

**KONTRIBUSI JALUR PAPARAN TERHADAP DOSIS RADIASI PADA
KONDISI OPERASI NORMAL PLTN 2 x 1000 MWe**

Yarianto Sugeng Budi Susilo *)

ABSTRAK

Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Untuk Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe. Rencana Pembangunan PLTN di calon Tapak PLTN Ujung Lemahabang diperkirakan akan menimbulkan dampak kepada masyarakat berupa paparan radiasi, baik internal maupun eksternal. Dalam pengoperasian secara normal, PLTN akan mengemisikan ke udara sebagian kecil gas dan partikulat yang bersifat radioaktif. Jalur paparan utama ke manusia adalah melalui inhalasi, resuspensi, *cloudshine*, *groundshine* dan ingesti. Metode yang dipakai dalam penelitian ini dengan menggunakan metode komputasi paket program PC CREAM. Masukan data yang digunakan mencakup data meteorologi, kependudukan, pertanian dan peternakan tapak PLTN Ujung Lemahabang. Hasil penelitian menunjukkan yang paling dominan memberikan kontribusi dosis dengan kondisi operasi normal PLTN dalam jangka waktu satu tahun pertama adalah melalui jalur awan gamma dan beta, kedua melalui jalur ingesti dan ketiga melalui jalur inhalasi. Untuk jalur resuspensi dan paparan permukaan tanah tidak menyumbang dosis yang signifikan. Pada jarak 3 km dari tapak (di mana terdapat permukiman) dosis inhalasi, awan gamma dan beta, ingesti dan dosis total yang diintegrasikan selama 1 (satu) tahun secara berurutan adalah 6,5 μSv , 380 μSv , 19,2 μSv , dan 407 μSv .

ABSTRACT

Pathways Contribution to Radiation Dose for Normal Operation of NPP 2 x 1000 MWe. NPP project at Ujung Lemahabang site is predicted will affect to population of both internal and external radiation exposure. In normal operation condition, NPP will release a little amount of radioactive gases and particulates to atmosphere. Main pathways of radionuclides to the human body are inhalation, cloud shine, ground shine and ingestion. Method used in the research is computation using PC CREAM program package. Data input used a specific data of ULA NPP Site, including meteorology, demography distribution, farm production, and livestock production. The result of the research shows that gamma and beta cloud shine pathways will be the largest contributing of the total dose for a normal operation condition of NPP as long as 1 year duration. The second and lastly is ingestion and inhalation pathway, respectively. While resuspension and groundside contribute the total dose are not insignificantly. At 3 km distance from the site (where the residential is existing) the inhalation, cloud gamma and beta, ingestion and total doses integrated to 1 (one) year are 6,5 μSv , 376 μSv , 19,2 μSv , and 407 μSv respectively.

Kata kunci: jalur paparan, *committed dose*, model dispersi, atmosfer, radiasi eksternal, *plume*, elektron, operasi normal, PC CREAM

*) Staf Bidang Pengkajian Kelayakan Tapak PLTN – PPEN

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Hasil studi CADES menunjukkan bahwa PLTN pertama di Indonesia layak dioperasikan pada tahun 2016. Rencana pembangunan PLTN akan berlokasi Ujung Lemahabang, Desa Balong, Kecamatan Kembang, Kabupaten Jepara, Provinsi Jawa Tengah. Pada tahap pertama direncanakan akan dioperasikan 2 buah PLTN dengan kapasitas masing-masing 1000 MWe (2 x 1000 MWe).

Pengoperasian PLTN diperkirakan akan mengemisikan zat radioaktif yang berasal dari hasil fisi dan aktivasi neutron, meskipun dalam jumlah yang sangat terbatas [5]. Beberapa kegiatan PLTN yang berpotensi mengemisikan zat radioaktif ke atmosfer adalah *waste gas system, fuel handling, containment building purge, auxiliary containment ventilation, Building Ventilation, dan Air Ejector Exhaust* setelah melewati proses saringan^[8]

Lepasan bahan radioaktif ke atmosfer akan menyebabkan paparan pada manusia melalui beberapa jalur. Radionuklida dalam bentuk *airborne* dapat memberikan paparan melalui jalur iradiasi foton gamma dan elektron yang diemisikan sebagai hasil peluruhan radioaktif. Iradiasi internal akan masuk melalui inhalasi.

Radionuklida di *plume* berangsur-angsur akan mengalami penipisan melalui proses deposisi (baik kering maupun basah) dan peluruhan radioaktif. Radionuklida terdeposisi baik secara basah maupun kering ini selanjutnya akan mengalami mekanisme perpindahan (transfer) ke lingkungan dan akan berlanjut pada paparan terhadap manusia. Radionuklida yang terdeposisi ini masih memungkinkan masuk ke dalam tubuh manusia melalui inhalasi setelah terlebih dahulu mengalami proses resuspensi yang disebabkan oleh angin ataupun kegiatan manusia mengolah tanah. Peluruhan radioaktif dari radionuklida terdeposisi akan menyebabkan paparan eksternal berupa foton gamma dan elektron. Deposisi radionuklida pada tanaman dan tanah akan menyebabkan transfer radionuklida ke dalam tubuh manusia dan menimbulkan paparan secara internal melalui makanan yang dikonsumsi.

Kontribusi jalur paparan yang memberikan konsekuensi dosis yang akan diterima masyarakat sangat tergantung pada kondisi tapak PLTN seperti meteorologi, topografi dan tataguna lahan, kependudukan, kondisi permukiman, pola konsumsi, antropometri, kondisi lapisan tanah atas (*top soil*), produksi pertanian dan peternakan.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui kontribusi setiap jalur paparan terhadap dosis yang akan diterima masyarakat. Selain itu penelitian ini bertujuan untuk menghitung total *committed doses*.

II. LANDASAN TEORI

2.1. Model Lepas Normal

Dalam pengoperasian normal, PLTN akan mengemisikan sejumlah kecil zat radioaktif, antara lain H-3 (tritium), C-14, Cs-137, Co-60, Kr-85m, Kr-85, Kr-87, Kr-88, I-131, I-133, Xe-131m dan lain-lain^[8]. Radionuklida yang dilepaskan ke atmosfer akan mengalami proses dispersi yang terdiri dari proses difusi dan transport. Selanjutnya radiasi yang dipancarkan radionuklida dalam *plume* ini akan memberikan paparan kepada manusia (sumber eksternal) yang dilewatinya, yang dikenal dengan jalur awan gamma dan beta (*cloudshine*). Radionuklida dalam udara juga dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur pernafasan (inhalasi).

Radionuklida dalam udara ini dapat terdeposisi melalui dua cara, yaitu deposisi kering dan deposisi basah, serta radionuklida akan jatuh ke permukaan tanah. Selanjutnya radionuklida terdeposisi ini akan memberikan paparan (external) kepada manusia, yang disebut jalur *groundshine*. Sebagian lagi akan kembali ke udara yang disebut proses resuspensi, baik yang digerakkan secara alamiah (misalnya angin) ataupun akibat ulah manusia (misalnya kegiatan mengolah tanah). Radionuklida di udara hasil resuspensi dapat memberikan paparan kepada manusia baik melalui inhalasi maupun *cloudshine*.

2.2. Model Dispersi Atmosfer

Lepasan radionuklida melalui atmosfer akan terdispersi ke lingkungan dan selanjutnya dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan sifat fisis radionuklida. Beberapa model dispersi telah dikembangkan, antara lain:

- a. *Lagrangian Puff*, yang menghitung difusi bahan dalam gumpalan awan (*puff*) sepanjang tiga sumbu arah angin bertiup (*down wind*), berlawanan arah angin (*crosswind*), dan vertikal. Lepasannya kontinyu digambarkan sebagai suatu sekuen (urutan) *puff*, dan setiap sekuen dapat dijejak secara individual mengikuti perubahan kondisi meteorologi selama waktu perjalanan.
- b. *Eulerian grid*, model ini membagi area yang ditinjau dalam matrik bujursangkar yang terdiri dari sel grid. Persamaan difusi kemudian diintegrasikan untuk simulasi dispersi atmosfer. Model ini dapat digunakan untuk tiga dimensi arah angin.

- c. *Gaussian Plume Model*. Model ini banyak dipakai sebab relatif sederhana dengan parameter yang mudah diukur seperti kecepatan angin dan tutupan awan (*cloud cover*). Untuk lepasan dalam jangka panjang, model ini cocok digunakan [1].

Konsentrasi radionuklida di *ground level*, $\chi(x,0,0)$, dapat dihitung dengan persamaan *time-integrated concentration* (konsentrasi terintegrasi waktu) yang dikembangkan dari *Gaussian Plume Model*. [2, 3, 6]

$$\psi(x,0) = \frac{2Q_0}{\sqrt{2\pi X\theta}} \sum_k \frac{N_{ijk}}{\sigma_{zj} U_k} \exp\left(-\frac{(H_{jk})^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \quad (1)$$

- $\psi(X,0)$: Konsentrasi Terintegrasi Waktu (TIC) selama satu tahun kalender, pada permukaan tanah, jarak X dari cerobong arah angin.
 Q : Laju lepasan sumber, Bq/tahun.
 H : Tinggi cerobong efektif
 U : Kecepatan angin
 (α) : parameter dispersi *plume*
 θ : sektor angular

2.3. Radiasi Eksternal dari *Plume*

Estimasi radiasi eksternal dari *plume* pada umumnya dilakukan dalam dua tahap, yaitu evaluasi dosis serap di udara kemudian konversi dosis serap di udara ke dosis ekuivalen pada jaringan dan dosis efektif.

2.3.1. Radiasi eksternal foton

(a) Dosis serap di udara

Dua model biasanya tergantung pada dimensi *plume* dan distribusi aktivitas, yang dikategorikan menjadi model awan *semi-infinite* dan *finite*.

Semi-infinite model

Estimasi dosis serap di udara dari *plume* yang mengemisikan foton dapat dilakukan menggunakan model awan *semi-infinite*. Model ini mengasumsikan konsentrasi udara adalah seragam untuk seluruh volume *plume*. Jumlah energi yang diserap oleh suatu

elemen awan sama dengan energi yang dilepaskan pada elemen yang sama (*equilibrium*). Laju dosis serap di udara adalah ⁽¹⁾:

$$D_{\gamma} = k_1 \times \sum I_j E_j \quad (2)$$

Dimana:

- D_γ : Laju dosis serap di udara (Gy y⁻¹)
- X : Konsentrasi nuklida di atmosfer (Bq m⁻³)
- c : Energi awal foton (MeV)
- I_j : Fraksi foton energi awal E_j yang diemisikan per peluruhan
- n : Jumlah foton untuk energi tertentu yang diemisikan per peluruhan
- k₁ : 2.0 10⁻⁶ (Gy y⁻¹ per MeV m⁻³s⁻¹)

Finite Cloud Model

Model Awan Hingga mencakup simulasi *plume* untuk sejumlah sumber dengan volume kecil dan mengintegrasikannya untuk seluruh sumber. Ada dua tahapan dalam proses perhitungan, yaitu evaluasi fluks foton pada titik yang ditinjau dan konversi fluks foton ke dosis serap di udara. Pada umumnya foton dengan intensitas dan energi yang berbeda diasosiasikan dengan peluruhan suatu radionuklida tertentu. Evaluasi dosis dari peluruhan radionuklida didapatkan dengan penjumlahan secara keseluruhan spektrum energi peluruhan foton. Fluks foton pada suatu jarak tertentu dari suatu sumber titik mempunyai dua komponen, yaitu fluks terhambur (*scattered*) dan *unscattered*. Fluks terhambur mengalami satu atau lebih tumbukan dengan molekul udara dan mempunyai energi berbeda dengan fluks tak terhambur. Fluks tak terhambur mempunyai energi yang sama dengan foton peluruhan. Fluks foton efektif F pada jarak r dari suatu sumber titik didapatkan dengan menggunakan faktor *multiple scattering build-up* sebagai berikut [1]:

$$F = \frac{qB (E_{\gamma} \mu r) e^{-\mu r}}{4 \pi r^2} \quad (3)$$

Dimana:

- F : fluks efektif ((m⁻² s⁻¹)
- q : kekuatan sumber ((s⁻¹)
- r : jarak dari sumber (m)
- μ : koefisien atenuasi linier
- B : *Energy deposition build-up factor*
- E_γ : Energi foton awal

Fluks efektif dari elemen volume, δV , dari *plume* dengan konsentrasi X per satuan volume didapatkan dengan mengganti q pada persamaan di atas dengan $X\delta V$. Fluks foton efektif total, F_c , dari awan-hingga didapatkan dengan mengintegrasikan seluruh ruang ^[1].

$$F_c = \int \frac{fXB(E_\gamma, \mu r) e^{-\mu r}}{4\pi r^2} dV \quad (4)$$

di mana f adalah intensitas energi gamma

(b) Konversi Dosis Serap ke Dosis Organ

Laju dosis di berbagai organ dapat diturunkan dari laju dosis serap di udara menggunakan Publikasi ICRP 51, yaitu "*Data for Use in Protection Against External Radiation*" (dalam Simonds et al) ^[1].

2.3.2. Radiasi Eksternal Elektron

(a) Dosis Serap di Udara

Jangkauan elektron di udara pada umumnya kecil (beberapa meter) dibandingkan dengan dimensi *plume*. Model awan-hingga dapat diterapkan untuk memperkirakan laju dosis. Energi yang diserap oleh suatu elemen awan sama dengan energi yang dilepaskan pada elemen yang sama dan laju dosis serap di udara dapat dituliskan sebagai berikut ^[1]:

$$D_\beta = k X(x,0) \sum_{j=1}^m I_j E_j \quad (5)$$

Dimana

- D : laju dosis serap dalam udara (Gy/year)
- $X(x,0)$: adalah konsentrasi di permukaan (Bq m⁻³)
- E_j : energi rata-rata partikel atau elektron konversi (MeV)
- I_j : Fraksi elektron energi rerata E_j yang diemisikan per peluruhan
- m : jumlah partikel (dan elektron konversi dari energi tertentu setiap peluruhan)
- k_2 : 4.10⁻⁶ (Gy/tahun⁻¹ per MeV m⁻³ s⁻¹)

Dalam peluruhan, partikel diemisikan dalam bentuk spektrum dan dicirikan secara khusus melalui energi maksimum $E(\max)$. Energi rerata partikel (E_j), adalah [1]:

$$E_j = \frac{E_{\beta \max}}{3} J \quad (6)$$

(b) Konversi Dosis Serap di Udara ke Dosis Organ Tubuh

Jangkauan elektron di jaringan bervariasi terhadap energi, dan hanya elektron tertentu mencapai beberapa milimeter sehingga dapat dibatasi hanya iradiasi kulit saja yang dipertimbangkan. Sel yang sensitif terhadap radiasi (radiosensitif) di dekat permukaan kulit terletak di lapisan basal epidermis pada kedalaman 70 μm . Laju dosis di kulit dievaluasi dari laju dosis serap di udara, sesuai dengan penyerapan eksponensial dari fluks elektron dengan kedalaman 70 μm , seperti berikut [1]:

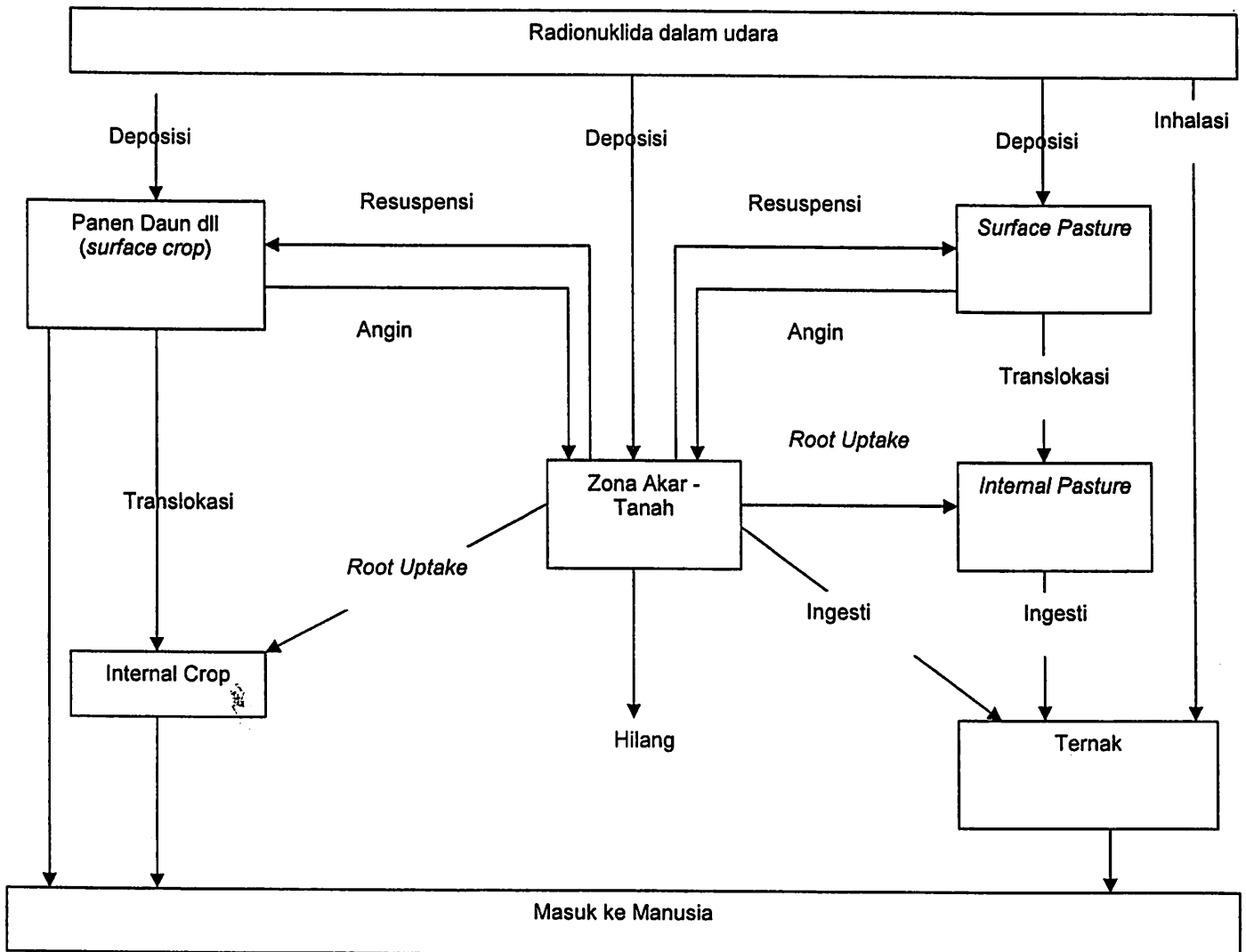
$$H_{\beta} = 0.5 e^{-\mu d} D_{\beta} W_r \quad (7)$$

- H_{β} : Laju dosis ekuivalen dalam kulit (Sv per tahun)
- W_r : Faktor kualitas untuk radiasi β
- μ : Koefisien serapan dalam jaringan (m^{-1})
- d : ketebalan lapisan epidermal

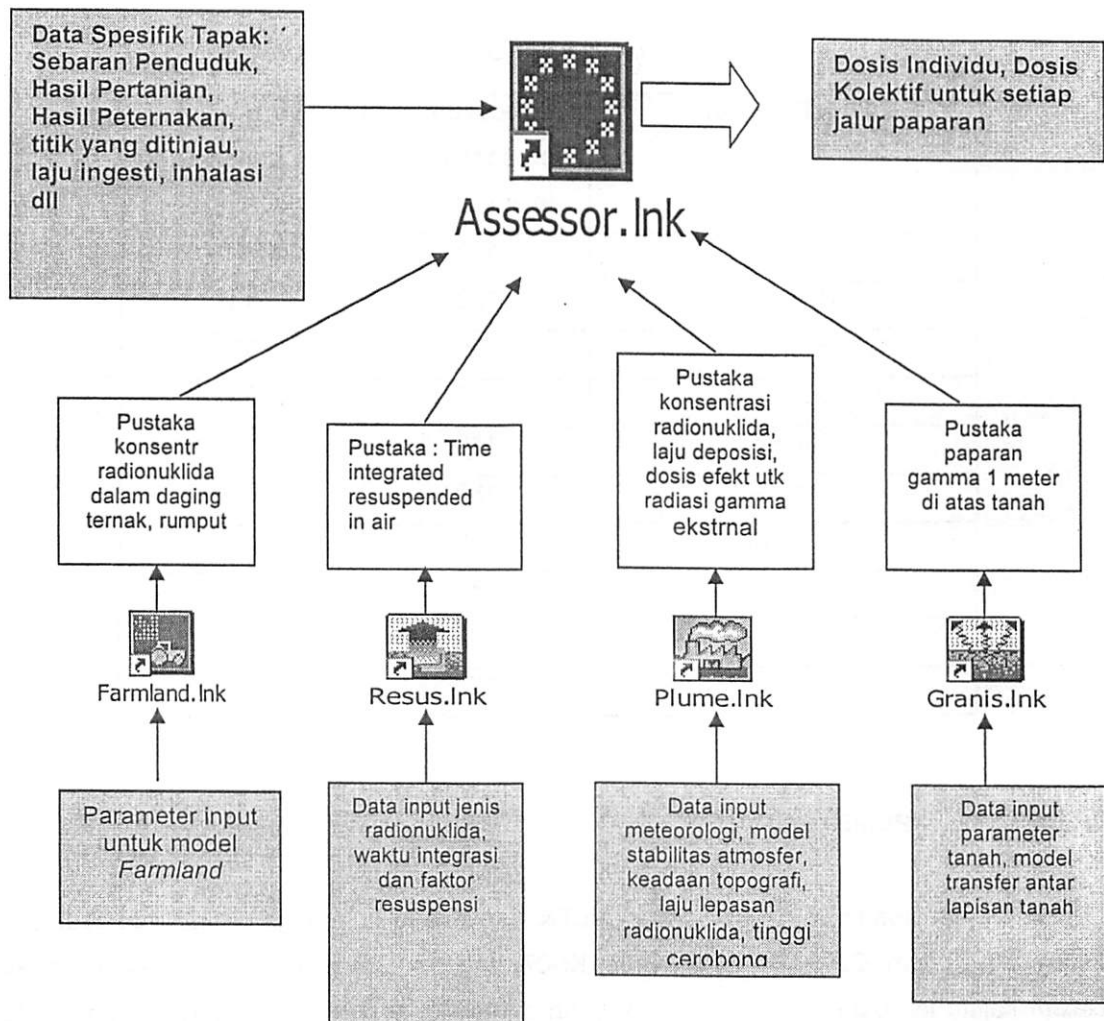
III. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan melakukan perhitungan dosis radiasi menggunakan *computer code* PC CREAM. PC CREAM merupakan paket perangkat lunak yang digunakan untuk menghitung dosis radiasi lepasan normal dari suatu fasilitas nuklir. Paket ini terdiri dari 6 modul, yaitu: ASSESSOR, GRANIS, RESUS, FARMLAND, PLUME dan DORIS [7]. Perhitungan dispersi atmosfer dan deposisi partikel dilakukan dengan modul PLUME. Data masukan modul ini berupa data statistik meteorologi selama satu tahun (yang mencakup arah angin, stabilitas atmosfer, dan kondisi hujan), tinggi lepasan, kekasaran permukaan, laju emisi radionuklida. Konsentrasi aktivitas radionuklida (Bq/kg) dalam daging atau tanaman pertanian dapat dihitung menggunakan modul FARMLAND. Proses perpindahan radionuklida melalui rantai makanan dapat diilustrasikan seperti Gambar 1. Modul RESUS digunakan untuk menghitung radionuklida tersuspensi di udara sesuai dengan berbagai

waktu integrasi yang dimasukkan. Modul GRANIS digunakan untuk menghitung awan gamma pada ketinggian 1 meter dari permukaan tanah.



Gambar 1. Proses transfer radionuklida ke manusia melalui rantai makanan ^[1]



Gambar 2. Proses perhitungan dosis menggunakan paket program PC CREAM [7]

Dalam perhitungan terdapat 10 (sepuluh) titik koordinat yang ditinjau. Lima titik terletak di Desa Balong (sampai radius 2 km) sedangkan lima titik lainnya antara 3 km sampai dengan 7 km dari tapak PLTN ULA.

Tabel 1. Titik yang Ditinjau (*Receptor Point*)

Titik Penerima	Sudut dari Cerobong PLTN dalam derajat	Jarak dari Cerobong PLTN ULA (m)
Balong-1	180	500
Balong-2	180	700
Balong 3	180	1000
Balong 4	180	1300
Balong 5	180	2000
Jepara-1	180	3000
Jepara-2	180	4000
Jepara-3	180	5000
Jepara-4	180	6000
Jepara-5	180	7000

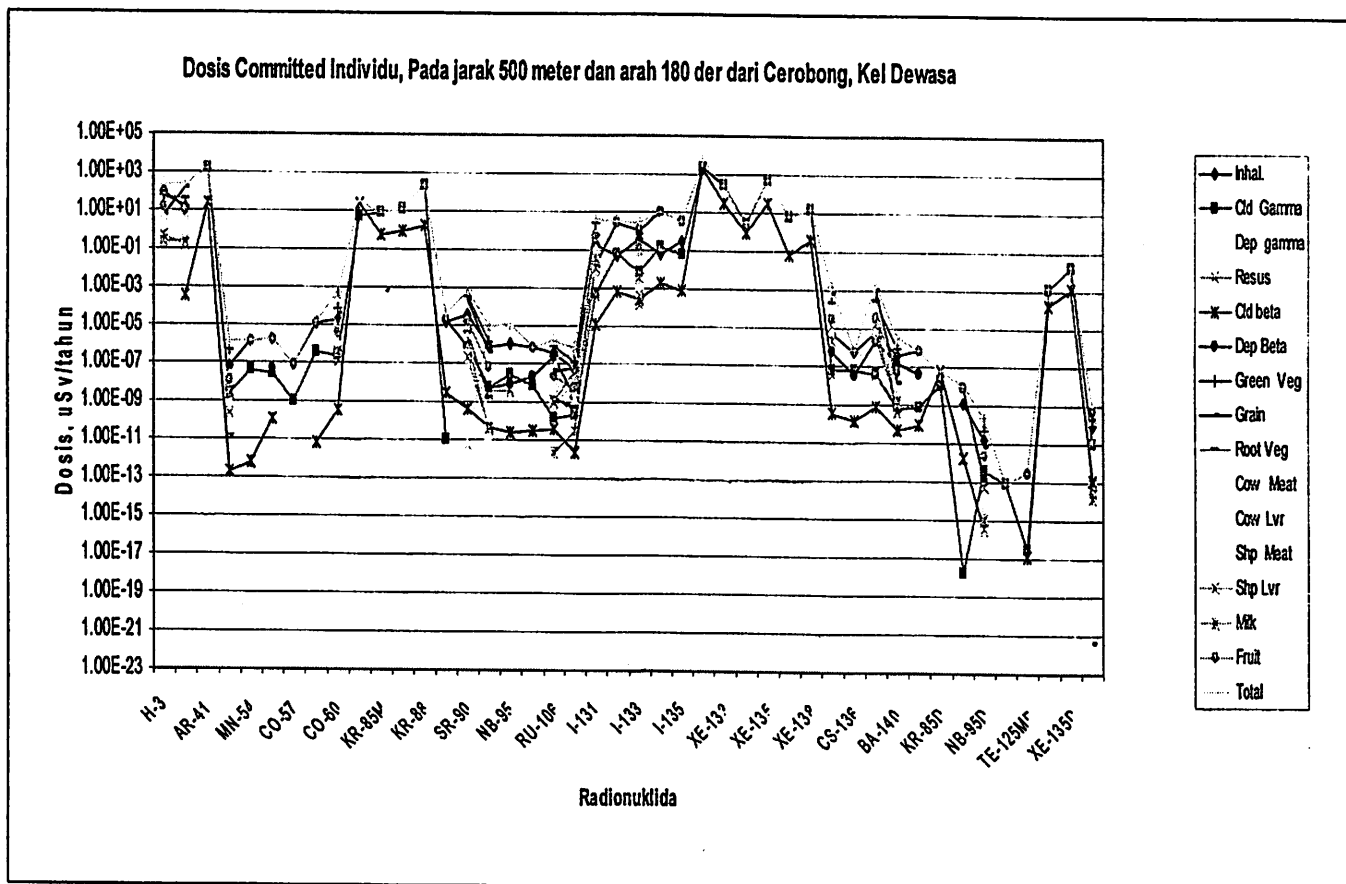
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam kondisi operasi normal, PLTN hanya sedikit mengemisikan zat radioaktif, antara lain Tritium, Co-60, Kr-85m, Kr-85, Kr-87, Kr-88, I-131, I-133, Xe 131m dan lain-lain. Dalam kajian ini, baru 10 titik koordinat yang dianalisis, seperti tertera Bab 3. Jumlah dan persebaran penduduk baru akan dihitung (diproyeksikan) pada tahun 2016 (saat PLTN pertama kali beroperasi), belum dihitung untuk jangka waktu sepanjang umur PLTN.

Data lepasan radioaktif mengacu pada *Safety Analysis Report (SAR)* PLTN mutakhir yang beroperasi di suatu negara, namun belum dapat disebutkan sumbernya karena masih terikat pada suatu perjanjian kerjasama studi. Mengingat data lepasan untuk PLTN dari negara lainnya sulit didapat, maka dalam tulisan ini analisis hanya dilakukan untuk sumber lepasan tersebut di atas.

Jalur paparan yang dikaji adalah melalui inhalasi (pernapasan), ingesti (makanan), awan gamma dan beta (*Gamma and Beta cloud*) dan resuspensi. Untuk zona eksklusi (diasumsikan 1 km) jalur paparan ingesti diabaikan, karena otoritas PLTN tidak akan memberikan ruang lahan untuk tanaman pangan sampai radius 1.000 meter.

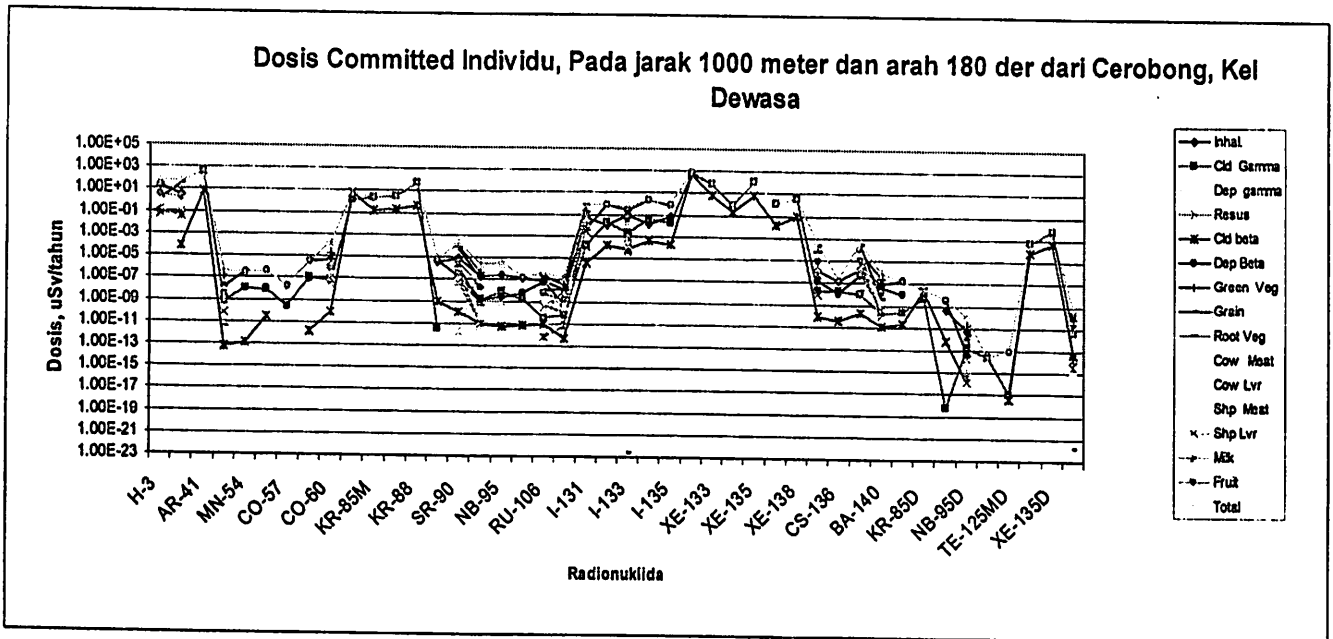
*Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Pada
Kondisi Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe
(Yarianto Sugeng Budi Susilo)*



Gambar 3. Dosis *Committed Individu* berdasarkan jalur paparan di daerah eksklusi (Jarak 500 meter arah 180°) dari cerobong PLTN, untuk kelompok dewasa, dalam $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$

Pada jarak 500 meter, dosis total untuk kelompok dewasa adalah $7,13 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Sumbangan dosis terbesar adalah jalur awan gamma dan beta sebesar $7 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Hal ini dapat dimengerti, karena lepasan zat radioaktif bersifat kontinyu. Karena pada jarak 500 meter diasumsikan sebagai daerah eksklusi, maka tidak ada sumbangan dosis ingesti (tidak ada tanaman pangan maupun ternak di daerah ini). Jalur inhalasi sebagai penyumbang dosis ke dua, yaitu sebesar $1,1 \times 10^2 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Sedangkan jalur resuspensi dan dari radiasi permukaan tanah tidak mempunyai pengaruh dosis total yang signifikan.

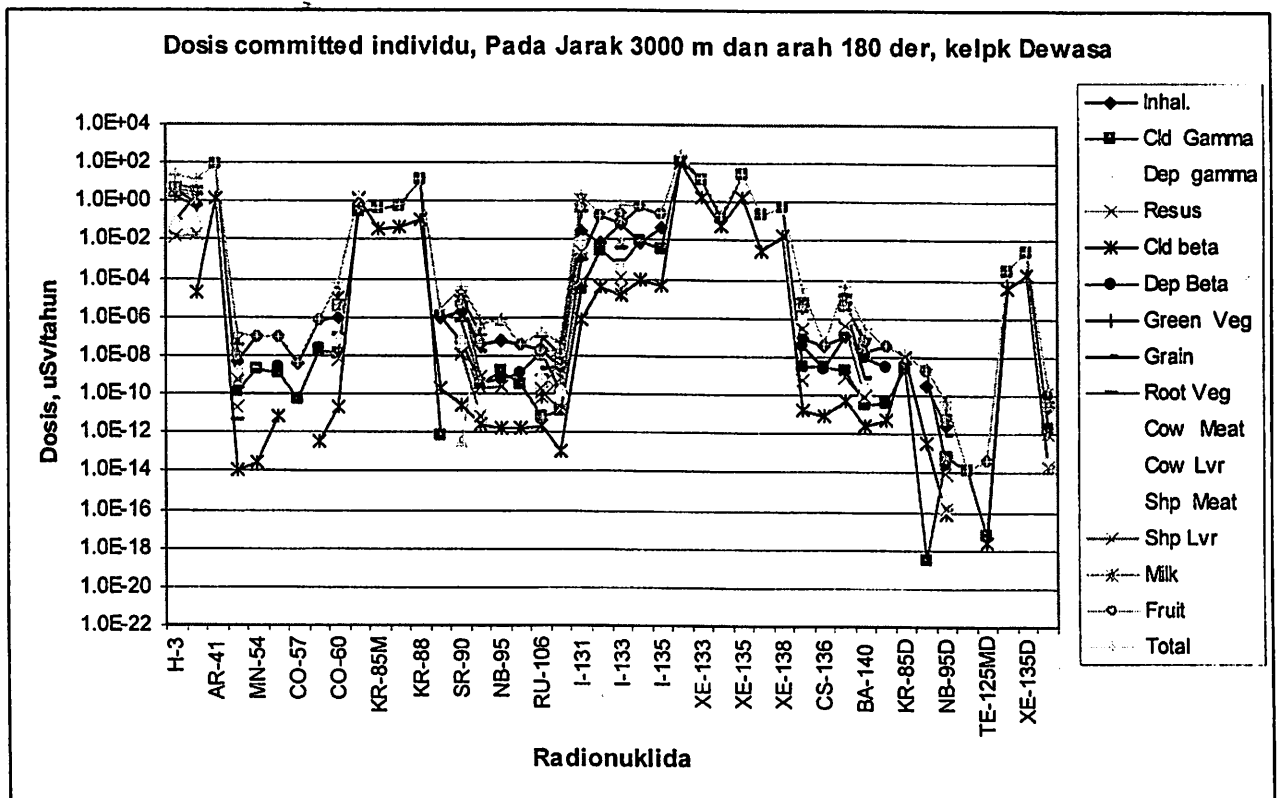
Berdasarkan hasil perhitungan, radionuklida Ar-41, Xe-131m, Xe-135, Kr-88, dan H-3 adalah unsur-unsur radioaktif yang paling dominan dalam menyumbang dosis total.



Gambar 4. Dosis *Committed Individu* pada jarak 1000 meter dan arah 180^o dari Cerobong, kelompok dewasa

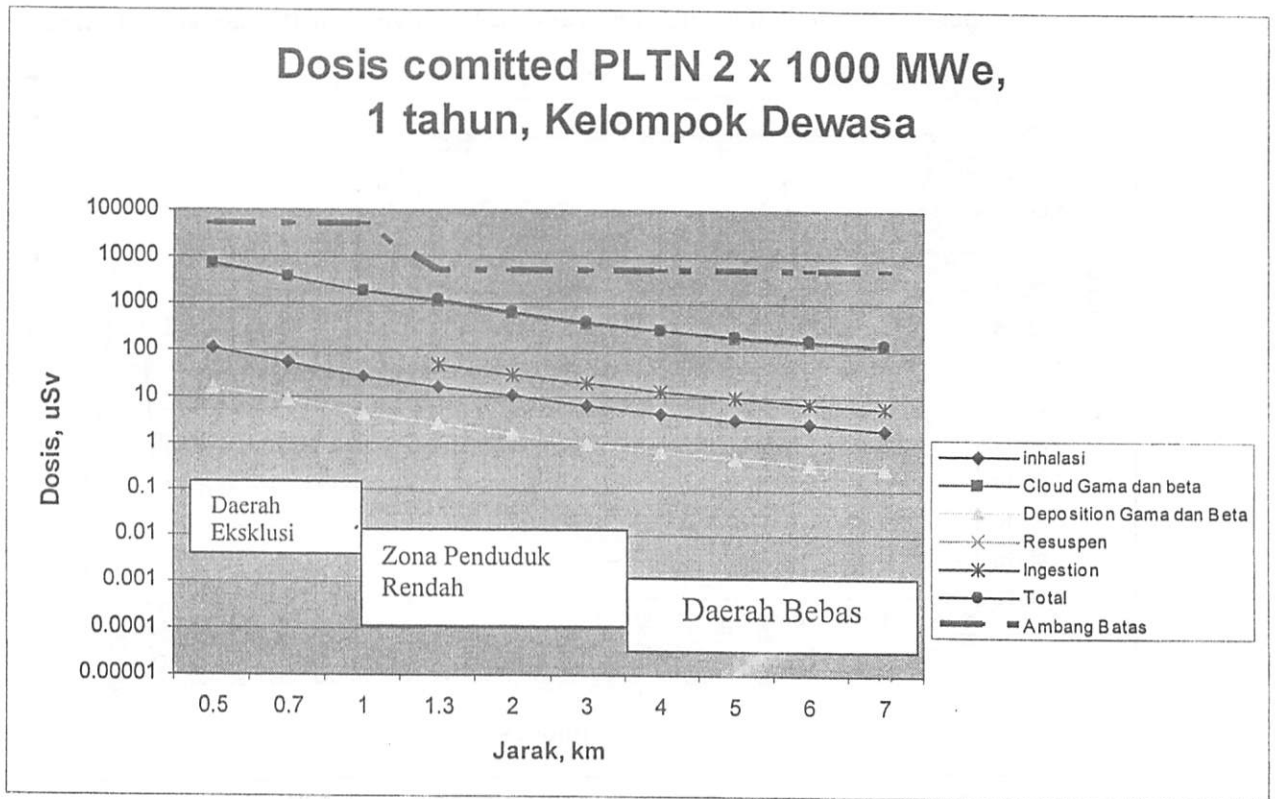
Pada jarak 1 km dari pusat lepasan (cerobong), dosis total yang diterima oleh individu dalam satu tahun adalah $1,8 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Namun pada saat ini (diharapkan juga pada masa yang akan datang ketika PLTN beroperasi) di titik koordinat ini, tidak ada penduduk. Peruntukannya adalah perkebunan, yang akan tetap dipertahankan, sebagai daerah penyangga, sehingga tidak ada dosis ingesti. Penyumbang dosis terbesar adalah awan gamma dan beta ($1,77 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$), kemudian dosis inhalasi ($27 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$). Jalur resuspensi dan paparan permukaan tanah menyumbang jumlah dosis yang tidak signifikan.

*Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Pada
Kondisi Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe
(Yariato Sugeng Budi Susilo)*



Gambar 5. Dosis Committed Individu pada jarak 3000 meter dan arah 180^o dari cerobong, kelompok dewasa

Pada jarak 3 km ke arah selatan dari tapak PLTN terdapat permukiman penduduk yaitu Desa Balong, meskipun tidak terlalu banyak. Sebagian besar peruntukan wilayah pada radius ini adalah perkebunan. Dosis total yang diterima oleh individu dalam satu tahun di titik ini adalah $4,07 \times 10^2 \mu\text{Sv/tahun}$. Penyumbang dosis terbesar adalah awan gamma dan beta ($3,76 \times 10^2 \mu\text{Sv/tahun}$), kemudian ingesti (melalui rantai makanan) sebesar $1,92 \times 10^1 \mu\text{Sv/tahun}$. Dosis ingesti didapatkan melalui konsumsi sayuran hijau (kangkung, bayem, daun singkong dll), biji-bijian (beras, jagung), umbi (singkong, ubi, kentang dll), buah-buahan, daging sapi, hati sapi, daging kerbau, hati kerbau, daging kambing/domba, hati kambing/domba, dan susu. Dosis inhalasi menyumbang sebesar $6,5 \mu\text{Sv/tahun}$. Jalur resuspensi dan paparan dari permukaan tanah menyumbang jumlah dosis yang tidak signifikan. Jika dosis pada jarak 3000 meter dibandingkan dosis pada jarak 1000 meter, maka dosis individu tereduksi menjadi tinggal 1/10 nya.



Gambar 6. Dosis Committed Individu untuk operasi normal PLTN 2 x 1000 MWe selama 1 tahun untuk kelompok dewasa, menurut jalur paparan utama

Dosis yang diterima penduduk akan menurun secara signifikan untuk semua jalur paparan. Pada semua jarak, dosis yang diterima penduduk lebih rendah dari batas dosis yang diperkenankan. Pada jarak 1 km diasumsikan sebagai daerah eksklusi, sehingga hanya pekerja radiasi yang diperkenankan masuk. Pada zona ini batas dosis menggunakan batasan pekerja radiasi. Antara 1 sampai 3.5 km diasumsikan sebagai zona penyangga (*Low Population Zone*), dengan jumlah penduduk yang dibatasi dengan pengendalian pertumbuhan penduduk. Pada Gambar 6 terlihat bahwa dosis melalui jalur paparan dari awan gama dan beta adalah merupakan penyumbang dominan, kemudian diikuti ingesti dan inhalasi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Jalur paparan melalui awan gamma dan awan beta memberikan kontribusi dosis paling besar dibandingkan dengan jalur lain
2. Jalur ingesti (melalui rantai makanan) merupakan jalur paparan kedua yang signifikan setelah awan gamma dan beta. Untuk lepasan jangka panjang jalur ingesti sangat penting, mengingat ada mekanisme bioakumulasi.
3. Jalur inhalasi memberikan tingkat kontribusi dosis ke tiga
4. Jalur resuspensi dan paparan permukaan tanah kurang signifikan dibandingkan dengan jalur lain di atas.

Mengingat berbagai keterbatasan dalam penelitian ini, maka disarankan:

1. Dapat dilakukan penelitian lanjutan, dengan integrasi waktu yang lebih panjang, misalnya sampai 50 tahun, sesuai umur operasi PLTN
2. Perlu dilakukan simulasi dengan berbagai tinggi cerobong

DAFTAR PUSTAKA

1. Simonds J.R., Lawson G., Mayyal A., " Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environmen", European Commission, EUR 15760 EN
2. Turner D. B. , "Atmospheric Dispersion Estimates, An Introduction to Dispersion Modeling", Lewis Publishers, Chapel Hill, North Carolona, 1994
3. IAEA, Safety Series 50 –SG-S3, " Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, IAEA, Vienna, 1980
4. IAEA, Safety Standards Series, NS-R-3, Site Evaluation for Nuclear Installations, IAEA, Vienna, 2003
5. IAEA, Safety Standards Series, NS-G-3.2, Dispersion of Radioactive Material in air and Water and Consideration of Population Distribution in Site Evaluation for Nuclear Power Plants, IAEA, Vienna, 2002
6. IAEA, Safety Report Series No 19, "Generic Models for Use in Assessing the Impact of Radioactive Substances to the Environment", IAEA, Vienna, 2001
7. Mayall A. *et al*, "PC CREAM, Consequences of Releases to the Environment Assessment Methodology", NRPB, European Commission, 1997
8. Newjec, Topical Report (Step 3) on Dose Assessment of the First Indonesian Nuclear Power Plant, Newjec, 1996.

*Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Pada
Kondisi Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe
(Yarianto Sugeng Budi Susilo)*

LAMPIRAN

Tabel Lampiran 1. Lepas an anual PLTN 2 x 1.000 M.We Dalam Kondisi Operasi Normal

No	Nuclide	Waste Gas System	Fuel Handling	Containment Building	Auxiliary Building Vent	TBN Building Vent	Air Ejector-Exhaust	Total 1 unit (Bq/year)	2 Unit
1	Kr-85m	0	0	1.89E+12	1.11E+11	0	7.40E+10	2.08E+12	4.15E+12
2	Kr-85	3.15E+13	0	7.77E+13	8.51E+11	0	4.07E+11	1.10E+14	2.21E+14
3	Kr-87	0	0	5.92E+11	1.11E+11	0	3.70E+10	7.40E+11	1.48E+12
4	Kr-88	0	0	2.22E+12	2.22E+11	0	1.11E+11	2.55E+12	5.11E+12
5	Xe-131m	2.59E+11	0	5.55E+13	6.29E+11	0	2.96E+11	5.67E+13	1.13E+14
6	Xe-133m	0	0	3.55E+12	3.70E+10	0	0	3.59E+12	7.17E+12
7	Xe-133	0	0	1.63E+14	2.11E+12	0	9.99E+11	1.66E+14	3.32E+14
8	Xe-135m	0	0	1.11E+11	1.11E+11	0	3.70E+10	2.59E+11	5.18E+11
9	Xe-135	0	0	1.78E+13	6.29E+11	0	2.96E+11	1.87E+13	3.75E+13
10	Xe-137	0	0	0.00E+00	0.00E+00	0	0	0.00E+00	0.00E+00
11	Xe-138	0	0	7.40E+10	7.40E+10	0	3.70E+10	1.85E+11	3.70E+11
12	I-131	0	1.81E+08	4.44E+08	2.22E+09	0	0	2.85E+09	5.69E+09
13	I-132	0	9.25E+08	2.29E+09	1.15E+10	4.44E+06	0	1.47E+10	2.94E+10
14	I-133	0	5.92E+08	1.44E+09	7.03E+09	3.70E+06	0	9.07E+09	1.81E+10
15	I-134	0	1.52E+09	3.70E+09	1.89E+10	4.81E+06	0	2.41E+10	4.82E+10
16	I-135	0	1.11E+09	2.74E+09	1.37E+10	6.66E+06	0	1.76E+10	3.51E+10
17	Cr-51	5.18E+03	6.66E+04	6.29E+06	1.18E+05	0	0	6.48E+06	1.30E+07
18	Mn-54	7.77E+02	1.11E+05	3.63E+06	2.89E+04	0	0	3.77E+06	7.54E+06
19	Co-57	0	0.00E+00	5.55E+05	0.00E+00	0	0	5.55E+05	1.11E+06
20	Co-58	3.22E+03	7.77E+06	1.70E+07	7.03E+05	0	0	2.55E+07	5.10E+07
21	Co-60	5.18E+03	3.03E+06	1.78E+06	1.89E+05	0	0	5.00E+06	1.00E+07
22	Fe-59	6.66E+02	0.00E+00	1.85E+06	1.85E+04	0	0	1.87E+06	3.74E+06
23	Sr-89	1.63E+04	7.77E+05	8.88E+06	2.78E+05	0	0	9.95E+06	1.99E+07
24	Sr-90	6.29E+03	2.96E+05	3.59E+06	1.07E+05	0	0	4.00E+06	8.00E+06
25	Zr-95	1.78E+03	1.33E+03	0.00E+00	3.70E+05	0	0	3.73E+05	7.46E+05
26	Nb-95	1.37E+03	8.88E+05	1.22E+06	1.11E+04	0	0	2.12E+06	4.24E+06
27	Ru-103	1.18E+03	1.41E+04	1.11E+06	8.51E+03	0	0	1.13E+06	2.27E+06
28	Ru-106	9.99E+02	2.55E+04	0.00E+00	2.22E+03	0	0	2.87E+04	5.74E+04
29	Sb-125	0.00E+00	2.11E+04	0.00E+00	1.44E+03	0	0	2.25E+04	4.51E+04
30	Cs-134	1.22E+04	6.29E+05	1.70E+06	2.00E+05	0	0	2.54E+06	5.08E+06
31	Cs-136	1.96E+03	0.00E+00	2.18E+06	1.78E+04	0	0	2.20E+06	4.40E+06
32	Cs-137	2.85E+04	9.99E+05	3.70E+06	2.66E+05	0	0	4.99E+06	9.99E+06
33	Ba-140	8.51E+03	0.00E+00	0.00E+00	1.48E+05	0	0	1.57E+05	3.13E+05
34	Ce-141	8.14E+02	1.63E+02	8.88E+05	9.62E+03	0	0	8.99E+05	1.80E+06
35	H-3							3.367E+13	6.73E+13

36	C-14							2.7E+11	5.40E+11
37	Ar-42							1.26E+12	2.52E+12

Sumber: Data dari salah satu PLTN yang sedang beroperasi, di tidak dapat disebutkan asal sumbernya karena terikat perjanjian kerma, 2005.

Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Pada
Kondisi Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe
(Yarianto Sugeng Budi Susilo)

Tabel Lampiran 2 Hasil Running
"Committed Individual Dose (uSv) in year 1"

Jarak (km)	Sudut (°)	Infant						Child						Adult					
		Inhalasi	Awan Gamma dan Beta	Depositi Gamma dan Beta	Resuspensi	Ingesti	Total	Inhalasi	Awan Gamma dan Beta	Depositi Gamma dan Beta	Resuspensi	Ingesti	Total	Inhalasi	Awan gamma dan beta	Depositi Gamma dan Beta	Resuspensi	Ingesti	Total
0.5		Exclusion Zone																	
0.7		Exclusion Zone																	
1		Exclusion Zone																	
1.3	180	1.30E+01	1.11E+03	2.83E+00	2.60E-04	8.33E+01	1.21E+03	1.70E+01	1.11E+03	2.83E+00	1.90E-04	3.51E+01	1.16E+03	1.70E+01	1.11E+03	2.83E+00	9.90E-05	5.17E+01	1.16E+03
2	180	7.70E+00	6.30E+02	1.72E+00	1.60E-04	5.08E+01	6.90E+02	1.00E+01	6.30E+02	1.72E+00	1.20E-04	2.17E+01	6.63E+02	1.10E+01	6.30E+02	1.72E+00	6.00E-05	3.14E+01	6.74E+02
3	180	4.80E+00	3.76E+02	1.03E+00	1.00E-04	3.14E+01	4.13E+02	6.40E+00	3.80E+02	1.01E+00	7.20E-05	1.34E+01	4.01E+02	6.50E+00	3.80E+02	1.01E+00	3.80E-05	1.92E+01	4.07E+02
4	180	3.30E+00	2.61E+02	6.87E-01	6.90E-05	2.15E+01	2.88E+02	4.40E+00	2.61E+02	6.87E-01	5.00E-05	9.10E+00	2.75E+02	4.50E+00	2.61E+02	6.87E-01	2.60E-05	1.31E+01	2.79E+02
5	180	2.40E+00	1.91E+02	4.95E-01	5.20E-05	1.59E+01	2.10E+02	3.30E+00	1.91E+02	4.95E-01	3.70E-05	6.84E+00	2.02E+02	3.30E+00	1.91E+02	4.95E-01	1.90E-05	9.73E+00	2.05E+02
6	180	1.90E+00	1.48E+02	3.74E-01	4.00E-05	1.24E+01	1.63E+02	2.60E+00	1.48E+02	3.74E-01	2.90E-05	5.28E+00	1.56E+02	2.60E+00	1.48E+02	3.74E-01	1.50E-05	7.72E+00	1.59E+02
7	180	1.50E+00	1.24E+02	2.93E-01	3.30E-05	1.02E+01	1.38E+02	2.10E+00	1.24E+02	2.93E-01	2.40E-05	4.30E+00	1.31E+02	2.10E+00	1.24E+02	2.93E-01	1.20E-05	6.29E+00	1.33E+02

Tabel Lampiran 3. DATA MASUKAN Meteorologi

Met_File_Title]

UNIFORM WINDROSE, 37% CATEGORY A AND 3.4% RAIN IN C AND D (from NRPP-R91) #
 16, 10, 11.25, 8

1.00E-02	1.53E-02	1.21E-02	2.10E-02	3.71E-02	3.03E-02	3.23E-02	4.81E-02	5.12E-02	3.57E-02	2.44E-02	2.92E-02	1.45E-02	5.72E-03	1.70E-03
1.86E-03														
3.56E-03	3.87E-03	4.17E-03	1.08E-02	7.88E-03	5.10E-03	7.88E-03	1.02E-02	8.81E-03	6.18E-03	5.57E-03	3.56E-03	3.09E-03	1.24E-03	9.28E-04
6.18E-04														
4.48E-03	4.79E-03	5.10E-03	8.35E-03	6.80E-03	3.56E-03	4.17E-03	7.88E-03	5.10E-03	3.71E-03	6.30E-03	5.41E-03	2.94E-03	1.39E-03	9.28E-04
4.64E-04														
3.42E-02	3.56E-02	1.96E-02	3.43E-02	2.04E-02	1.16E-02	1.31E-02	2.95E-02	3.37E-02	3.37E-02	4.61E-02	3.03E-02	1.53E-02	5.88E-03	6.80E-03
9.74E-03														
8.81E-03	5.57E-03	2.16E-03	2.63E-03	2.63E-03	1.08E-03	2.16E-03	4.48E-03	4.02E-03	6.18E-03	8.04E-03	5.88E-03	1.86E-03	1.70E-03	2.32E-03
3.09E-03														
1.55E-04	3.09E-04	1.55E-04	6.18E-04	6.18E-04	1.55E-04	1.55E-04	1.55E-04	3.09E-04	0.00E-00	3.09E-04	3.09E-04	0.00E-00	3.09E-04	0.00E-00
0.00E-00														
7.73E-04	3.09E-04	0.00E-00	3.09E-04	1.55E-04	1.55E-04	6.18E-04	3.09E-04	9.28E-04	6.18E-04	1.55E-03	9.28E-04	1.55E-04	0.00E-00	0.00E-00
1.55E-04														
2.01E-03	7.73E-04	7.73E-04	6.18E-04	1.08E-03	1.70E-03	1.70E-03	3.87E-03	4.33E-03	3.40E-03	3.87E-03	4.17E-03	1.70E-03	1.55E-04	1.55E-04
0.00E-00														

Tabel Lampiran 4. Distribusi Penduduk di Sekitar Tapak PLTN Proyeksi Tahun 2016

	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW
0-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1-2	-	730.0	848.6	829.7	829.7	863.7	1,202.9	787.4	550.4
2-5	1,483.5	3,458.4	1,479.0	5,847.7	9,766.4	7,693.2	8,377.6	6,938.3	3,438.4
5-10	2,428.4	11,015.9	15,216.4	11,588.2	19,589.5	11,939.4	19,945.5	23,017.3	7,209.0
10-20	-	37,921.0	21,633.8	42,276.0	42,079.0	46,787.1	38,037.8	52,164.8	8,422.4
20-35	-	12,671.5	61,546.4	88,708.5	106,721.4	137,062.4	137,739.7	106,854.6	132,104.3
35-50	-	-	29,184.0	222,697.3	243,675.2	396,456.0	338,404.9	39,899.5	-

Tabel Lampiran 5. Contoh Masukan Produksi Biji-bijian (padi, jagung dll)

JEP GRAIN		16 SECTORS STARTING AT 11.25 DEGREES # 7					
1.00E+00	2.00E+00	5.00E+00	1.00E+01	2.00E+01	3.50E+01	5.00E+01	
16							
1	1						
0.00E+00							
1	1						
0.00E+00							
1	1						
0.00E+00							
1	7						
0.00E+00	0.00E+00	2.85E+05	6.89E+05	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
1	7						
2.31E+03	2.68E+05	9.92E+05	3.37E+06	1.24E+07	3.61E+06	0.00E+00	
1	7						
1.15E+04	2.73E+05	7.76E+05	2.84E+06	2.34E+06	1.71E+07	7.56E+06	
1	7						
1.15E+04	3.48E+04	6.38E+05	2.95E+06	1.34E+07	2.24E+07	4.98E+07	
1	7						
1.15E+04	3.48E+04	1.69E+05	7.61E+05	2.02E+06	1.34E+07	3.81E+07	
1	7						
1.15E+04	3.16E+04	7.98E+04	1.77E+05	1.09E+06	1.92E+07	5.41E+07	
1	7						
1.15E+04	3.20E+04	9.97E+04	1.94E+05	2.90E+05	1.77E+07	5.44E+07	
1	7						
1.15E+03	3.07E+04	9.54E+04	3.52E+05	5.53E+06	8.83E+06	1.23E+07	
1	7						
4.61E+03	2.08E+04	4.41E+04	1.13E+05	9.80E+05	7.20E+06	0.00E+00	
1	1						
0.00E+00							
1	1						
0.00E+00							
1	1						
0.00E+00							
1	1						
0.00E+00							
7	1.00E+00	2.00E+00	5.00E+00	1.00E+01	2.00E+01	3.50E+01	5.00E+01

**Kontribusi Jalur Paparan Terhadap Dosis Radiasi Pada
Kondisi Operasi Normal PLTN 2 x 1000 MWe
(Yarianto Sugeng Budi Susilo)**