
PEMODELAN DAN ANALISIS SEBARAN RADIONUKLIDA DARI PWR PADA KONDISI ABNORMAL DI TAPAK BOJANEGARA-SERANG

Sri Kuntjoro
Pusat Teknologi Reaktor Dan Keselamatan Nuklir

Diterima editor 16 September 2010
Disetujui untuk dipublikasi 12 Oktober 2010

ABSTRAK

PEMODELAN DAN ANALISIS SEBARAN RADIONUKLIDA DARI PWR PADA KONDISI ABNORMAL DI TAPAK BOJANEGARA SERANG. Penambahan pembangkit listrik yang baru khususnya pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) berpotensi memberikan konsekuensi radiologis pada masyarakat dan lingkungan, karena adanya lepasan radioaktif dalam kondisi operasi normal maupun abnormal. Oleh karena itu maka pengelola reaktor nuklir harus bisa menyediakan data dan argumentasi yang kuat untuk menjelaskan tentang keselamatan PLTN terhadap lingkungan. Untuk itu perlu dilakukan analisis kondisi abnormal yang terjadi pada PLTN yang akan memberikan konsekuensi radiologis pada lingkungan. Analisis dilakukan dengan membuat pemodelan simulasi kondisi abnormal yang dipostulasikan pada PLTN tipe PWR 1000 MWe serta simulasi dan pemodelan pola potensi lingkungan sebagai daya dukung tapak terhadap penerimaan konsekuensi radiologis tersebut. Pemodelan fenomena transport radionuklida dari teras reaktor sampai ke luar dari sungkup reaktor dilakukan menggunakan perangkat lunak EMERALD dan pemodelan pola dispersi radioaktivitas ke lingkungan dari reaktor meliputi simulasi kondisi meteorologi, distribusi penduduk, produksi dan konsumsi masyarakat pada kondisi ekstrim di daerah studi, menggunakan perangkat lunak GIS, Arcview, Windrose, dan PC COSYMA. Pemodelan konsekuensi radiologis menggunakan tapak contoh daerah Bojanegara-Kramatwatu Pantai Serang-Banten. Dengan menggunakan data source term, data meteorologi dan data dispersi (sebaran penduduk, produksi pertanian dan ternak) dan modeling alur paparan (*pathway*), dihasilkan model sebaran radionuklida dan penerimaan paparan radiasi di lingkungan tapak Bojanegara-Serang, dengan penerimaan dosis radiasi di bawah batas yang diijinkan badan regulator BAPETEN.

Kata Kunci : PLTN, radioaktivitas, pola dispersi, keselamatan

ABSTRACT

MODELLING AND ANALYSIS OF RADIONUCLIDE DISPERSION FROM PWR ON ABNORMAL CONDITION IN BOJANEGARA SERANG SITE. Additional of electrical power especially Nuclear Power Plant will give radiological consequences to population and environment due to radioactive release in normal and abnormal condition. In consequence the management of nuclear power plant must supply data and strong argumentation to clarify the safety of nuclear power plant to environment. For that purpose it needs to be carried out an analysis of abnormal condition in nuclear power plant and its radiological consequences to the environment. That analysis is done using abnormal condition simulation model postulated on 1000 MWe nuclear power plant. That simulation model is used also to evaluate environmental potential as site capability in supporting the radiological consequences. Radionuclide transport modeling from reactor core to containment uses EMERALD computer code. Other computer codes are Windrose, PC-COSYMA and ArcView are used to simulate meteorology condition, radionuclide release to population distribution of food production and consumption and distribution of radiation dose received to population around nuclear power plant. Application of that simulation is carried out to NPP candidate site in Bojanegara-Kramatwatu, Serang Banten peninsula. Using source term data, meteorology data, dispersion data and pathways modeling are resulting radionuclide dispersion model and radiation pathway acceptance at the surrounding nuclear power plant site (Bojanegara-Serang peninsula). The result shows that maximum radiation dose received is lower than dose permitted in accordance with regulatory body (BAPETEN)

Keywords : Nuclear power plant, radioactivity, dispersion model, safety

PENDAHULUAN

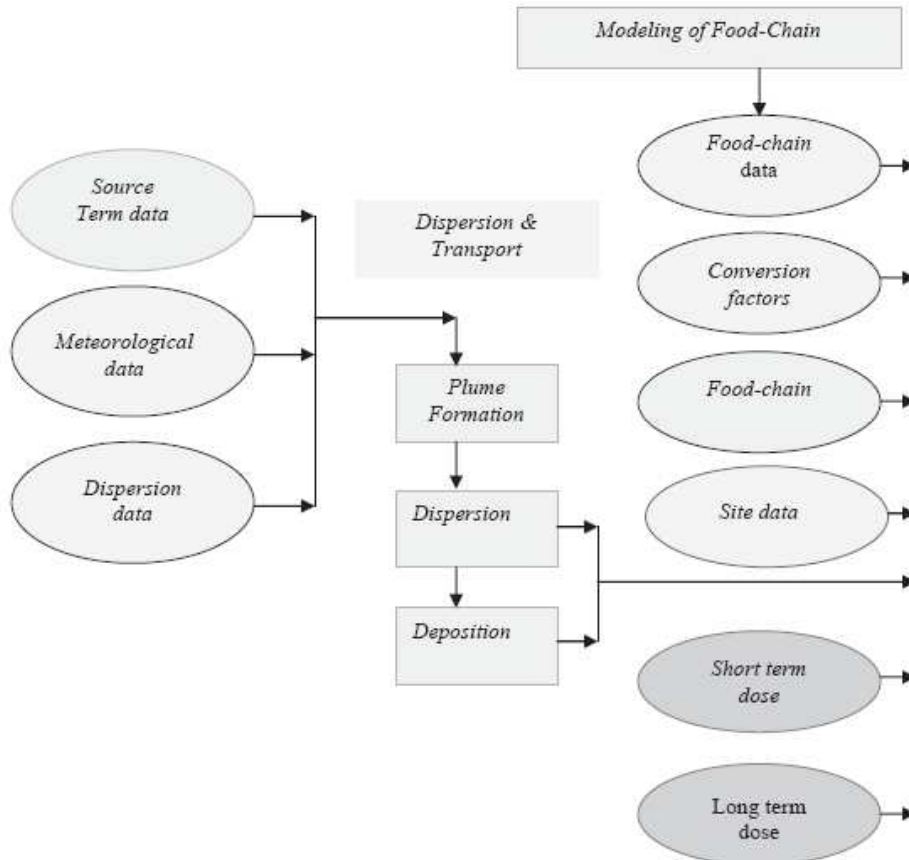
Untuk memenuhi kebutuhan energi di masa mendatang, berbagai sumber energi baru seperti gas, biomassa, geothermal dan air harus ditingkatkan bersamaan dengan pemanfaatan energi fosil. Namun peningkatan ini belum dapat memenuhi seluruh kebutuhan masyarakat[1]. Untuk itu perlu diintroduksi penggunaan energi nuklir dalam bentuk pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) pada tahun 2016[2].

Pengelola reaktor nuklir harus bisa menyediakan data dan argumentasi yang kuat untuk menjelaskan tentang PLTN yang selamat dan aman terhadap lingkungan. Untuk itu diperlukan analisis terhadap pemodelan simulasi keselamatan reaktor yang dimulai dari dalam reaktor sampai konsekuensi pengoperasian reaktor yang merupakan tahapan perhitungan PSA Level-3[3,4]. Tujuan dan lingkup penelitian adalah melakukan pemodelan konsekuensi radiologis dari reaktor PLTN pada kondisi abnormal yang dipostulasikan. Pemodelan transport fenomena radionuklida dari teras reaktor sampai ke luar dari pengungkung reaktor dilakukan pada reaktor PLTN tipe PWR. Pada penelitian ini dilakukan pada PLTN yang sudah beroperasi PWR kelas 1000 MWe. Kondisi abnormal yang dipostulasikan terjadi *large break LOCA* (LBLOCA: *Large Break Loss of Coolant Accident*) [4,5]. Postulasi LBLOCA berdasarkan DBA tingkat 4, dimulai dari patahan ganda yang terbentuk di perpipaan primer, yang seharusnya diikuti dengan bekerjanya sistem keselamatan secara otomatis dan akan memastikan reaktor padam, sehingga pendinginan teras dan integritas pengungkung terjaga. Tetapi dalam postulasi kejadian hanya kapasitas minimum dari sistem keselamatan yang didefinisikan sebagai kriteria sukses yang diambil dalam perhitungan. Sedangkan aplikasi dan pemodelan penerimaan konsekuensi radiologi akibat dispersi radioaktif dilakukan sesuai dengan kondisi spesifik wilayah dan meteorologi untuk daerah studi pesisir Serang-Banten untuk kondisi abnormal terpostulasi. Wilayah yang menjadi obyek penelitian adalah daratan dengan asumsi bahwa wilayah daratlah yang memiliki resiko dominan.

TEORI

Pemodelan Sebaran Radionuklida dan Konsekuensi

Pemodelan mengikuti Gambar 1[5], pemodelan sebaran radionuklida dan konsekuensinya dimulai dari lepasnya radionuklida ke lingkungan karena adanya kondisi abnormal di PLTN yang menyebabkan lepasnya radionuklida dari inventori teras reaktor, ke sistem reaktor, sungkup dan ke luar ke lingkungan.



Gambar 1. Pemodelan sebaran radionuklida dan konsekuensi PWR-1000 MWe

Postulasi dan Pemodelan Source Term

Pemodelan *source term* mengikuti model yang telah digunakan dalam perhitungan terdahulu [6] yaitu: Radionuklida dari inventori ke sungkup mengikuti langkah-langkah fenomena perpindahan atau transport nuklida yang harus dilakukan yaitu radioaktivitas inventori teras, fraksi kegagalan bahan bakar yang diskenariokan, lepasan produk fisi dari teras ke sistem pendingin, lepasan aktivitas dari sistem pendingin ke sungkup primer (*primary containment*), dan retensi nuklida di sungkup [7].

Radioaktivitas inventori teras

Produk fisi di dalam teras reaktor terbentuk setelah reaktor mulai beroperasi. Jumlah produk fisi di dalam teras (i) diterangkan dengan persamaan [8]

$$\frac{dN_i}{dt} = \gamma_i \int_v dr \int_v dE \sum_f(r, E) \phi(r, E) - \lambda_i N_i - \int_v dr \int_E dE \sum_{ai}(r, E) \phi(r, E) \quad (1)$$

dengan,

- N_i : jumlah nuklida produk fisi i di dalam teras
- γ_i : kelimpahan nuklida fisi
- $\sum_f(r, E)$: tampang lintang fisi makroskopik, cm^{-1}

- $\Phi(r,E)$: fluks neutron, n/s cm²
 λ_i : konstanta transformasi nuklir dari nuklida i , s⁻¹
 $\Sigma_{ai}(r,E)$: Tampang lintang serapan makroskopik nuklida i , cm⁻¹

Fraksi kegagalan bahan bakar

Besarnya fraksi kegagalan bahan bakar berdasarkan postulasi kerusakan teras dan sistem pengamanan reaktor seperti ECCS (*Emergency Core Cooling System*). Untuk kecelakaan dasar desain (*Design Basic Accident, DBA*) atau kondisi dasar disain (*Design Basic Condition, DBC*), berdasarkan hasil eksperimen untuk Negara-negara Uni Eropa berkisar 1-50 % bergantung postulasi dan kerja fitur keselamatan pada PWR [7].

Fraksi Lepasn Nuklida Dari Celah (Gap) [7,8]

Pelepasan nuklida dari celah inventori melalui dua fase yaitu fase kering yang terjadi saat teras terisi uap, dan fase basah saat teras kembali terisi air dari ECCS. Untuk nuklida gas mulia semuanya terlepas pada fase kering, sedangkan nuklida lainnya 10 % terlepas pada fase kering, dan 90 % pada fase basah.

$$G = G_0 \lambda^{-0,5} \quad (2)$$

dengan,

- λ : konstanta peluruhan nuklida
 $G_0, \%$: untuk gas mulia : $2,5 \times 10^{-4}$ dan gas volatil : $2,5 \times 10^{-4}$

Fraksi lepasan dari bahan bakar ditentukan dengan persamaan, [7,8]

$$F = F_0 \lambda^{b_f} \quad (3)$$

dengan,

- λ : konstanta peluruhan nuklida
 $F_0, \%$: gas mulia : $4,0 \times 10^{-2}$ dan untuk gas volatil : $3,8 \times 10^{-2}$
 b_f : gas mulia : $-0,29$; gas volatil : $-0,17$

Kecepatan lepasan nuklida produk fisi dipengaruhi oleh radioaktivitas di dalam inventori, fraksi kegagalan bahan bakar, dan koefisien laju lepasan. Untuk produk aktivasi dipengaruhi oleh laju korosi dan mekanisme *crud burst*.

$$C_i(t) = \frac{P_{i,n}}{\lambda_i WP} \{1 - \exp(-\lambda_i t)\} + C_i(t_{n-1}) \exp(-\lambda_i t) \quad (4)$$

dengan,

- C_i : aktivitas nuklida i di pendingin reaktor, Ci/kg
 n : kondisi/ kejadian ke n
 $P_{i,n}$: laju lepasan nuklida i pada kondisi n dari teras ke pendingin reaktor, Ci/s
 WP : kapasitas pendingin reaktor, kg
 t : waktu, s
 λ_i : konstanta transformasi nuklir dari nuklida i , s⁻¹

Perpindahan nuklida dari sistem pendingin ke sungkup primer (*primary containment*) [7,10]

Perpindahan nuklida dari RCS (*Reactor cooling system*) ke sungkup primer dipengaruhi oleh bekerjanya fitur keselamatan ECCS (*Emergency core cooling system*) yang melalui dua fase beroperasinya ECCS, yaitu fase kering dan fase basah.

Retensi di ruangan sungkup

Konsentrasi dari produk fisi (gas mulia, Halogen, volatil, dll) yang terbawa ke sungkup bergantung pada : mekanisme deplesi, desain fitur keselamatan seperti sistem semprot, dan laju lepasan dari proses rusaknya bahan bakar. Selain itu pengurangan radioaktivitas airborne adalah dengan mekanisme alamiah seperti aglomerasi, kondensasi, gravitasi, deposisi, efek foretik, adsorpsi [7].

Analisis radiologi

Kuat sumber pelepasan radionuklida dihitung dengan mengasumsikan laju kebocoran x % volume per hari. Dengan demikian jumlah fraksi pelepasan dihitung dengan rumus [11],

$$\frac{L(t)}{B_0} = \frac{x}{2400} \frac{1}{\left(\lambda + \frac{x}{2400}\right)} \left[1 - \exp\left\{-\left(\lambda + \frac{x}{2400}\right)t\right\}\right] \quad (5)$$

dengan,

- $\frac{L(t)}{B_0}$: fraksi pelepasan
 $L(t)$: radionuklida yang bocor keluar sistim, Bq
 B_0 : radionuklida awal yang ada di sistim, Bq
 x : persen kebocoran (%)
 λ : peluruhan (desintegrasi/jam)

Besaran ini akan menjadi masukan sebagai fraksi pelepasan untuk perhitungan dispersi radionuklida menggunakan perangkat lunak PC-COSYMA.

Pemodelan Dispersi Radionuklida [12,13]

Dispersi bahan radionuklida di atmosfer dilakukan dengan menggunakan model dispersi Gaussian [14] :

$$X(x, y, z) = \frac{Q_0}{2\pi\sigma_y(x)\sigma_z(x)u} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y(x)^2} + \frac{(z-h_e)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right] \quad (6)$$

dengan,

- $X(x, y, z)$: konsentrasi aktivitas dalam udara pada titik (x, y, z) (Bq/m³)
 x : jarak ke arah sejajar angin bertiup (m)
 y : jarak ke arah sumbu y yang tegak lurus arah angin (m)
 z : tinggi dari atas tanah dimana konsentrasi diukur (m)
 $\sigma_y(x)$: koefisien dispersi horizontal (m)
 $\sigma_z(x)$: koefisien dispersi vertikal (m)
 Q_0 : laju pelepasan (Bq/s)
 u : kecepatan angin rata-rata (m/s)
 h_e : tinggi efektif pelepasan (m)

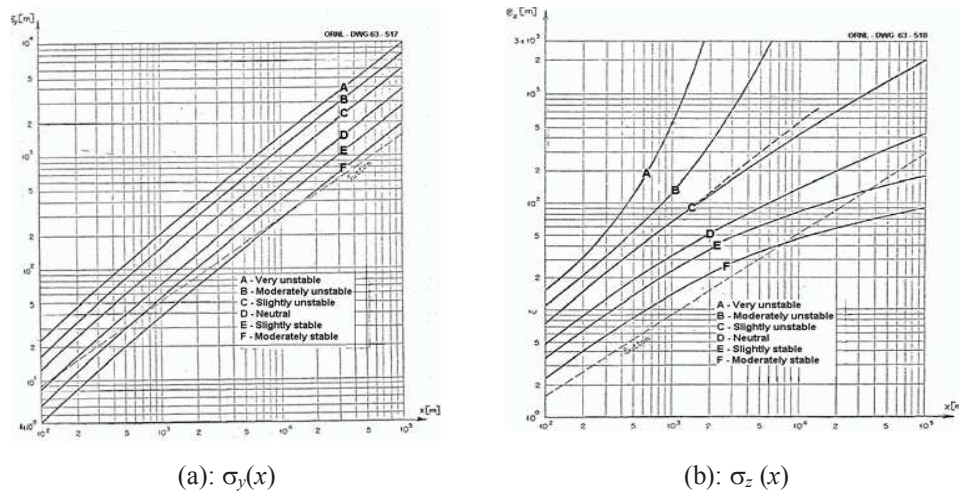
Untuk menghitung konsentrasi, yang diperlukan adalah koefisien dispersi horizontal $\sigma_y(x)$ dan koefisien dispersi vertikal $\sigma_z(x)$. Koefisien dispersi dapat ditentukan bila telah diketahui stabilitas atmosfer. Stabilitas atmosfer dapat diketahui berdasarkan Tabel 1.

Berdasarkan persamaan (6) dapat diturunkan persamaan untuk menghitung dispersi radionuklida di tanah (*ground*) dan di udara (*air*). Perhitungan dispersi radionuklida dilakukan oleh program PC-COSYMA.

Tabel 1. Kategori kelas stabilitas Pasquill-Gifford[14]

Kecepatan angin rata-rata, U (m/s) pada ketinggian 10 m	Kelas stabilitas (siang hari) dengan insolasi			Kelas stabilitas (malam hari) dengan kondisi langit	
	A	A - B	B	*	*
$U < 2$	A	A - B	B	*	*
$2 \leq U < 3$	A - B	B	C	E	F
$3 \leq U < 5$	B	B - C	C	D	E
$5 \leq U < 6$	B	C - D	D	D	D
$6 \leq U$	C	D	D	D	D

Selanjutnya parameter stabilitas atmosfer dan kecepatan angin ini digunakan untuk menghitung nilai $\sigma_y(x)$ = koefisien dispersi horizontal (m) dan $\sigma_z(x)$ = koefisien dispersi vertikal (m), menggunakan grafik pada Gambar 2[14].



Gambar 2. Koefisien dispersi horisontal (a) dan koefisien dispersi vertikal (b)

Pemodelan Penerimaan Dosis Radiasi [11]

Alur paparan utama yang biasanya digunakan yaitu :

- Eksternal irradiasi dari deposit permukaan tanah (*groundshine*)
- Eksternal irradiasi dari material di atmosfer (*cloudshine*)
- Paparan internal lewat inhalasi (hirupan) material di atmosfer
- Paparan internal lewat makanan yang terkontaminasi (*ingestion*)

Paparan radiasi yang diterima lewat makanan berkaitan erat dengan *foodstuff* (jenis dan banyaknya makanan, rantai makanan, yang terkontaminasi). Paparan radiasi yang diterima lewat makanan yang terkontaminasi yaitu: air minum, hasil pertanian, dan produk hewani. Dosis irradiasi ditentukan dengan,

Dosis eksternal ,

$$\chi = \frac{Q}{\pi u \sigma_y(x) \sigma_z(x)} \exp\left[-\frac{h^2}{2(\sigma_z(x))^2}\right] \quad (7)$$

Dengan,

- χ : laju dosis (mrem/s)
- Q : laju emisi radionuklida (Ci/s)
- u : kecepatan angin (m/s)
- $\sigma_y(x)$: koefisien dispersi horizontal (m)
- $\sigma_z(x)$: koefisien dispersi vertikal (m)
- h : tinggi cerobong (m)
- Dosis internal (inhalasi)

$$H = \frac{592B\xi qC}{M\lambda_e} \quad (8)$$

dengan,

B : laju pernafasan (m^3/s)

ξ : energi peluruhan rata-rata per disintegrasi (MeV)

q : fraksi radionuklida yang masuk ke bagian tubuh tertentu, misal hati, limpa dll

C : konsentrasi radionuklida (Ci/s)

M : massa organ tubuh yang terkena radiasi internal (g)

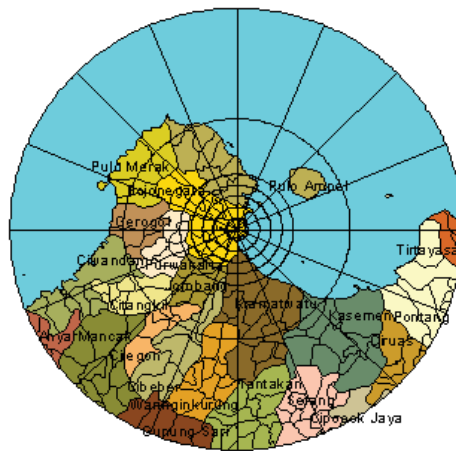
λ_e : konstanta peluruhan radionuklida yang masuk ke tubuh

Perhitungan dosis eksternal dan internal dilakukan di program pC-COSYMA dengan data masukan berupa jenis radionuklida yang terdispersi, pola konsumsi, jarak dari reaktor, populasi penduduk dan lain-lain.

METODOLOGI

Tempat Dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di BATAN dan pesisir Banten. Waktu penelitian selama 10 bulan dimulai pada bulan Pebruari sampai dengan Oktober 2010. Lokasi penelitian dilaksanakan di BATAN Serpong dan pesisir Banten. Pembagian zona analisis diberikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Lokasi penelitian dan zona analisis di pesisir Serang-Banten

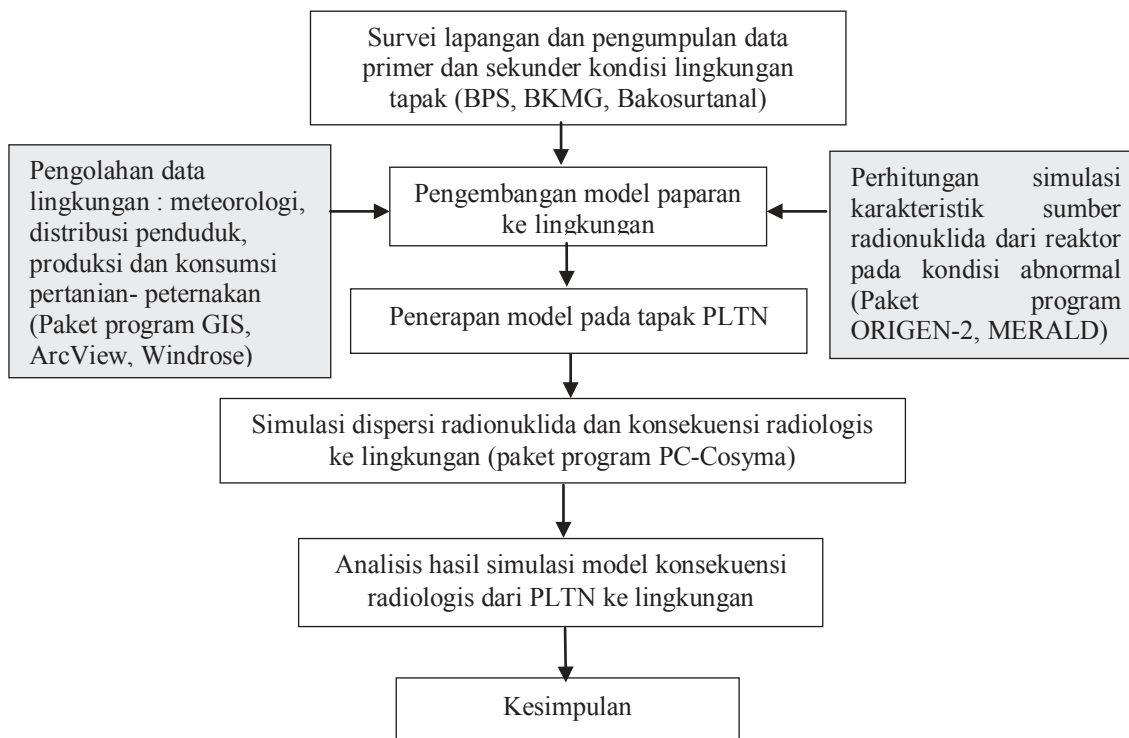
Metode penelitian ini adalah metode penelitian lapangan dan perhitungan simulasi. Penelitian lapangan mencari data primer dan sekunder kondisi lingkungan yang berkaitan dengan kondisi cuaca dalam waktu setahun, produksi dan konsumsi hasil pertanian-

perternakan, dan distribusi penduduk di daerah calon tapak studi. Data ini digunakan untuk pembuatan model paparan radiasi yang diterima dan sebagai data input untuk perhitungan simulasi lepasan radioaktif sebagai sebab adanya konsekuensi radiologis dari PLTN.

Perhitungan simulasi dimulai dengan pembuatan model transport fenomena radionuklida dari teras reaktor ke luar sungkup pada PLTN jenis PWR 1000 MWe, pada kondisi normal sampai kondisi ekstrim menggunakan paket program ORIGEN [15] dan EMERALD[16]. Simulasi perhitungan konsekuensi radiologis ke lingkungan meliputi perhitungan terhadap faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya paparan dan dosis radiasi yang diterima masyarakat dan lingkungan. Aplikasi hasil pemodelan diterapkan pada daerah studi.

Paket program komputer yang digunakan untuk estimasi dan kajian terhadap dampak yang ditimbulkan lepasan radionuklida dari pengoperasian suatu instalasi nuklir, untuk kondisi abnormal menggunakan PC-COSYMA (*Code system from MARIA*), yaitu program pengembangan EC-MARIA (*The European Commission's Methods for Assessing Radiological Impact of Accidents*) [17].

Pada penelitian ini perhitungan dilakukan untuk 5 arah radial serta 16 arah tangensial (sektor). Setiap arah tangensial memiliki perbedaan sudut sebesar $22,5^\circ$ dimulai untuk zona pertama pada arah utara dari sudut $348,75^\circ - 11,25^\circ$ dan zona selanjutnya mengikuti arah jarum jam. Untuk arah radial dibagi lima radius yaitu radius 800 m, 3000 m, 5000 m, 10000 m dan 20000 m. Tahapan penelitian terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram alir tahapan pelaksanaan penelitian

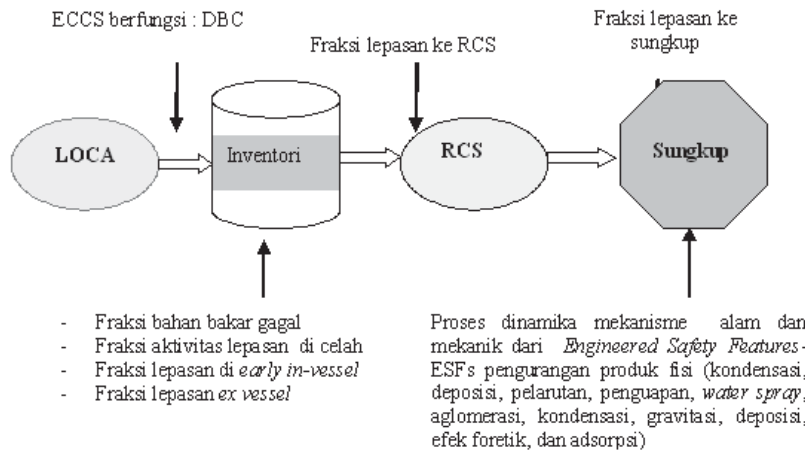
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan *Source Term*

Perhitungan source term di dalam inventori disimulasikan pada reaktor PWR 1000 MWe dengan karakteristik seperti tercantum di Tabel 2. Pemodelan perpindahan nuklida pada kondisi kecelakaan dengan pemicu LOCA, menggunakan paket program EMERALD-*accident* [16], seperti pada Gambar 5. Perpindahan lepasnya radionuklida dari inventori ke sungkup menggunakan asumsi parameter lepasan dari Tabel 3 [7]. Hasil dispersi radionuklida dari sungkup dan lepas ke lingkungan dihitung menggunakan persamaan 5 yang dilakukan pada program PC-COSYMA dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 2. Data bahan bakar reaktor PWR 1000 MWe [18]

Pelet: Diameter : 0.81915 cm Panjang : 0.983 cm Berat : 5.35735 g (UO ₂)	Rod: Panjang aktif : 426,72 cm Rod pitch : 1.26 cm Jumlah pelet/rod : 434 buah Berat UO ₂ /rod : 2325,0899 g
Fuel assembly: Matriks : 17 x 17 Jumlah rod/FA : 264 buah Overall transverse dimensions : 21.402 x 21.402 cm ² Berat UO ₂ /FA : 613,823.73 g Pengayaan 2,35% : U ₂₃₅ = 12.715,22 g, U ₂₃₈ = 528.357,86 g, O ₁₆ = 72.750,66 g Pengayaan 3,40% : U ₂₃₅ = 18.359,95 g, U ₂₃₈ = 522.704,57 g, O ₁₆ = 72.759,21 g Pengayaan 4,45% : U ₂₃₅ = 24.004,68 g, U ₂₃₈ = 517.051,28 g, O ₁₆ = 72.768,66 g	Teras: Matriks : 15 x 15 Jumlah FA dengan pengayaan 2,35%: 53 buah Jumlah FA dengan pengayaan 3,40%: 52 buah Jumlah FA dengan pengayaan 4,45%: 52 buah Jumlah FA total : 157 buah
Daya listrik : 1117 MWe Daya termal : 3400 MWth	Lama siklus operasi : 18 s/d 24 bulan Total outage (hari) : 7% = 38 s/d 50 hari
Planned refueling outage : 17 hari Maximum irradiation (bu) : 65 GWd/tU	Average irradiation (bu) : 50 GWd/tU 60 tahun umur reaktor : 2560 spent fuel = 38.20 spent fuel/GWe/y



Gambar 5. Model perpindahan nuklida kecelakaan LOCA

Tabel 3. Parameter-parameter perpindahan nuklida untuk DBA atau DBC [7]

No.	Radionuklida	DBA atau DBC
1.	Fraksi gagal bahan bakar	30 %
2.	Fraksi lepasan nuklida dari celah (gap) : $G = G_0 \lambda^{-0,5}$	G_0 (%): Gas mulia : $2,5 \times 10^{-4}$; Volatil : $2,5 \times 10^{-4}$
3.	Lepasan dari bahan bakar, $F = F_0 \lambda^{b_f}$	F_0 (%) : Gas mulia : $4,0 \times 10^{-2}$ Volatil : $3,8 \times 10^{-2}$ b_f : Gas mulia : -0,29 Volatil : -0,17
4.	Fraksi lepasan dari inventori teras ke sistem pendingin	Gas mulia : 33 % Iodine : 0,02 %; Lainnya : 0,5 %
5.	Retensi nuklida di sistem pendingin reaktor, - <i>Reactor cooling system</i> , RCS	Fase kering Gas mulia : 0 %; Iodine : 70 % Lainnya : 90 % Fase basah Gas mulia : 0 %; Iodine : 70 % Lainnya : 90 %
6.	Sistem <i>spray</i> di sungkup	0,46 % untuk Iodine

Tabel 4. Radionuklida keluar dari sungkup reaktor PLTN PWR 1000 MWe

No.	Nuklida	Aktivitas keluar dari sungkup (Bq)	No.	Nuklida	Aktivitas keluar dari sungkup (Bq)
1.	Kr- 83M	5.78E+08	38.	Y- 90	3.03E+07
2.	Kr- 85	2.22E+08	39.	Y - 91	7.30E+07
3.	Kr- 85M	1.09E+09	40.	Y - 91M	4.23E+07
4.	Kr- 87	1.88E+09	41.	Y - 92	8.63E+07
5.	Kr- 88	2.63E+09	42.	Y - 93	1.11E+08
6.	Xe-133	1.39E+10	43.	Nb- 95	1.39E+08
7.	Xe-133M	4.62E+08	44.	Nb- 97	1.57E+08
8.	Xe-135	1.67E+09	45.	Zr- 95	1.39E+08
9.	Xe-135M	3.14E+09	46.	Zr-97	1.55E+08
10.	Xe-138	1.03E+10	47.	Mo- 99	1.77E+08
11.	I-130	6.24E+06	48.	Mo-101	1.73E+08
12.	I-131	5.80E+07	49.	Tc-99M	1.55E+08
13.	I-132	8.23E+07	50.	Tc-101	1.73E+08
14.	I-133	1.10E+08	51.	Ru-103	2.00E+08
15.	I-134	1.18E+08	52.	Ru-105	1.60E+08
16.	I-135	1.03E+08	53.	Ru-106	1.15E+08
17.	Rb -88	3.90E+07	54.	Rh-103M	1.80E+08
18.	Rb -89	4.83E+07	55.	Rh-105	1.35E+08
19.	Sr- 89	4.85E+07	56.	Te-127	1.27E+07
20.	Sr- 90	2.76E+07	57.	Te-127M	1.78E+06
21.	Sr- 91	7.28E+07	58.	Te-129	3.75E+07
22.	Sr- 92	8.55E+07	59.	Te-131	9.15E+07
23.	Sr- 93	1.07E+08	60.	Te-131M	1.72E+07
24.	Sb-125	2.38E+06	61.	Te-132	1.45E+08
25.	Sb-127	1.27E+07	62.	Te-133	1.11E+08
26.	Sb-129	3.80E+07	63.	Te-133M	6.56E+07
27.	Sb-131	8.14E+07	64.	Te-134	1.28E+08
28.	Ba-139	1.68E+08	65.	Cs-134	3.75E+07
29.	Ba-140	1.62E+08	66.	Cs-136	8.24E+06
30.	La-140	1.94E+08	67.	Cs-137	3.93E+07
31.	La-141	1.53E+08	68.	Cs-138	1.68E+08
32.	La-142	1.45E+08	69.	Ce-141	1.63E+08
33.	Pr-143	1.34E+08	70.	Ce-143	1.36E+08
34.	Pr-145	9.07E+07	71.	Ce-144	1.39E+08
35.	Pm-148M	2.65E+06	72.	Nd-147	6.43E+07
36.	Pm-149	4.09E+07	73.	Pm-147	3.37E+07
37.	Pm-151	2.33E+07	74.	Pm-148	2.28E+07

Berdasarkan postulasi kecelakaan dasar desain DBA (*Design Basis Accident*) yang dipicu oleh LOCA (*Lost of Coolant Accident*), pendinginan teras dan integritas pengungkung tidak terjaga, mengakibatkan bahan bakar di dalam teras gagal dan produk fisi yang terkungkung di dalam teras lepas ke sistem pendingin melalui celah antara kelongsong dan bahan bakar, dan akhirnya ke containment (sungkup). *Emergency Core Cooling System*

(ECCS) masih berfungsi, dan lepasan radionuklida dari inventori ke luar sungkup mengikuti asumsi parameter pada Tabel 3, hasil perhitungan pada Tabel 4.

Hasil Perhitungan Dispersi Radionuklida Ke Lingkungan

Mengikuti model pada Gambar 1, dengan diketahuinya source term yang lepas dari PWR 1000 MWe maka perhitungan dan pemodelan konsekuensi radiologis di lingkungan dapat dibuat. Perhitungan dilakukan dengan paket program PC-Cosyma. Dengan masukan data antara lain: *source term* yang ke luar dari sungkup reaktor, data meteorologi (arah angin, kecepatan, stabilitas, solar radiasi), data tapak (distribusi penduduk, distribusi hasil pertanian, peternakan, tingkat konsumsi produk lokal), data dispersi dan deposisi, dan model alur paparan (*pathway model*).

Dispersi radionuklida ke lingkungan, yang dihitung menggunakan persamaan (6) yaitu dengan model dispersi Gaussian [14], dipengaruhi oleh besarnya sourceterm, kecepatan angin, stabilitas cuaca, arah angin, jarak dan radius sebaran [19]. Dalam perhitungan pada penelitian ini arah angin dibagi dalam 16 arah atau sektor dengan perbedaan sudut setiap sektor 22,5°. Dengan menggunakan data kondisi cuaca di daerah tapak yang digunakan untuk simulasi (Bojanegara-Serang) [20,21], hasil perhitungan dispersi dan deposisi radionuklida terdapat di Tabel 5.

Dispersi radionuklida di atmosfer dipengaruhi oleh besarnya aktivitas, kondisi cuaca, sifat dan perilaku radionuklida yang bersangkutan. Radionuklida yang bersifat volatil lebih cepat dan terdispersi lebih jauh dibandingkan yang non-volatil. Sedangkan radionuklida yang terdeposisi selain dipengaruhi oleh jenis, sifat, dan perilakunya, juga dipengaruhi oleh jenis dan sifat media permukaan tanah di daerah tapak [19].

Tabel 5. Dispersi radionuklida ke lingkungan dari reaktor PWR 1000 MWe

Nuklida	Laju dispersi arah radial berbagai radius dari sumber (reaktor)					
	800 m		3000 m		5000 m	
	Tanah (Bq/m ²)	Udara (Bq s/m ³)	Tanah (Bq/m ²)	Udara (Bq s/m ³)	Tanah (Bq/m ²)	Udara (Bq s/m ³)
KR-85M	0.00E+0	2.14E+03	0.00E+00	7.23E+02	0.00E+0	4.72E+02
KR-87	0.00E+0	3.10E+03	0.00E+00	6.50E+02	0.00E+0	3.58E+02
KR-88	0.00E+0	4.95E+03	0.00E+00	1.50E+03	0.00E+0	9.44E+02
RB-88	3.35E+0	3.35E+03	1.62E+00	1.62E+03	1.03E+0	1.03E+03
RB-89	3.00E-03	3.00E+00	4.23E-05	4.23E-02	9.79E-06	9.79E-03
SR-89	1.02E-03	1.02E+00	4.08E-04	4.08E-01	2.79E-04	2.79E-01
SR-90	5.78E-04	5.78E-01	2.32E-04	2.32E-01	1.59E-04	1.59E-01
SR-91	1.48E-03	1.48E+00	5.41E-04	5.41E-01	3.58E-04	3.58E-01
SR-92	1.60E-03	1.60E+00	4.68E-04	4.68E-01	2.86E-04	2.86E-01
Y-90	6.59E-05	6.59E-02	2.91E-05	2.91E-02	2.07E-05	2.07E-02
Y-91	1.53E-04	1.53E-01	6.14E-05	6.14E-02	4.22E-05	4.22E-02
Y-92	3.07E-04	3.07E-01	2.13E-04	2.13E-01	1.59E-04	1.59E-01
Y-93	2.26E-04	2.26E-01	8.31E-05	8.31E-02	5.52E-05	5.52E-02
ZR-95	2.91E-04	2.91E-01	1.17E-04	1.17E-01	7.99E-05	7.99E-02
ZR-97	3.19E-04	3.19E-01	1.22E-04	1.22E-01	8.17E-05	8.17E-02
NB-95	2.91E-04	2.91E-01	1.17E-04	1.17E-01	8.00E-05	8.00E-02
MO-99	3.69E-03	3.69E+00	1.46E-03	1.46E+00	9.96E-04	9.96E-01
MO-101	1.02E-03	1.02E+00	1.27E-05	1.27E-02	2.81E-06	2.81E-03
TC-99M	3.24E-03	3.24E+00	1.30E-03	1.30E+00	8.88E-04	8.88E-01
RU-103	4.19E-03	4.19E+00	1.68E-03	1.68E+00	1.15E-03	1.15E+00
RU-105	3.13E-03	3.13E+00	1.04E-03	1.04E+00	6.61E-04	6.61E-01

RU-106	2.41E-03	2.41E+00	9.66E-04	9.66E-01	6.62E-04	6.62E-01
RH-105	2.83E-03	2.83E+00	1.14E-03	1.14E+00	7.77E-04	7.77E-01
SB-125	4.98E-04	4.98E-01	2.00E-04	2.00E-01	1.37E-04	1.37E-01
SB-127	2.65E-03	2.65E+00	1.05E-03	1.05E+00	7.19E-04	7.19E-01
SB-129	7.41E-03	7.41E+00	2.44E-03	2.44E+00	1.56E-03	1.56E+00
SB-131	7.62E-03	7.62E+00	3.34E-04	3.34E-01	1.09E-04	1.09E-01
TE-127	2.65E-03	2.65E+00	1.04E-03	1.04E+00	7.12E-04	7.12E-01
TE-129	7.51E-03	7.51E+00	2.60E-03	2.60E+00	1.68E-03	1.68E+00
TE-131	1.50E-02	1.50E+01	1.53E-03	1.53E+00	5.97E-04	5.97E-01
TE-132	3.03E-02	3.03E+01	1.20E-02	1.20E+01	8.19E-03	8.19E+00
TE-133	5.27E-03	5.27E+00	3.57E-05	3.57E-02	6.67E-06	6.67E-03
TE-134	1.70E-02	1.70E+01	1.96E-03	1.96E+00	8.69E-04	8.69E-01
I-131	1.08E-01	1.19E+01	3.60E-02	4.06E+00	2.01E-02	2.33E+00
I-132	1.72E-01	1.86E+01	7.51E-02	7.92E+00	4.86E-02	5.10E+00
I-133	2.02E-01	2.23E+01	6.49E-02	7.33E+00	3.58E-02	4.16E+00
I-134	2.17E-01	2.33E+01	4.84E-02	5.09E+00	2.32E-02	2.44E+00
I-135	1.83E-01	2.02E+01	5.40E-02	6.09E+00	2.89E-02	3.35E+00
XE-133	0.00E+0	2.91E+04	0.00E+00	1.18E+04	0.00E+0	8.28E+03
XE-135	0.00E+0	3.39E+03	0.00E+00	1.26E+03	0.00E+0	8.56E+02
XE-138	0.00E+0	5.85E+03	0.00E+00	6.57E+01	0.00E+0	1.44E+01
CS-134	7.75E-03	7.75E+00	3.11E-03	3.11E+00	2.13E-03	2.13E+00
CS-136	1.72E-03	1.72E+00	6.89E-04	6.89E-01	4.72E-04	4.72E-01
CS-137	8.23E-03	8.23E+00	3.30E-03	3.30E+00	2.26E-03	2.26E+00
CS-138	4.97E+0	4.97E+03	7.42E-01	7.42E+02	3.06E-01	3.06E+02
BA-139	2.81E-03	2.81E+00	6.09E-04	6.09E-01	3.34E-04	3.34E-01
BA-140	3.39E-03	3.39E+00	1.36E-03	1.36E+00	9.28E-04	9.28E-01
LA-140	4.29E-04	4.29E-01	1.97E-04	1.97E-01	1.41E-04	1.41E-01
LA-141	2.96E-04	2.96E-01	9.57E-05	9.57E-02	6.05E-05	6.05E-02
CE-141	3.41E-04	3.41E-01	1.37E-04	1.37E-01	9.38E-05	9.38E-02
CE-143	2.82E-04	2.82E-01	1.10E-04	1.10E-01	7.48E-05	7.48E-02
CE-144	2.91E-04	2.91E-01	1.17E-04	1.17E-01	8.00E-05	8.00E-02
PR-143	2.81E-04	2.81E-01	1.13E-04	1.13E-01	7.71E-05	7.71E-02
ND-147	1.35E-04	1.35E-01	5.38E-05	5.38E-02	3.68E-05	3.68E-02
PM-147	7.06E-05	7.06E-02	2.83E-05	2.83E-02	1.94E-05	1.94E-02

Nuklida	Laju dispersi arah radial berbagai radius dari sumber (reaktor)			
	10.000 m		20.000 m	
	Tanah (Bq/m ²)	Udara (Bq s/m ³)	Tanah (Bq/m ²)	Udara (Bq s/m ³)
KR-85M	0.00E+0	3.94E+01	0.00E+00	1.18E+0
KR-87	0.00E+0	5.70E+00	0.00E+00	6.83E-04
KR-88	0.00E+0	5.07E+01	0.00E+00	4.12E-01
RB-88	7.76E-02	5.60E+01	5.50E-04	4.56E-01
RB-89	2.04E-10	1.98E-07	8.31E-23	2.57E-20
SR-89	7.73E-05	5.02E-02	1.27E-05	1.15E-02
SR-90	4.41E-05	2.86E-02	7.31E-06	6.62E-03
SR-91	6.32E-05	4.20E-02	3.79E-06	3.40E-03
SR-92	1.83E-05	1.34E-02	9.02E-08	7.37E-05
Y-90	8.30E-06	5.32E-03	2.20E-06	2.00E-03
Y-91	1.18E-05	7.63E-03	1.96E-06	1.77E-03

Y-92	3.60E-05	2.39E-02	7.64E-07	6.64E-04
Y-93	9.99E-06	6.63E-03	6.38E-07	5.72E-04
ZR-95	2.21E-05	1.44E-02	3.65E-06	3.30E-03
ZR-97	1.75E-05	1.15E-02	1.65E-06	1.48E-03
NB-95	2.22E-05	1.44E-02	3.68E-06	3.33E-03
MO-99	2.59E-04	1.68E-01	3.71E-05	3.35E-02
MO-101	4.26E-11	4.13E-08	6.53E-24	2.02E-21
TC-99M	2.38E-04	1.55E-01	3.51E-05	3.18E-02
RU-103	3.18E-04	2.06E-01	5.21E-05	4.72E-02
RU-105	7.20E-05	4.98E-02	1.38E-06	1.20E-03
RU-106	1.84E-04	1.19E-01	3.04E-05	2.75E-02
RH-105	2.04E-04	1.32E-01	2.68E-05	2.42E-02
SB-125	3.80E-05	2.47E-02	6.30E-06	5.70E-03
SB-127	1.90E-04	1.24E-01	2.84E-05	2.57E-02
SB-129	1.65E-04	1.15E-01	2.97E-06	2.59E-03
SB-131	3.56E-08	3.45E-05	6.09E-17	1.88E-14
TE-127	1.84E-04	1.20E-01	2.67E-05	2.41E-02
TE-129	1.87E-04	1.29E-01	3.38E-06	2.95E-03
TE-131	5.19E-07	5.02E-04	5.14E-15	1.59E-12
TE-132	2.15E-03	1.40E+00	3.15E-04	2.85E-01
TE-133	2.33E-11	2.26E-08	4.25E-26	1.31E-23
TE-134	3.03E-06	2.87E-03	6.16E-12	1.97E-09
I-131	2.18E-03	2.67E-01	2.41E-04	3.95E-02
I-132	1.09E-02	1.04E+00	2.43E-03	2.41E-01
I-133	3.28E-03	4.01E-01	2.36E-04	3.85E-02
I-134	1.85E-04	1.91E-02	1.34E-09	1.14E-07
I-135	1.80E-03	2.20E-01	4.57E-05	7.40E-03
XE-133	0.00E+00	1.63E+03	0.00E+00	4.15E+2
XE-135	0.00E+00	1.10E+02	0.00E+00	1.04E+1
XE-138	0.00E+00	1.68E-04	0.00E+00	4.21E-18
CS-134	5.91E-04	3.84E-01	9.80E-05	8.86E-02
CS-136	1.29E-04	8.39E-02	2.08E-05	1.88E-02
CS-137	6.28E-04	4.07E-01	1.04E-04	9.42E-02
CS-138	4.83E-04	4.64E-01	8.64E-11	2.69E-08
BA-139	6.91E-06	5.79E-03	1.75E-09	9.62E-07
BA-140	2.54E-04	1.65E-01	4.08E-05	3.69E-02
LA-140	6.16E-05	3.94E-02	1.69E-05	1.53E-02
LA-141	5.88E-06	4.11E-03	8.48E-08	7.33E-05
CE-141	2.60E-05	1.68E-02	4.25E-06	3.85E-03
CE-143	1.82E-05	1.19E-02	2.26E-06	2.04E-03
CE-144	2.22E-05	1.44E-02	3.68E-06	3.32E-03
PR-143	2.14E-05	1.39E-02	3.52E-06	3.18E-03
ND-147	1.01E-05	6.52E-03	1.61E-06	1.45E-03
PM-147	5.39E-06	3.50E-03	8.93E-07	8.08E-04

Jenis dan aktivitas radionuklida yang terdispersi dan yang terdeposisi mempengaruhi alur paparan (*pathway*) penerimaan dosis radiasi pada manusia dan lingkungan, dan jangka waktu penerimaan dosis yaitu dosis jangka pendek (*short term dose*) dan dosis jangka panjang (*long term dose*). Aktivitas radionuklida yang terdispersi di atmosfer akan mengakibatkan konsekuensi radiologis eksternal dan internal (*inhalasi dan imersi*) penerimaan dosis jangka pendek.

Sedangkan radionuklida yang terdeposisi di permukaan tanah menyebabkan konsekuensi radiologis penerimaan dosis jangka panjang yaitu dari alur paparan eksternal dan interna (*ingesti*). Jenis dan aktivitas radionuklida yang terdispersi dan terdeposisi di daerah tapak untuk 5 jarak radius (800 m, 3000 m, 5000 m, 10.000 m dan 20.000 m) terdapat pada Tabel 6.

Hasil Perhitungan Dosis Radiasi (*Short term Dose*)

Perhitungan konsekuensi radiologis untuk penerimaan dosis radiasi efektif (untuk semua alur paparan) menggunakan persamaan (7) dan (8) untuk jangka waktu 1 hari setelah lepasan (*short term dose*) tercantum pada Tabel 6. Dosis efektif rata-rata berdasarkan radius terdapat pada Tabel 7.

Tabel 6. Dosis Efektif Individual 1 hari untuk setiap sektor dan radius

Dosis Efektif Individual 1 hari (Sv)								
Radius (km)	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8
0.8	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.16E-10
3	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.54E-12
5	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	6.96E-11
10	0.00E+00	0.00E+00	2.74E-16	4.04E-14	1.13E-12	2.92E-12	1.08E-11	0.00E+00
20	0.00E+00	0.00E+00	1.22E-17	6.24E-14	1.81E-12	4.92E-13	3.68E-14	0.00E+00
Dosis Efektif Individual 1 hari (Sv)								
Radius (km)	Sektor 9	Sektor 10	Sektor 11	Sektor 12	Sektor 13	Sektor 14	Sektor 15	Sektor 16
0.8	3.48E-09	3.16E-10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
3	6.48E-10	3.91E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	3.06E-10	1.69E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Tabel 7. Dosis rata-rata Individual 1 hari untuk setiap radius dan organ

Dosis rata-rata Individual 1 hari (Sv)								
Radius (km)	Efektif	Thyroid	Lensa Mata	Ovarium	Kulit	Paru-paru	Sumsum Tulang	Tulang rusuk
0.8	2.57E-10	2.91E-10	2.51E-10	1.94E-10	9.55E-10	2.84E-10	2.17E-10	2.15E-10
3	4.12E-11	4.47E-11	3.66E-11	2.87E-11	2.35E-10	4.99E-11	3.19E-11	3.41E-11
5	2.35E-11	2.52E-11	2.11E-11	1.64E-11	1.24E-10	2.89E-11	1.82E-11	1.99E-11
10	9.30E-13	1.85E-12	8.22E-13	5.82E-13	5.64E-12	1.23E-12	6.50E-13	8.91E-13
20	1.50E-13	3.58E-13	1.20E-13	7.50E-14	1.40E-12	2.33E-13	8.38E-14	1.68E-13

Hasil Perhitungan Dosis Radiasi (*Longterm Dose*)

Hasil perhitungan untuk dosis radiasi jangka panjang terdapat pada Tabel 8. Perhitungan dosis jangka panjang dihitung untuk penerimaan setelah kejadian satu tahun sampai 50 tahun. Penerimaan dosis berasal dari radionuklida yang terdeposisi di tanah, dan umumnya dari pathway eksternal (paparan dari permukaan tanah) dan *pathway foodstuff* (makanan)

Tabel 8 . Dosis individual long term efektif setiap sektor dan radius

Dosis individual long term efektif untuk 50 tahun (Sv)								
Radius (km)	Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4	Sektor 5	Sektor 6	Sektor 7	Sektor 8
0.8	6.09E-15	1.05E-14	1.75E-14	2.62E-14	3.32E-14	3.43E-14	2.88E-14	3.55E-10
3	1.27E-15	9.56E-15	6.49E-14	2.94E-13	7.14E-13	8.33E-13	3.23E-12	3.77E-11
5	0.00E+00	4.84E-15	1.17E-13	1.44E-12	6.31E-12	8.21E-12	4.59E-11	2.42E-09
10	0.00E+00	0.00E+00	6.36E-14	8.96E-12	1.67E-10	4.01E-10	2.00E-09	7.25E-10
20	0.00E+00	0.00E+00	6.80E-15	2.06E-11	4.02E-10	9.90E-11	1.45E-11	1.62E-13
Dosis individual long term efektif untuk 50 tahun								
Radius (km)	Sektor 9	Sektor 10	Sektor 11	Sektor 12	Sektor 13	Sektor 14	Sektor 15	Sektor 16
0.8	5.90E-08	3.55E-10	4.30E-15	2.86E-15	2.26E-15	2.19E-15	2.62E-15	3.73E-15
3	2.12E-08	4.03E-12	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
5	1.09E-08	3.70E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
10	5.00E-13	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
20	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

Dosis individual jangka panjang yang diterima oleh organ tubuh manusia dipengaruhi oleh jenis, perilaku, waktu paruh dan aktivitas radionuklida yang terdeposisi dan berpindah melalui rantai makanan menuju manusia *via pathway* makanan dan *pathway* paparan langsung.

Hasil perhitungan Dosis Kolektif

Dosis kolektif dihitung dari besarnya dosis individu dikalikan dengan jumlah penduduk yang mendiami suatu daerah. Hasil perhitungan dosis kolektif untuk berbagai organ dan *pathway* terdapat pada Tabel 9.

Tabel 9. Dosis kolektif untuk 50 tahun berdasarkan *pathway*

Dosis Kolektif untuk 50 tahun berdasarkan <i>pathway</i>						
Organ	Dosis (Orang Sv)	<i>Pathway</i>				
		Awan	Tanah	Inhalasi	Ingesi	Resuspensi
Sumsum Tulang	1.63E-05	8	30	4	58	0
Tulang	2.81E-05	6	19	4	72	0
Payudara	3.86E-06	19	65	4	12	0
Paru-paru	1.45E-05	9	36	47	7	0
Perut	7.98E-06	16	58	12	14	0
Usus	9.36E-06	13	48	13	27	0
Liver	7.42E-06	17	63	5	15	0
Pancreas	7.07E-06	17	61	6	17	0
Thyroid	1.23E-05	13	47	23	18	0
Gonads	7.49E-06	16	64	5	15	0
Remainder	8.16E-06	17	63	5	15	0
Efektif	1.03E-05	13	48	15	24	0

Pemodelan dan analisis sebaran radionuklida dan konsekuensi radiologis untuk simulasi tapak contoh daerah Bojanegara-Kramatwatu Pantai Serang – Banten telah bisa dilakukan dengan menggunakan, menghasilkan model sebaran radionuklida dan

konsekuensi radiologis di lingkungan tapak Bojanegara-Serang, dengan penerimaan dosis radiasi di bawah batas yang diijinkan badan regulator BAPETEN [22].

KESIMPULAN

Pemodelan dan simulasi sebaran radionuklida dan konsekuensi radiologis PLTN 1000 MWe dalam kondisi LOCA besar untuk tapak contoh di Bojanegara-Kramatwatu Pantai Serang-Banten telah dilakukan. Dengan menggunakan data suku sumber, data meteorologi Serang, data dispersi (sebaran penduduk, produksi pertanian dan ternak), dan modeling alur paparan (*pathway*), dihasilkan model konsekuensi radiologis di lingkungan tapak Bojanegara-Serang, dengan penerimaan dosis radiasi di bawah batas yang diijinkan badan regulator BAPETEN.

Pemodelan sebaran radionuklida dan konsekuensi radiologis akibat dispersi radionuklida dari kondisi abnormal pengoperasian PLTN, bergantung pada tingkat abnormalitas kejadian, jenis reaktor PLTN, dan kondisi lokal tapak PLTN (kondisi cuaca, topografi, distribusi penduduk, produksi dan konsumsi produk lokal dari pertanian dan ternak).

DAFTAR PUSTAKA

1. Ristek. Program penelitian dan pengembangan IPTEK. Agenda Riset Nasional 2006-2009. Dewan Riset Nasional. Jakarta; 2006.
2. Soetrisnanto, A.Y. Perencanaan energi nasional opsi nuklir. Prosiding seminar ke-8 Teknologi Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir; Jakarta; 2002. p. 1-20
3. IAEA. Application of probabilistic safety assessment (PSA) for nuclear power Plant. IAEA-TECDOC-1200. Vienna; 2001.
4. IAEA. Review of probabilistic safety assessment by regulatory bodies – safety report series No. 25. Vienna; 2002.
5. IAEA. The level 3 PSA standard covers all of procedures in a level 3 PSA, PSA Standard (2/2). Viena; 2009.
6. Pande, M.U. Analisis perpindahan nuklida dari inventori teras ke sungkup untuk kondisi DBC dan DEC. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III, ISSN 1979-1278; Juni 2008; Banten, Serang; 2008.
7. European Commission. Determination of the in-containment source term for a large-break loss of coolant accident. EUR 19841 EN; 2001.p. 2 - 19
8. Kim, S.U and Kang, C.S. Evaluation of radioactive source terms in the system-integrated modular advanced reactor. Journal of the Korean Nuclear Society. 1999; 31: 23 - 35
9. IRSN. Research and development with regard to severe accidents in pressurised water reactors. Summary and Outlook, Rapport IRSN-France; 2007. p. 4 - 14
10. Stephenson W., Dutton L.M.C., Handy B.J., and Smedley C. realistic methods for calculating the release and consequences of large LOCA. EUR 14179EN, Commission of the European Communities; 1992. p. 1 - 3.
11. Soffer, L. et al. Accident source term for light water nuclear power plant. Final report. NUREG-1465. US-NUREC. Washington ;1995. p. 5 - 15
12. Pande, M.U, Kuntjoro, S. Analisis karakteristik sumber dari reaktor PWR

- kapasitas 1000 Mwe pada operasi 3 tahun. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir, Tri Dasa Mega* ISSN 1411-240X. 2008; 10: 94 – 5.
13. IAEA. Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment. Safety series No.19, STI/PUB/1103. Vienna; 2001. p. 20 -25
 14. IAEA. Atmospheric dispersion in nuclear power plant. Safety Series No. 50-SG-3 IAEA. Vienna; 1980. p. 27 - 35
 15. Allen G., CROFF. ORIGEN 2: A versatile computer code for calculating the nuclide compositions and characteristics of nuclear materials. *Nuclear Technology*. 1983; 62: 3 -5.
 16. Emerald. A program for the calculation of activity releases and potential doses from a pressurized water reactor plant. Argonne Code Center, Illinois; 1971.
 17. PC Cosyma, European Commission. PC Cosyma, version 2.0. user guide, national radiological protection board. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH; 1995. p. 10 – 30.
 18. Westinghouse. AP-1000 design overview. Westinghouse Electric Company; 2009.
 19. Pande, M.U. Analisis dispersi radiasi atmosferic pengoperasian reaktor daya ringan LWR. *Prosiding Seminar Nasional ke -14 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir*, No. ISSN 0854-2910; Bandung; 2008.
 20. BMG Data Meteorologi Kabupaten Serang 2008-2009. Serang ;2010
 21. BPS. Potensi desa (PODES) propinsi Banten 2008-2009. Biro Pusat Statistik. Banten; 2010
 22. Bapeten. Ketentuan keselamatan kerja. SK No.1 Ka. BAPETEN, Jakarta; 1999.