikan sebagai rasio antara material yang terdeposisi pada permukaan per satuan waktu terhadap konsentrasi pada tingkat permukaan.

Faktor deposisi kering ini dapat dituliskan seperti pada persamaan (8).

$$f_F = \exp \left[- \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{V_g}{U} \int_0^x \exp \left(- \frac{h^2}{2\sigma_z^2} \right) \frac{dx}{\sigma_z} \right] \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

f_r : faktor deposisi kering

V_g : kecepatan deposisi, dan besarnya adalah:

0.002 m/s untuk partikel < 4 μ m

0.04 m/s untuk yodium (elemental)

0.0002 untuk yodium dalam bentuk senyawa organik

Konsentrasi udara, dalam hal ini deposisi basah dapat terjadi sebagai akibat adanya hujan. Faktor koreksi penipisan plume dapat dituliskan dalam persamaan (9).

$$f_w = \exp\left(-\Lambda \frac{x}{u}\right) \dots\dots\dots (9)$$

Di mana Λ merupakan koefisien pencucian (s^{-1}) yang besarnya tergantung pada curah hujan dan karakteristik material.

III. METODE

Perhitungan aktivitas konsentrasi dan dosis awan gamma dari berbagai isotop dilakukan dengan menggunakan paket program komputer (*software*) PC CREAM modul PLUME. Module PLUME ini khusus dipergunakan untuk mengestimasi dispersi atmosferik untuk suatu pelepasan radionuklida secara kontinyu. Data masukan berupa data statistik meteorologi selama satu tahun, yang merupakan prosentase kejadian angin bertiup ke arah i dan kategori stabilitas j. Stabilitas dibagi dalam 6 kelas, yaitu A (sangat labil), B (cukup labil), C (agak labil), D (netral) E (agak stabil) F (stabil) serta untuk kategori C (hujan) dan D (hujan). Data meteorologi berupa file teks, dan dipersiapkan sebelum program dijalankan.

Lepasan radionuklida dimasukkan melalui program antarmuka (*interface*) yang telah disediakan. Tinggi efektif lepasan disimulasikan untuk 3 ketinggian, yaitu 20, 60 dan 100 meter.

IV. DATA MASUKAN

Data masukan berupa data meteorologi, jenis dan jumlah pelepasan, tingkat kekasaran permukaan (*roughness*). Tabel 1 dan Tabel 2, secara berurutan adalah data meteorologi dan pelepasan radionuklida. Selain itu juga dimasukkan data mengenai jumlah jarak yang ditinjau (*point of interest*) yang meliputi 0.3, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 20.0 dan 50.0 km. Kekasaran permukaan diasumsikan 0.3 sesuai rekomendasi dalam manual PC CREAM untuk daerah perkebunan atau hutan.

Tabel 1. Frekuensi Arah dan stabilitas angin, dalam persen

Arah	Kategori stabilitas								Jumlah
	A	B	C	D	E	F	C(hujan)	D(hujan)	
N	5.12E-02	8.81E-03	5.10E-03	3.37E-02	4.02E-03	3.09E-04	9.28E-04	4.33E-03	1.08E-01
NNE	3.57E-02	6.18E-03	3.71E-03	3.37E-02	6.18E-03	0.00E+00	6.18E-04	3.40E-03	8.95E-02
NE	2.44E-02	5.57E-03	6.34E-03	4.61E-02	8.04E-03	3.09E-04	1.55E-03	3.87E-03	9.62E-02
ENE	2.94E-02	3.56E-03	5.41E-03	3.03E-02	5.88E-03	3.09E-04	9.28E-04	4.17E-03	7.99E-02
E	1.45E-02	3.09E-03	2.94E-03	1.53E-02	1.86E-03	0.00E+00	1.55E-04	1.70E-03	3.96E-02
ESE	5.72E-03	1.24E-03	1.39E-03	5.88E-03	1.70E-03	3.09E-04	0.00E+00	1.55E-04	1.64E-02
SE	1.70E-03	9.28E-04	9.28E-04	6.80E-03	2.32E-03	0.00E+00	0.00E+00	1.55E-04	1.28E-02
SSE	1.86E-03	6.18E-04	4.64E-04	9.74E-03	3.09E-03	0.00E+00	1.55E-04	0.00E+00	1.59E-02
S	1.00E-02	3.56E-03	4.48E-03	3.42E-02	8.81E-03	1.55E-04	7.73E-04	2.01E-03	6.40E-02
SSW	1.53E-02	3.87E-03	4.79E-03	3.56E-02	5.57E-03	3.09E-04	3.09E-04	7.73E-04	6.65E-02
SW	1.21E-02	4.17E-03	5.10E-03	1.96E-02	2.16E-03	1.55E-04	0.00E+00	7.73E-04	4.41E-02
WSW	2.21E-02	1.08E-02	8.35E-03	2.43E-02	2.63E-03	6.18E-04	3.09E-04	6.18E-04	6.97E-02
W	3.71E-02	7.88E-03	6.80E-03	2.04E-02	2.63E-03	6.18E-04	1.55E-04	1.08E-03	7.67E-02
WNW	3.03E-02	5.10E-03	3.56E-03	1.16E-02	1.08E-03	1.55E-04	1.55E-04	1.70E-03	5.36E-02
NW	3.23E-02	7.88E-03	4.17E-03	1.31E-02	2.16E-03	1.55E-04	6.18E-04	1.70E-03	6.22E-02
NNW	4.81E-02	1.02E-02	7.88E-03	2.95E-02	4.48E-03	1.55E-04	3.09E-04	3.87E-03	1.05E-01

Sumber: Data meteorologi jam-an Newjec (Agustus1994- Juli1995) yang diolah dengan paket program SERU ver 1.

Catatan :

- N : North (Utara)
- NNE : North – North East (Utara Timur Laut)
- NE : North East (Timur Laut)
- ENE : East – North East (Timur – Timur Laut)
- E : East
- ESE : East – South East (Timur – Tenggara)
- SE : South East (Tenggara)
- SSE : South – South East (Selatan – Tenggara)
- S : South (Selatan)
- SSW : South – South West (Selatan – Barat Daya)
- SW : South West (Barat Daya)
- WSW : West – South West (Barat- Barat Daya)
- W : West (Barat)
- WNW : West North West (Barat – Barat Laut)
- NW : North West (Barat Laut)
- NNW : North – North West (Utara – Barat Laut)

Tabel 2. Pelepasan Radionuklida, Bq/tahun

Nuklida	Waktu paro	Lepasan, Bq/tahun
Kr-85 m	4.48 jam	2.00E+11
Kr-85	10.72 tahun	1.88E+13
Kr-87	76.3 menit	1.20E+11
Kr-88	2.84 jam	3.50E+11
Xe-131 m	11.84 hari	9.13E+11
Xe-133 m	2.19 hari	3.13E+11
Xe-133	5.245 hari	2.63E+13
Xe-135 m	15.36 menit	1.14E+10
Xe-135	9.11 jam	3.00E+11
Xe-138	14.13 menit	5.61E+11
I-131	8.040 hari	9.63E+08
I-133	20.8 jam	2.88E+09

Sumber: Newjec, Topical Report on Dose Assessment, 1996

Pelepasan radionuklida diasumsikan berasal dari PWR 900 MWe dari sumber-sumber tangki peluruhan, sistem ventilasi gedung reaktor dan gedung *auxiliary*. Dalam makalah ini, data lepasan radionuklida bukan dari PLTN desain terbaru, dengan pertimbangan PLTN desain terbaru dipastikan lebih aman (pendekatan konservatif). Kecepatan deposisi untuk partikel atau elemen iodin diasumsikan 0.04 m/s serta koefisien pencucian diasumsikan 0.0004 s^{-1} .

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Aktivitas total untuk tinggi cerobong 20 m, 60 m dan 100 m, masing masing 4.55, 1.07, dan 0.286 Bq/m^3 , sedangkan dosis awan gamma masing-masing $2.20\text{E-}07$, $8.99\text{E-}08$, dan $5.42\text{E-}08 \text{ Sv/tahun}$. Kontributor aktivitas terbesar adalah ^{133}Xe (Tabel 4) untuk semua ketinggian, hal ini sesuai dengan jumlah radionuklida yang terlepas ke lingkungan (Tabel 2). Demikian juga halnya dengan kontributor dosis awan gamma terbesar adalah ^{133}Xe .

Aktivitas dan dosis awan gamma dari ^{135}Xe dan ^{133}I di permukaan pada berbagai ketinggian titik pelepasan yang disimulasikan dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3 secara berturutan. Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3 dapat dilihat bahwa konsentrasi radionuklida semakin berkurang dengan bertambahnya jarak, baik untuk ^{135}Xe maupun ^{133}I . Demikian juga halnya dengan dosis awan gamma (Gambar 4 dan 5), akan berkurang dengan bertambahnya jarak. Namun karena keterbatasan paket program ini, tidak dapat

dilihat puncak (*peak*), yang diperkirakan terjadi pada jarak kurang dari 300 meter dari cerobong, sedangkan paket program ini hanya dapat menghitung aktivitas dan dosis awan gamma untuk jarak lebih besar atau sama dengan 300 meter. Dalam perhitungan yang dilakukan dengan paket program SERU^[9], puncak aktivitas terjadi pada jarak 200 meter dari cerobong.

Semakin tinggi titik pelepasan (tinggi cerobong) maka semakin kecil aktivitas di tingkat permukaan. Aktivitas untuk ¹³³I pada arah SSW (arah angin dominan yang menuju daratan) dan jarak 300 m (aktivitas dan dosis awan gamma maksimum) untuk ketinggian lepasan 20, 60 dan 100 m adalah berturut turut $2,5 \cdot 10^{-4}$; $6,3 \cdot 10^{-5}$; dan $1,7 \cdot 10^{-5}$ Bq/m³. Sedangkan untuk ¹³⁵Xe masing-masing adalah $2,8 \cdot 10^{-2}$; $6,6 \cdot 10^{-3}$; dan $1,8 \cdot 10^{-3}$ Bq/m³. Sebagai perbandingan dapat dilihat Tabel 3, yang merupakan hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan paket program Seru, untuk radionuklida ¹³¹I^[10].

Tabel 3. Perbandingan hasil perhitungan aktivitas ¹³¹I menggunakan paket program SERU dan PC CREAM pada sektor arah S, untuk tinggi cerobong 60 meter

Deskripsi	Paket Program SERU ^[10]	PC CREAM / PLUME
Laju pelepasan (Bq/tahun)	$3,7 \cdot 10^{11}$	$9,63 \cdot 10^8$
Jarak (meter)	300	300
Aktivitas (Bq/m ³)	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Aktivitas (Bq/m ³), jika dikonversi untuk laju pelepasan yang sama dengan masukan untuk perhitungan paket program SERU	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Deviasi		33 %

Perbedaan hasil perhitungan pada Tabel 3 disebabkan hal-hal berikut:

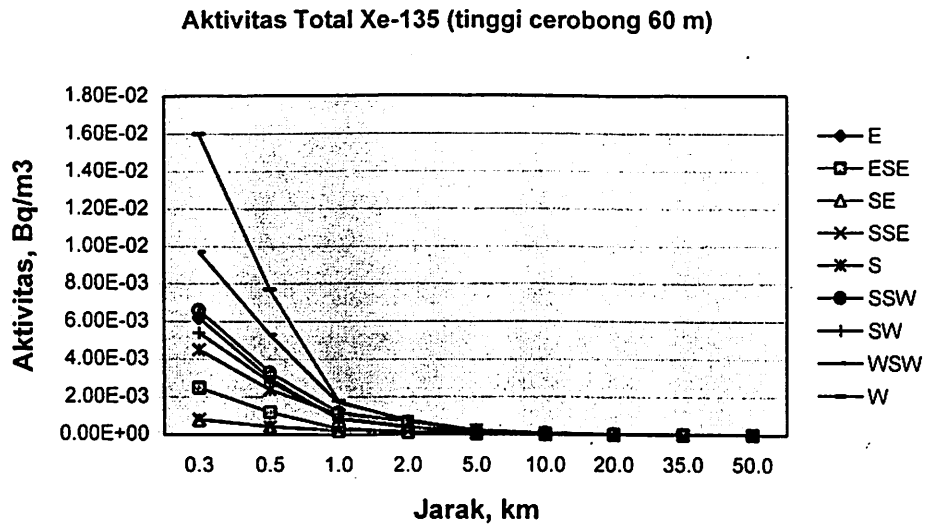
1. Pada perhitungan dengan paket program SERU, perhitungan statistik meteorologi menggunakan 4 join frekuensi (yang mencakup stabilitas udara, kecepatan angin, arah angin dan curah hujan), sedangkan perhitungan dengan paket program PC CREAM hanya menggunakan 2 join frekuensi (stabilitas dan arah angin).
2. Pada perhitungan dengan paket program SERU, tinggi cerobong efektif bersifat dinamis sebagai fungsi jarak, sedangkan pada PC CREAM statis (bukan merupakan fungsi jarak).
3. Pada perhitungan dengan paket program SERU, koreksi *calm* diperhitungkan sedangkan pada PC CREAM tidak diperhitungkan.

Dosis awan gamma untuk ^{133}I pada sektor SSW yang dihitung untuk ketinggian pelepasan 20, 60 dan 100 m dan jarak 300 meter dari cerobong adalah berturut turut $1,5 \cdot 10^{-10}$; $6,5 \cdot 10^{-11}$; dan $4,3 \cdot 10^{-11}$ Bq/m³. Sedangkan untuk ^{135}Xe masing-masing adalah $6,9 \cdot 10^{-9}$, $3,0 \cdot 10^{-9}$ dan $1,8 \cdot 10^{-9}$ Sv/tahun.

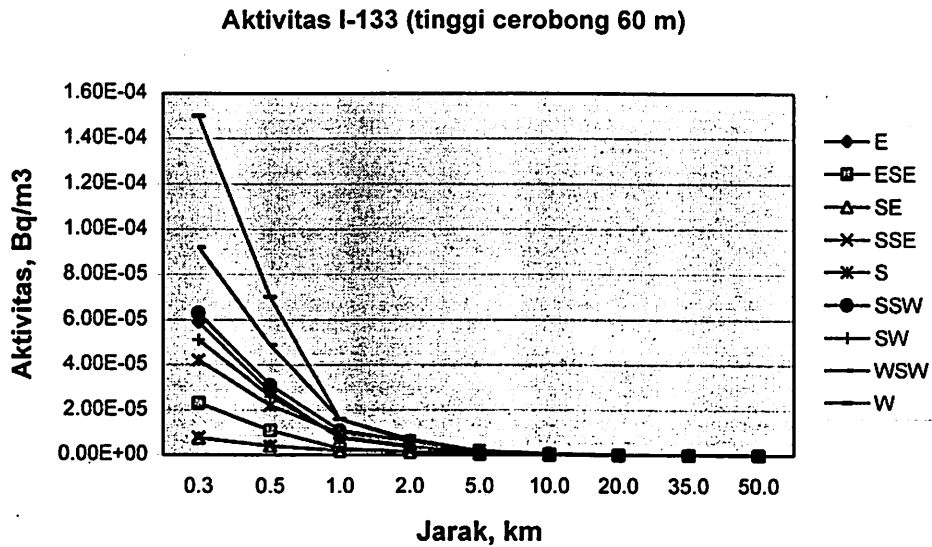
Berdasarkan data tersebut, nampak bahwa semakin tinggi titik pelepasan (cerobong) akan semakin kecil aktivitas konsentrasi dan dosis awan gamma yang diterima oleh penduduk, atau dengan kata lain semakin tinggi cerobong akan semakin baik. Namun jika dilihat dari besaran dosis radiasi yang diterima, maka untuk pelepasan rutin dan ketinggian cerobong 20 meter, kontribusi dosis awan gamma ($2,2 \cdot 10^{-4}$ mSv/tahun) masih jauh di bawah batas ambang, yaitu 5 mSv./tahun

Tabel 4. Aktivitas dan Dosis Awan Gamma untuk sektor SSW pada jarak 300 meter dari titik pelepasan.

Nuklida	Aktivitas (Bq/m ³)			Dosis Awan Gamma (Sv/th)		
	20 m	60 m	100 m	20 m	60 m	100 m
Kr- 85	1.80E+00	4.20E-01	1.10E-01	3.80E-09	1.60E-09	1.00E-09
Kr-85m	1.90E-02	4.40E-03	1.20E-03	3.00E-09	1.30E-09	7.40E-10
Kr-87	1.10E-02	2.60E-03	7.10E-04	8.00E-09	3.20E-09	2.20E-09
Kr-88	3.30E-02	7.70E-03	2.10E-03	5.70E-08	2.20E-08	1.60E-08
Xe-131 M	8.60E-02	2.00E-02	5.60E-03	6.80E-10	2.40E-10	1.00E-10
Xe-133 m	2.90E-02	7.00E-03	1.90E-03	8.20E-10	3.40E-10	1.90E-10
Xe-135 M	9.50E-04	2.20E-04	6.10E-05	4.00E-10	1.70E-10	1.10E-10
Xe-133	2.50E+00	5.90E-01	1.60E-01	9.10E-08	3.80E-08	1.80E-08
Xe-138	4.60E-02	1.10E-02	3.00E-03	4.80E-08	2.00E-08	1.40E-08
I-131	8.10E-05	2.10E-05	5.70E-06	3.10E-11	1.40E-11	8.70E-12
I-133	2.50E-04	6.30E-05	1.70E-05	1.50E-10	6.50E-11	4.30E-11
Xe-135	2.80E-02	6.60E-03	1.80E-03	6.90E-09	3.00E-09	1.80E-09
Kr-85: Induk Kr-85 M	1.30E-09	3.50E-10	8.70E-11	2.70E-18	9.70E-19	5.50E-19
Xe-133: Induk Xe-133 M	7.20E-06	2.00E-06	4.80E-07	2.60E-13	9.50E-14	4.00E-14
Xe-135: Induk Xe-135 M	3.30E-06	9.20E-07	2.30E-07	7.90E-13	3.00E-13	1.60E-13
TOTAL	4.55E+00	1.07E+00	2.86E-01	2.20E-07	8.99E-08	5.42E-08

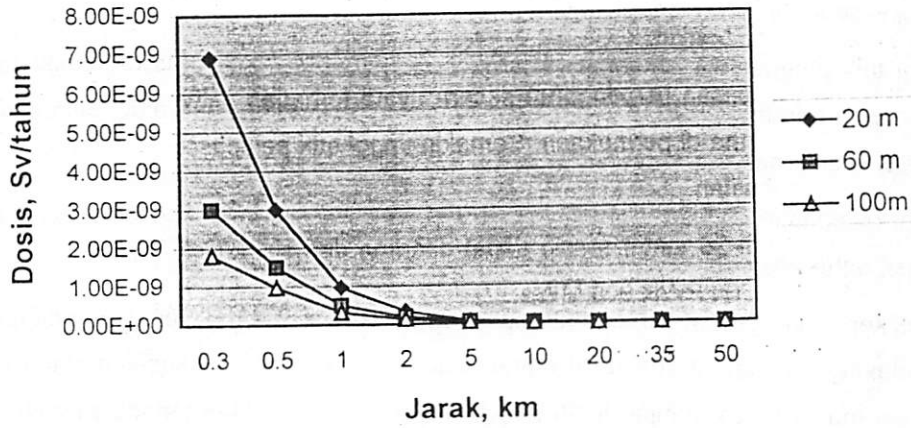


Gambar 2. Aktivitas Total Xe-135 Pada Berbagai Sektor Sebagai Fungsi Jarak Untuk Tinggi Cerobong 60 meter



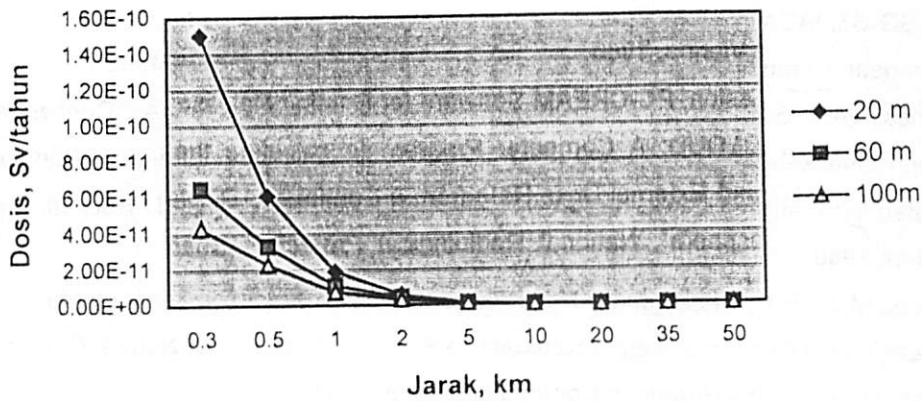
Gambar 3. Aktivitas I-133 Pada Berbagai Sektor Sebagai Fungsi Jarak Untuk Tinggi Cerobong 60 meter

Dosis Awan Gamma Xe-135



Gambar 4. Dosis Awan Gamma Xe-135 Sebagai Fungsi Jarak Pada Berbagai Tinggi Cerobong

Dosis Awan Gamma I-133



Gambar 5. Dosis Awan Gamma I-133 Sebagai Fungsi Jarak Pada Berbagai Tinggi Cerobong

VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan di atas, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Tinggi titik pelepasan berpengaruh secara nyata terhadap aktivitas radionuklida dan dosis awan gamma di permukaan. Semakin tinggi titik pelepasan, akan semakin baik dari sisi keselamatan.
2. Tinggi pelepasan 20 meter masih dapat diterima dari sisi keselamatan atau proteksi radiasi, untuk PLTN PWR 900 MWe.
3. Untuk keperluan desain cerobong, tanpa memperhatikan anomali lepasan radionuklida (kecelakaan), tinggi cerobong 20 meter sudah diterima dari sisi keselamatan radiasi. Namun masih harus ditinjau lebih lanjut mengenai probabilitas terjadinya calm yang diikuti fumigasi pada ketinggian 20 meter, serta tinggi bangunan di sekeliling reaktor.

VII. DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, *Generic Models and Parameters for Assessing the Environmental Transfer of Radionuclides from Routine Releases*, Vienna, 1982
2. IAEA, *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*, IAEA Safety Guides No 50-SG-S3, IAEA, Vienna, 1980
3. European Commission, *PC-CREAM Software for Routine Release*, 1998.
4. Jones, JA., "ESCLOUD: A Computer Program to calculate the Air Concentration, Deposition Rate and External Dose Rate from a Continuous Discharge of Radioactive Material to Atmosphere", National Radiological Protection Board, Harwell, Didcot, Oxon, 1980.
5. Clark, M.J. , R.H. Clarke and P.D. Grimwood, *Methodology for Evaluating the Radiological Consequences of Radioactive Effluents Released in Normal Operations*, Commission of the European Communities, Paris 1979.
7. IAEA, "ORPGUIDE: Occupational Radiation Protection Guide", IAEA Safety Series, Vienna, 2000
8. IAEA, *Generic Assessment Procedures or Determining Protective Actions During a Reactor Accident*, IAEA-Tecdoc-955,1997

9. Newjec, Topical Report on Dose Assessment Step-3, Newjec, Jakarta, 1996.
10. Yarianto S Budi Susilo dkk, "Meteorological Monitoring, Dispersion of Radioactive Effluent into the Atmosphere and Population Risk Analysis", Jurnal Pengembangan Energi Nuklir Volume 2 Nomor 2, Jakarta, 2000
11. Yarianto S Budi Susilo, " Simulasi Penyebaran Efluen Radioaktif Melalui Udara", Program Studi Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Indonesia, Jakarta, 1999