

PEMANTAUAN LINGKUNGAN PADA KEGIATAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

Sutarman

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN

- Jalan Cinere Pasar Jumat, Jakarta – 12440
- PO Box 7043 JKSKL, Jakarta – 12070

PENDAHULUAN

Kemajuan tingkat kehidupan suatu bangsa biasanya dilihat dari peningkatan kebutuhan energi listrik oleh masyarakat. Jumlah penduduk yang terus meningkat memerlukan energi listrik untuk membantu dalam memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari, misalnya untuk kegiatan rumah-tangga, komersil, industri, dan transportasi.

Energi listrik tidak tersedia dalam bentuk siap pakai, namun dapat diperoleh dari sumber daya alam melalui berbagai proses konversi dari beberapa pembangkit, misalnya Pusat Listrik Tenaga Air (PLTA) menggunakan sumber daya alam air, Pusat Listrik Tenaga Uap (PLTU) menggunakan sumber daya alam batubara atau minyak atau gas, Pusat Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menggunakan bahan bakar nuklir (uranium), dan masih banyak lagi sumber daya alam yang dapat dipakai untuk pembangkit energi listrik (angin, matahari, panas bumi, gelombang laut, dan biomasa). Seluruh kegiatan pembangkit energi listrik dapat menimbulkan dampak negatif terhadap manusia dan lingkungan.

Dampak lingkungan yang harus diwaspadai, antara lain penipisan cadangan sumber daya alam, penurunan kualitas lingkungan, dan gangguan kesehatan masyarakat akibat limbah yang ditimbulkannya. Setiap jenis pembangkit energi listrik menghasilkan sejumlah limbah yang merupakan sisa bahan yang tidak terpakai atau termanfaatkan. Limbah ini berwujud

fisik dengan komposisi kimia yang beraneka-ragam. Pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil (minyak, gas, dan batubara) dapat menimbulkan sejumlah limbah antara lain CO₂, NO₂, CO, SO₂, debu (*fly ash*), yang mengandung logam berat (As, Hg, Pb, dan Cd), zat radioaktif alam seperti ²³⁸U, ²³²Th beserta anak luruhnya serta ⁴⁰K. Pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar nuklir juga menghasilkan limbah dalam bentuk padat, cair, dan gas yang mengandung zat radioaktif misalnya ³H, ¹³⁷Cs, ¹³¹I, ⁹⁰Sr, dan gas mulia (krypton dan xenon).

Sesuai dengan azas keselamatan nuklir, limbah radioaktif tersebut harus dikelola dengan baik agar tidak membahayakan para pekerja, masyarakat, dan lingkungan. Salah satu pengawasan zat radioaktif yang terlepas ke lingkungan akibat pengoperasian PLTN adalah dengan pemantauan lingkungan secara periodik, tidak hanya selama masa operasi saja, tetapi juga pada masa sebelum dan setelah masa operasi.

Pemantauan lingkungan adalah kegiatan pengamatan tingkat radioaktivitas dan radiasi termasuk zat non radioaktif dalam berbagai ekosistem di sekitar kawasan PLTN dan laboratorium-laboratorium penunjangnya (misalnya laboratorium produksi isotop dan pengelolaan limbah). Tujuan pemantauan tersebut untuk mengamati dan memeriksa apakah kegiatan PLTN dan laboratorium-laboratorium penunjangnya berlangsung secara aman dan terkendali seperti yang dipersyaratkan untuk

memperkirakan dampak radiologi dan untuk meyakinkan kepada masyarakat (publik) bahwa pengoperasian PLTN dan laboratorium-laboratoriumnya adalah aman dipandang dari segi lepasan zat radioaktif ke lingkungan. Dengan demikian tujuan dari pemantauan lingkungan tersebut adalah melindungi masyarakat dan lingkungan pada saat ini dan masa mendatang akibat potensi dampak radiologi yang mungkin dapat ditimbulkan oleh limbah radioaktif dari pengoperasian PLTN. Dalam makalah ini hanya akan dibahas pemantauan zat radioaktif yang lepas dari cerobong PLTN ke lingkungan pada keadaan operasi normal.

DISTRIBUSI ZAT RADIOAKTIF KE LINGKUNGAN

Distribusi zat radioaktif dari instalasi nuklir atau Pusat listrik Tenaga Nuklir (PLTN) sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain faktor meteorologi dan topografi setempat.

Faktor Meteorologi

Pengamatan parameter meteorologi pada umumnya dikelompokkan menjadi dua, yaitu data meteorologi umum (suhu udara, aliran udara, curah hujan, dan kelembaban) dan data meteorologi khusus untuk kepentingan turbulensi (suhu udara, radiasi matahari, fluktuasi arah angin, dan kecepatan angin pada ketinggian yang berbeda). Data meteorologi yang dikumpulkan harus cukup untuk menyajikan kondisi meteorologi mikro atau lokal. Paling sedikit data meteorologi dikumpulkan selama satu tahun, yaitu pada musim hujan dan musim kemarau. Pada umumnya pengamatan parameter meteorologi dilakukan setiap jam dan setiap waktu untuk merekam data sedikitnya 10 menit setiap jam. Peralatan juga disiapkan untuk merekam data yang kontinyu guna menjamin kelayakan data. Data dapat ditampilkan secara grafik atau angka (digital). Jika data yang dipakai dalam bentuk digital, sebaiknya pemeriksaan dilakukan paling sedikit setiap menit [1].

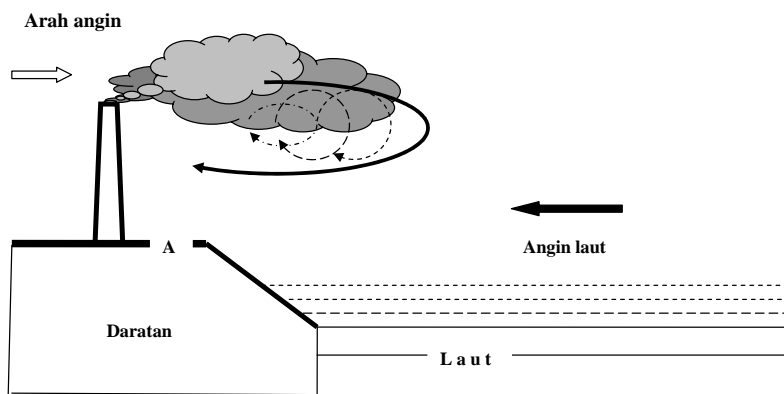
Faktor Topografi

Topografi adalah gambaran suatu daerah yang tidak homogen (ketidakteraturan lahan) sehingga aliran udara dapat dibedakan dalam dua hal, yaitu daerah rendah (dataran rendah) di mana angin secara lokal dipengaruhi kondisi lahan dan daerah atas (dataran tinggi) di mana secara lokal angin tidak dipengaruhi oleh kondisi lahan. Jika distribusi zat radioaktif yang lepas dari cerobong terjadi di daerah rendah maka angin secara lokal dipengaruhi oleh struktur lahan setempat, misalnya bukit, gunung, lembah, dan rintangan (bangunan-bangunan/gedung tinggi). Kondisi lahan seperti di atas dapat mempengaruhi pola dispersi polutan yang dapat dilihat dalam bentuk kepulan asap (*plume*) yang lepas ke lingkungan [2].

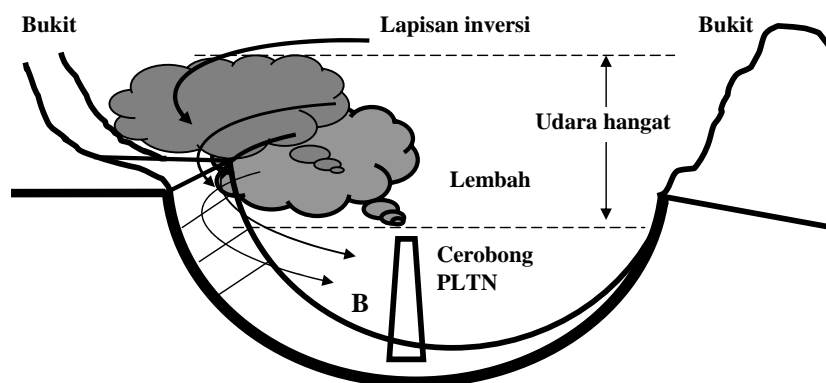
Kondisi topografi dapat menimbulkan terjadinya angin lokal, seperti angin laut, angin darat, angin lembah, dan angin gunung. Angin lokal tersebut sangat mempengaruhi distribusi zat radioaktif ke lingkungan. Oleh karena itu dengan adanya variasi konfigurasi daerah yang tidak homogen maka pengukuran parameter meteorologi disesuaikan dengan kondisi daerah pengamatan.

Jika PLTN dibangun di dekat pantai, maka distribusi zat radioaktif yang terlepas ke lingkungan dipengaruhi oleh angin darat dan angin laut. Pada Gambar 1 terlihat arah angin yang bertiup di daerah ini bergantung pada posisi matahari, sehingga angin bertiup menuju darat sepanjang siang hari (angin laut) dan menuju laut sepanjang malam hari (angin darat). Angin laut dapat bertiup menuju ke darat mencapai beberapa kilometer dari garis pantai. Sementara angin darat yang bertiup menuju ke laut akan mengumpul naik ke atas dan terdapat aliran lain yang arahnya ke bawah di atas permukaan laut. Akumulasi polutan terjadi pada lokasi di mana aliran udara yang bertentangan bertemu, yaitu di titik A [2,3].

Jika PLTN dibangun di atas bukit atau lembah, maka distribusi zat radioaktif ke lingkungan dipengaruhi oleh angin gunung (malam hari) dan angin lembah (siang hari). Pada



Gambar 1. Distribusi zat radioaktif ke lingkungan yang dipengaruhi oleh angin laut.



Gambar 2. Distribusi zat radioaktif ke lingkungan yang dipengaruhi oleh lembah.

malam hari dengan langit yang cerah dan bila angin bertiup lemah, maka akan timbul suatu gejala yang disebut angin katabatik yang biasanya terjadi pada lahan yang landai. Jika suhu udara dekat permukaan bumi dingin dan kerapatan udara bertambah, maka udara akan mengalir ke arah bukit (lereng). Bila salah satu sisi lembah merupakan suatu lereng, maka akan terjadi suatu akumulasi udara dingin pada lembah tersebut. Dengan demikian kepul asap yang berasal dari cerobong PLTN yang mungkin berada di lembah akan memperoleh aliran angin katabatik dan dikembalikan pada dasar lembah. Kombinasi yang terjadi antara udara hangat di atas lembah dan udara dingin di dasar lembah menyebabkan terjadinya suhu inversi. Kepulan asap yang berada di lapisan suhu inversi dan polutan yang terjadi di lembah menyebabkan kadar zat

radioaktif menjadi relatif tinggi. Kondisi seperti ini sangat berbahaya dan keadaan akan semakin buruk bila angin yang bertiup melewati lembah sangat lemah dan kemudian polutan yang akan terhambat pada puncak lembah tersebut. Gambar 2 menunjukkan akumulasi polutan pada puncak lembah ditunjukkan pada titik B [2,3].

Model Dispersi Atmosfer

Tujuan pemodelan dispersi atmosfer pada PLTN, antara lain untuk menghitung kadar normal radioaktif lepasan dari sebuah cerobong PLTN dalam jangka pendek (beberapa jam) dan jangka panjang (tahunan). Kadar normal adalah perbandingan antara kadar yang sebenarnya dengan nilai lepasan zat radioaktif dari cerobong PLTN ke lingkungan. Model-model yang disajikan di sini dapat dipakai dalam kondisi parameter meteorologi berubah secara cepat

terhadap ruang dan waktu.

Rumusan untuk perhitungan dispersi atmosfer dinyatakan secara teoritis menggunakan tiga pendekatan yaitu transfer gradien, teori statistika, dan analisis dimensi. Setiap analisis mempunyai batasan-batasan tersendiri. Dalam perhitungan dispersi atmosfer, perbedaan jenis sumber polusi biasanya diklasifikasikan dalam bentuk konfigurasi ruang dan waktu. Sumber polusi yang sesungguhnya dari lepasan unsur-unsur radioaktif dari cerobong PLTN ke lingkungan bukan berupa sumber titik semata, tetapi berupa volume besar, namun untuk mempermudah perhitungan secara matematika biasanya sumber polusi dianggap sebuah titik yang terbatas. Secara teoritis persamaan dispersi

atmosfer kepulan asap berdasarkan analogi difusi molekuler yang ditulis sebagai berikut [1] :

$$\chi(x', y', z', t) = Q_0 (4\pi t)^{-3/2} (K_x, K_y, K_z)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{4t} \left(\frac{x'^2}{K_x} + \frac{y'^2}{K_y} + \frac{z'^2}{K_z}\right)\right] \dots\dots\dots (1)$$

dengan χ adalah kadar zat radioaktif pada titik (x', y', z') yang lepas ke lingkungan selama waktu t yang mengacu pada sistem koordinat pada pusat awan yang bergerak dengan koordinat x', y', z' berturut-turut sesuai arah angin bawah, horisontal dan vertikal. Q_0 adalah kekuatan lepasan dari sumber polutan, jumlah lepasan dalam satuan curie per meter kubik (Ci/m^3) atau dalam satuan Bequerel per m^3 (Bq/m^3), dan K_i ($i = x', y', z'$) adalah koefisien difusi atmosfer.

Persamaan (1) dapat dimodifikasi menjadi persamaan (2) dengan menganggap sumber polutan sebagai sebuah titik yang melepaskan zat radioaktif secara kontinyu dengan kekuatan Q tanpa ada interferensi dengan tanah, sebagai berikut :

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

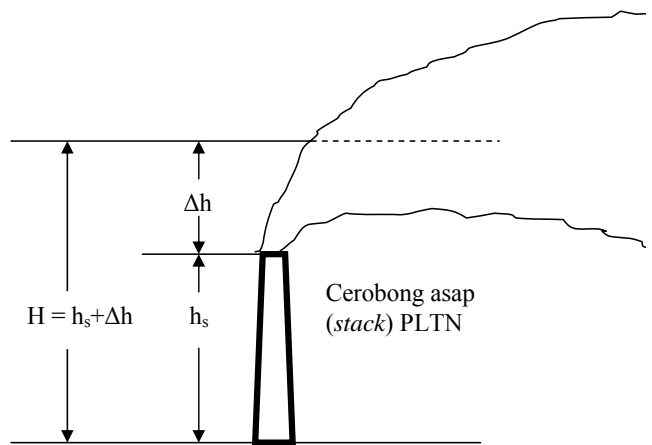
Q juga kadang-kadang disebut laju emisi (Ci/s), kecepatan angin rata-rata U (m/s) yang diukur pada tingkat kepulan asap dan $\bar{\chi}(x, y, z)$ adalah kadar zat radioaktif rata-rata (Ci/m^3) yang lepas ke lingkungan pada posisi (x, y, z) . Harga σ_y dan σ_z masing-masing menyatakan simpangan baku horisontal dan vertikal yang ditentukan dari percobaan. Hasil percobaan disajikan dalam bentuk grafik koefisien dispersi horisontal sebagai fungsi jarak angin bawah (*downwind*) dari sumber polutan (m) dalam kondisi kelas stabilitas tertentu. Menurut Pasquill - Gifford [1], kondisi kelas dapat ditentukan dalam berbagai metode, bergantung dari kondisi kekasaran (*roughness*) di lapangan, misalnya berupa dataran

tinggi/rendah, radiasi matahari, dan kecepatan angin rata-rata.

Persamaan dispersi untuk sumber titik di atas tanah dengan sumber polutan yang kontinyu pada tinggi efektif H dapat diturunkan dari persamaan (2), sebagai berikut :

$$\bar{\chi}(x, y, z; H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (3)$$

dengan H adalah tinggi emisi efektif ($H = h_s + \Delta h$), h_s adalah tinggi cerobong dan Δh adalah tinggi kepulan asap yang dapat dilukiskan pada Gambar 3.



Gambar 3. Model dispersi atmosfer pada PLTN [1].

Jika perhitungan kadar zat radioaktif rata-rata dilakukan di atas permukaan tanah ($z = 0$), maka persamaan (3) menjadi sebagai berikut [3] :

$$\bar{\chi}(x, y, 0; H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right\} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (4)$$

Jika $y = 0$ maka persamaan (4) menjadi lebih sederhana :

$$\bar{\chi}(x,0,0;H) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right] \dots\dots\dots (5)$$

Jika (σ_y/σ_z) tidak berubah secara cepat, maka kadar maksimum polutan di atas tanah dapat diperoleh dari persamaan (5) sebagai berikut :

$$\bar{\chi}_{mak.} = \frac{Q}{\pi eUH^2} \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \dots\dots\dots (6)$$

dengan $e = 2,718$ dan jarak angin bawah untuk kadar zat radioaktif maksimum ($\bar{\chi}_{mak.}$) yang terjadi pada $\sigma_z = \frac{H}{\sqrt{2}}$. Persamaan (6) dipakai untuk memperkirakan kadar polutan maksimum pada jarak x dari sumber polutan dengan tinggi cerobong H .

Jika tinggi cerobong PLTN sekitar 2,5 kali tinggi bangunan gedung yang terdekat dengan polutan dan kondisi netral atau tidak stabil, maka Δh dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan : [1]

$$\Delta h = 3 \frac{W_o}{u} . D_i \dots\dots\dots (7)$$

dengan W_o adalah kecepatan lepasan polutan (m/s), u adalah kecepatan angin pada ketinggian cerobong PLTN (m/s), dan D_i adalah ukuran diameter cerobong PLTN (m).

Jika sumber polutan berada di atas tanah, tidak ada kepul asap efektif yang muncul dari cerobong ($H=0$), maka persamaan (5) menjadi :

$$\bar{\chi}(x,0,0;0) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU}$$

atau $\bar{\chi}_{mak.} = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_zU} \dots\dots\dots (8)$

Rumus-rumus tersebut biasanya dipakai untuk memperkirakan lepasan kadar dan jarak maksimum zat radioaktif dari cerobong asap PLTN pada waktu pembuatan analisis dampak lingkungan dan pra operasi, misalnya jatuhnya zat radioaktif dari cerobong asap PLTN yang lepas ke lingkungan sudah dapat diperhitungkan sehingga tidak mungkin zat radioaktif tersebut jatuh di daerah pemukiman yang padat penduduknya. Hal tersebut biasanya telah dilakukan dalam berbagai model simulasi dengan komputer dalam bentuk perangkat lunak (*software*) yang kini banyak dijual. Kondisi kategori kelas stabilitas Pasquill-Gifford diperlihatkan pada Tabel 1.

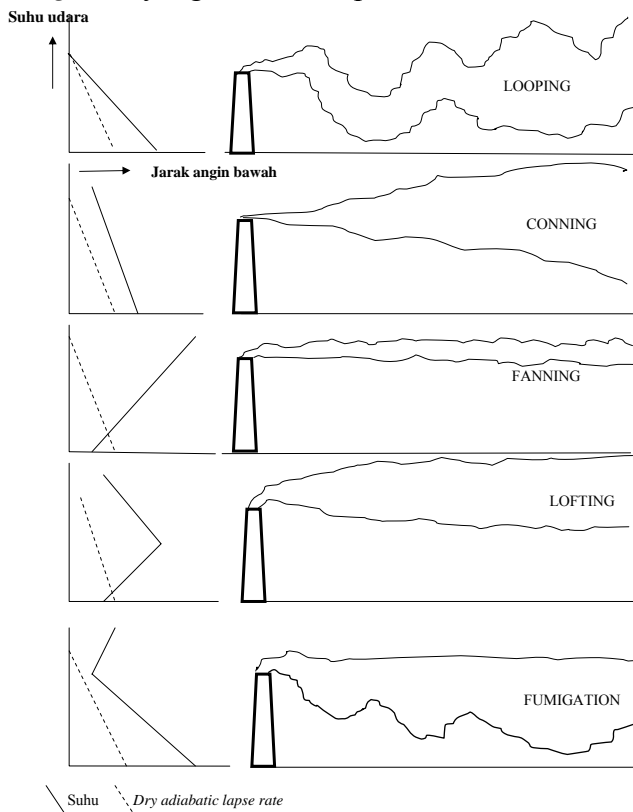
Tabel 1. Kategori kelas stabilitas Pasquill – Gifford [1].

Kecepatan angin rata-rata, U (m/s) pada tinggi 10 m	Kelas stabilitas (siang hari) dengan insolasi (<i>insolation</i>) :			Kelas stabilitas (malam hari) dengan kondisi langit :	
	Kuat	Sedang	Ringan	Overcast ($\geq 4/8$ langit tertutup awan)	$\leq 3/8$ langit tertutup awan
$U < 2$	A	A – B	B	*	*
$2 \leq U < 3$	A – B	B	C	E	F
$3 \leq U < 5$	B	B – C	C	D	E
$5 \leq U < 3$	C	C – D	D	D	D
$6 \leq U$	C	D	D	D	D

*) : Stabilitas F adalah pada malam hari dengan kecepatan angin kurang dari 2 m/s.

Penentuan simpangan baku σ_y dan σ_z ditentukan dalam berbagai model dalam berbentuk grafik yang sudah baku pada jarak sampai 10 km. Pada contoh berikut adalah kurva untuk menentukan parameter σ_y dan σ_z dalam kondisi lapangan tidak berbukit (*smooth terrain*), dengan waktu sampling 3 menit [1].

Bentuk kepuln asap yang keluar dari cerobong PLTN sangat bergantung pada parameter meteorologi (suhu, *dry adiabatic lapse rate*, dan angin), topografi, dan tinggi/diameter cerobong. Bentuk kepuln asap dibedakan dalam 5 jenis, yaitu *looping*, *conning*, *fanning*, *lofting*, dan *fumigation* yang dilukiskan pada Gambar 4.



Gambar 4. Jenis-jenis kepuln asap yang keluar dari cerobong PLTN sesuai dengan suhu udara [3].

Jika malam hari dengan langit cerah dan angin bertiup lemah maka timbul suatu gejala yang disebut angin katabatik yang terjadi pada tanah yang landai. Hal tersebut dapat

mengakibatkan terjadinya akumulasi dari udara dingin pada lembah, sehingga kepuln asap di atas lembah berbentuk *fumugation*, kadang-kadang kadar zat radioaktif dalam kepuln asap menjadi tinggi dan sangat berbahaya. Keadaan akan semakin diperburuk bila angin yang lemah bertiup melewati lembah kemudian kepuln asap terhambat pada puncak lembah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Hal ini terjadi biasanya jika PLTN dibangun di atas bukit. Untuk menghindari kejadian tersebut biasanya dirancang tinggi cerobong PLTN, sedemikian rupa sehingga lapisan inversi berada di bawah garis kepuln asap yang keluar dari cerobong.

Jika PLTN di bangun di daerah dekat pantai, kepuln asap yang keluar dari cerobong sangat dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin lokal (angin laut dan darat), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Kondisi angin tidak stabil, dapat menyebabkan bertambahnya dispersi polutan sehingga kadar zat radioaktif dalam kepuln asap menjadi rendah. Kondisi angin stabil, terutama pada lapisan inversi akan memberikan rendahnya dispersi, sehingga kadar zat radioaktif dalam kepuln asap akan meningkat, kondisi seperti ini kadang-kadang dapat membahayakan. Untuk mengatasi hal tersebut maka tinggi cerobong harus dirancang sedemikian rupa sehingga kepuln asap berada di atas lapisan inversi. Penentuan tinggi inversi biasanya dilakukan dengan percobaan *balonsonde* yang diamati secara terus-menerus di kawasan yang akan dibangun PLTN.

Berdasarkan teori, distribusi zat radioaktif yang keluar dari cerobong PLTN merupakan fungsi eksponensial, seperti yang ditunjukkan pada beberapa persamaan matematika di atas Persaman (1) menunjukkan bentuk persamaan umum distribusi kadar zat radioaktif yang lepas dari cerobong PLTN ke lingkungan. Setelah dilakukan beberapa modifikasi dan asumsi, diperoleh persamaan (8) yang lebih sederhana. Persamaan (8) dipakai untuk menghitung kadar zat radioaktif maksimum pada jarak tertentu dari cerobong PLTN. Sebagai contoh, diketahui kondisi kelas stabilitas Pasquill adalah D pada

jarak $x = 500$ m dengan insolasi antara sedang dan ringan (siang hari), ditunjukkan pada Tabel 1, simpangan baku $\sigma_y = 36$ m, $\sigma_z = 18,5$ m, tinggi cerobong $H = 60$ m, kecepatan angin rata-rata $U = 6$ m/s, dan kuat lepasan kepulan asap dari cerobong $Q = 80$ Ci/m³, maka dengan menggunakan persamaan (8) diperoleh kadar maksimum zat radioaktif pada jarak 500 m dari cerobong PLTN adalah $3,3 \times 10^{-5}$ Ci/m³. Metode ini biasanya dipakai untuk memperkirakan daerah aman dari kecelakaan nuklir.

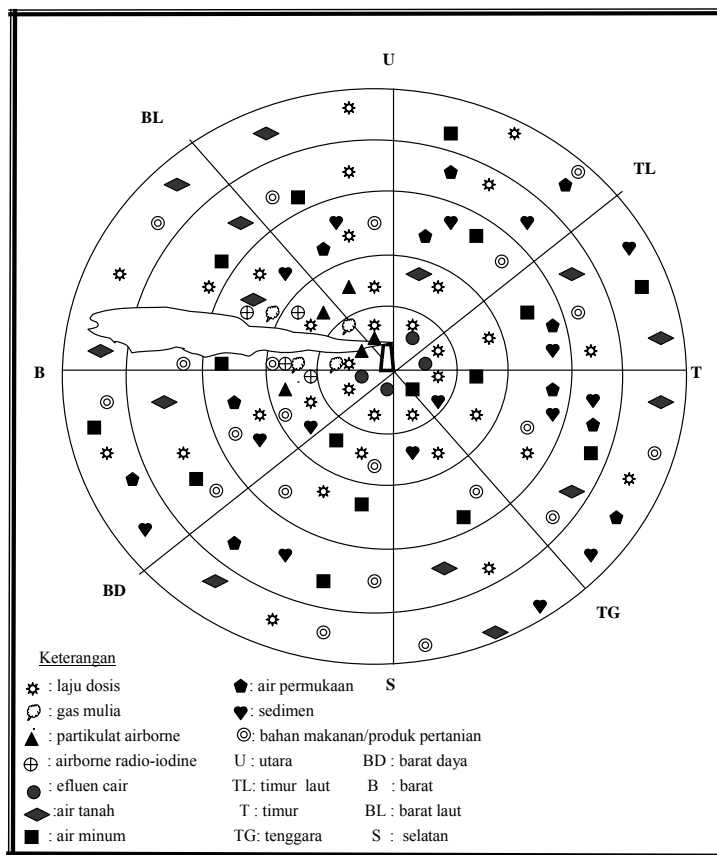
Daerah pengamatan dibuat lingkaran dengan tapak PLTN sebagai pusatnya. Dalam lingkaran tersebut dibuat jari-jari dan sektor sesuai dengan arah mata angin, jadi dibagi dalam 8 sektor (Gambar 5). Dalam pembuatan radius dan sektor, tidak ada suatu pedoman yang baku. Misalnya di PLTN Onagawa (Jepang), jarak pengamatan dimulai dari 1 km, 2 km, 3 km, 4 km, 5 km, 6 km, 7 km, dan 8 km dari tapak reaktor [4], sementara di Reaktor Nuklir G.A. Siwabessy (Indonesia) adalah 2 km, 4 km, 6 km, 8 km, dan 10 km, dan untuk calon tapak reaktor PLTN di Ujung Lemahabang (Jepara) adalah 2 km, 5 km, dan 10 km [5]. Stasiun-stasiun pengamatan ditentukan berdasarkan arah/kecepatan angin dominan yang sering terjadi di wilayah PLTN dan sekitarnya.

PEMANTAUAN LINGKUNGAN

Program pemantauan lingkungan setiap negara juga berbeda, antara lain bergantung pada jenis daya reaktor yang digunakan, bahan bakar, dan kondisi lahan di kawasan yang akan dibangun PLTN. Dengan menganalisis kadar zat radioaktif dalam berbagai contoh lingkungan, seperti udara, air, tanah, dan bahan makanan di kawasan PLTN dapat diketahui tentang sumber dan kegiatan penggunaan zat radioaktif di PLTN tersebut. Dengan sistem ini adanya

potensi bahaya radiasi dapat dideteksi dan dikomunikasikan sedini mungkin, termasuk pula lokasi dan jenis potensi bahaya yang akan terjadi.

Gambar 5 menunjukkan gambaran secara umum yang berkaitan dengan pemantauan radioaktivitas dan radiasi lingkungan di kawasan PLTN. Penentuan lokasi pengamatan pada beberapa sektor disesuaikan dengan distribusi lepasan zat radioaktif ke lingkungan, yaitu berdasarkan arah mata angin (terutama arah angin dominan). Pemantauan dibedakan dalam dua hal, yaitu pemantauan langsung dan tidak langsung. Pemantauan langsung dilakukan dengan mengukur laju dosis radiasi- γ menggunakan termoluminisensi dosimeter (TLD) dan pemantauan tidak langsung dilakukan dengan mengambil contoh di beberapa sektor, misalnya tanah, air, udara, dan bahan makanan, kemudian



Gambar 5. Contoh penentuan stasiun-stasiun pengamatan di dalam kawasan PLTN [6].

contoh diproses dan diukur kadar radionuklida yang terkandung dalam contoh tersebut, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Contoh program pemantauan lingkungan di kawasan PLTN [4,6,7].

Jenis contoh	Lokasi sampling	Analisis dan alat ukur/satuan	Frekuensi pengumpulan data
Radiasi Eksterna : laju dosis radiasi- γ akumulatif di udara	Semua sektor, terutama daerah pemukiman, sekolah dan perkotaan.	<i>Thermoluminescent Dosimeter</i> (TLD) : CaF ₂ , LiF (mSv/tahun)	Bulanan
Gas Mulia (kripton dan xenon)	Sekitar cerobong asap PLTN (radius 5 km dari tapak), terutama daerah angin dominan	Kamar pengion : kadar gas mulia dalam kertas tapis (Bq/m ³)	Kontinyu
Partikulat Airborne	Sekitar cerobong asap PLTN (radius 5 km dari tapak), daerah pemukiman (terutama di daerah angin dominan)	Contoh udara dihisap menggunakan air sampler melalui kertas tapis. Kertas tapis diukur setelah 7 hari sampling menggunakan pencacah latar rendah sistem α/β untuk diuji kadar alfa dan beta total (Bq/m ³)	Mingguan
Airborne Radio - Iodine	Sekitar cerobong asap PLTN (radius 5 km dari tapak), daerah pemukiman dan daerah pertanian (terutama di daerah angin dominan)	Contoh udara dihisap menggunakan air sampler melalui <i>charcoal</i> dan diukur dengan spektrometer- γ diperoleh kadar ¹³¹ I (Bq/m ³)	Mingguan
Efluen Cair	Di sekitar PLTN dan laboratorium penunjang.	Limbah cair diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ¹³⁷ Cs. Pencacah latar rendah sistem α/β untuk kadar ⁹⁰ Sr, dan pencacah sintilasi cair untuk kadar ³ H (Bq/l)	Bulanan
Air Permukaan	Sungai, danau, laut, dan sumur dangkal yang ada di kawasan PLTN, misalnya di muara sungai dan tempat buangan air dari PLTN	Contoh dari stasiun pengamatan diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ¹³⁷ Cs, pencacah latar rendah sistem α/β untuk kadar ⁹⁰ Sr, dan pencacah sintilasi cair untuk kadar ³ H (Bq/l)	Bulanan
Air Tanah	Sumur dalam dan sumber air (<i>well</i>) yang berasal dari dalam tanah yang berada di kawasan PLTN	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ¹³⁷ Cs dan ²²⁶ Ra, pencacah latar rendah sistem α/β untuk kadar ⁹⁰ Sr, dan pencacah sintilasi cair untuk kadar ³ H (Bq/l)	Kuartalan

(Lanjutan Tabel 2)

Jenis contoh	Lokasi sampling	Analisis dan alat ukur/satuan	Frekuensi pengumpulan data
Air Minum	Sumber air yang dipakai oleh penduduk untuk keperluan minum dan masak yang berada di kawasan PLTN	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ^{137}Cs pencacah latar rendah sistem α/β untuk kadar ^{90}Sr , dan pencacah sintilasi cair untuk kadar ^3H (Bq/l)	Bulanan
Sedimen	Sedimen yang berasal dari tempat penampungan limbah cair PLTN dan laboratorium penunjang, sungai, danau, dan laut	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ^{137}Cs , pencacah latar rendah sistem α/β untuk kadar ^{90}Sr (Bq/l)	Setengah tahunan
Susu sapi segar	Daerah peternakan sapi dan daerah penampungan susu yang akan dijual	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ^{137}Cs , pencacah latar rendah sistem α/β . untuk kadar ^{90}Sr .. Satuannya dalam Bq/l	Bulanan
Ikan dan kerang-kerangan (bukan contoh ikan /keranga-kedrangan yang berasal dari luar kawasan).	Pelelangan ikan (pasar ikan di sekitar kawasan PLTN	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ^{137}Cs , pencacah latar rendah sistem α/β . untuk kadar ^{90}Sr (Bq/l)	Setengah tahunan
Bahan makanan dan produk pertanian (kecuali susu)	Daerah pertanian yang berada di sekitar kawasan PLTN, misalnya Biji-bijian (beras, kacang tanah, kacang hijau) sayur-sayuran (cabe, bayam, kacang panjang, dan tomat), dan daging	Contoh dari stasiun pengamatan, diproses secara radiokimia, diukur menggunakan spektrometer- γ untuk kadar ^{137}Cs , pencacah latar rendah sistem α/β . untuk kadar ^{90}Sr (Bq/l)	Setengah tahunan

Catatan : Tabel 2 ini tidak baku bergantung pada jenis reaktor, bahan bakar, dan kondisi kawasan PLTN dan sekitarnya.

PENUTUP

Sampai saat ini sumber energi yang paling banyak digunakan untuk pembangkit energi listrik adalah bahan bakar fosil yang cenderung akan habis pada suatu saat tertentu, sehingga tidak dapat diharapkan lagi sebagai sumber energi

masa depan. Sedangkan pembangkit energi listrik dengan bahan bakar nuklir merupakan alternatif yang terakhir setelah batubara. Semua kegiatan manusia mengandung resiko terhadap kehidupan, tidak terkecuali kegiatan PLTN.

Pengoperasian PLTN akan menghasilkan sejumlah besar limbah yang umumnya bersifat radioaktif. Sebagian besar limbah ini berasal dari zat radioaktif hasil fisi dan aktivasi neutron. Limbah radioaktif yang mempunyai waktu paro panjang masih terkungkung secara aman di dalam perangkat bahan bakar dan hanya sejumlah kecil zat radioaktif hasil fisi terutama yang mudah menguap dan umumnya waktu paronya pendek yang lepas ke lingkungan ke udara. Oleh karena itu, pengelolaan limbah radioaktif adalah bagian yang sangat penting dari upaya keselamatan teknis dan administrasi untuk mengendalikan potensi dampak limbah terhadap keselamatan masyarakat dan lingkungan dari pemanfaatan teknologi nuklir.

Upaya keselamatan lingkungan dalam berbagai kegiatan yang berkaitan dengan pengoperasian PLTN dilakukan dengan cara mengamati distribusi dan akumulasi zat radioaktif dalam berbagai komponen lingkungan di kawasan PLTN dan sekitarnya. Hal ini mendorong dikembangkannya teknik analisis kadar radionuklida hasil fisi yang selanjutnya dipakai untuk mengetahui keadaan tingkat radiasi dan radioaktivitas lingkungan di kawasan PLTN dan sekitarnya. Data lingkungan setempat, antara lain tataguna tanah, tataguna air, kependudukan, dan parameter meteorologi dapat dipakai untuk pembuatan model distribusi dan akumulasi radionuklida dalam komponen ekosistem. Selanjutnya melalui pengembangan model dosimetri dapat dilakukan perkiraan dampak radiologi kegiatan PLTN. Oleh karena itu perlunya program pemantauan tingkat radiasi dan radioaktivitas lingkungan di kawasan kegiatan PLTN dan sekitarnya. Pemantauan lingkungan

merupakan pengukuran tingkat radiasi dan kontaminasi radionuklida yang berkaitan dengan pengawasan (*surveillance*) dan pengkajian tingkat radiasi dan kontaminasi. Dengan demikian dapat diketahui apakah pengoperasian PLTN sudah sesuai atau memenuhi prosedur operasi yang telah ditetapkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting*, A Safety Guide, Safety Series, No.50-SG-S3, International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1980.
2. DADANG SUPARMAN, *Menaksir Luas Daerah Kontaminasi dari Gas Suatu Pabrik*, Almanak Nuklir Biologi dan Kimia 1984/1985, Publ. Pusat Nuklir Biologi dan Kimia Angkatan Darat, Jakarta, 1985.
3. ANONIM, *Training Course in Planning, Preparedness & Response to Radiological Emergencies*, 22 Feb. 1984, Argonne National Laboratory (ANL) and International Atomic Energy Agency (IAEA), Illinois-USA, 1984.
4. KOBAYASHI, K. dan MATSUDA, H., *Basic Plan for Measuring Environmental Radioactivity and Thermal Discharge*, Indonesia-Japan Environmental Radioactivity Monitoring Seminar, July, 1989, Tokyo, 1989.
5. ANONIM, *Topical Report on Ecology (Step-3)*, Rev. 2 Nopember 1996, NEWJEC, Inc., Jakarta, 1996.
6. BERNARD SHLEIEN, *The Health Physics and Radiological Health Handbook*, Revised Ed., Scinta, Inc., 1992.
7. PAPADOPOULOS, D., dan WINTER, M., *Environmental Monitoring of Nuclear Facilities*, Hauptabteilung Sicherheit Kernforschungszentrum, Karlsruhe GmbH, Federal Republic of Germany, 1982.