

PENGARUH FAKTOR IKLIM TERHADAP POLA SEBARAN INTEGRAL KONSENTRASI KONTAMINAN RADIOAKTIF TAHUNAN DARI CEROBONG REAKTOR KARTINI YOGYAKARTA KE UDARA LINGKUNGAN SEKITARNYA

Mondjo¹, dan Sudibiyakto²

Abstract

This research is to study the impact of climate factors and environmental risk due to operation of The Nuclear Reactor of Kartini that is proportional to the annual integrated concentration of the radioactive contaminant into the air of surrounding areas. A research has been done to design a mathematical model to relate the annual integrated concentration of the radioactive contaminant with the radioactive contaminant released from the Reactor of Kartini (the rate the effluents are released, type of the radioactive contaminant, dimension of stack), and climatological factor (wind direction, wind speed, solar radiation percentage). The result shown that the maximum of annual integrated concentration of the radioactive contaminant of Argon-41 had been on the decrease but variation of the annual climatological factor was not significant with the distribution of it. The map of the annual integrated concentration of Argon-41 shown up the maximum of the annual integrated concentration of Argon-41 was $0,6 \text{ mCi/m}^3$. The area where had the value of the annual integrated concentration of Argon-41 of $0,4 - 0,6 \text{ mCi/m}^3$ (equal to the mean concentration of Argon-41 of $4,04 - 6,06 \cdot 10^{-5} \text{ mCi/m}^3$) for the direction of 60° on the distance of $200 - 1075 \text{ m}$, the direction of 30° on the distance of $200 - 800 \text{ m}$, and the direction of 90° on the distance of $300 - 575 \text{ m}$. The contribution of contaminant released from the stack of the Reactor of Kartini was lower than the natural radioactivity so the operation of the Reactor of Kartini was not significant with the degree of the environmental radioactivity.

Key words : Climate factors, Integrated concentration, radioactive contaminant

1. PENGANTAR

Dalam upaya keselamatan radiasi untuk keperluan praktis diperlukan suatu standar berupa batas dosis dan besaran lain terkait, yang sebanding dengan jumlah dosis yang diterima anggota masyarakat antara lain integral konsentrasi kontaminan radioaktif terhadap waktu. Besaran integral konsentrasi kontaminan radioaktif tahunan merupakan besaran yang sangat penting karena berbanding lurus dengan besaran jumlah dosis, yang menunjukkan tingkat risiko yang diterima seseorang yang berada dalam lingkungan tersebut (IAEA, 1980; Wiryosimin S, 1995).

Pelepasan kontaminan radioaktif ke lingkungan akan dapat meningkatkan tingkat radioaktivitas lingkungan meliputi udara, air, tanah, dan tanaman yang akhirnya akan sampai kepada manusia (Eichholz, 1976; Wardana, 1995). Menurut hasil penelitian terdahulu (Wijatna, 1993) menunjukkan bahwa dusun Kledokan desa

Caturtunggal yang terletak arah utara Reaktor kartini pada jarak $260 - 570 \text{ meter}$ akan melampaui aras ambang batas untuk tanaman, tanah, dan air berturut-turut pada tahun 2273, 2628, dan 2687. Hasil pemantauan tingkat radioaktivitas di lingkungan sekitar Reaktor Kartini sampai radius 5 km yang dilakukan oleh BATAN tidak menunjukkan peningkatan radioaktivitas lingkungan (Yazid, 1998).

Oleh karena itu, diperlukan informasi lingkungan termasuk faktor iklim di sekitar Reaktor Kartini Yogyakarta, di antaranya penentuan pola sebaran kontaminan radioaktif tahunan yang berasal dari pelepasan gas buang dari cerobong Reaktor Kartini ke udara lingkungannya yang menyatakan seberapa besar pengaruh kegiatan Reaktor Kartini terhadap lingkungan sekitarnya, dengan menyusun model matematikanya (IAEA, 1980; IAEA, 1998).

¹ Dosen Jurusan Teknik Nuklir Fakultas Teknik UGM

² Dosen Fakultas Geografi UGM dan Kepala Pusat Studi Bencana Alam UGM

1.1. Dispersi Kontaminan Dari Sumber Bentuk Titik

Salah satu model yang banyak dipakai untuk menafsirkan konsentrasi polutan di udara dari sumber bentuk titik adalah model lintasan garis lurus kisi Gaussian. Dalam model ini kontaminan didistribusikan secara normal di sekeliling sumbu kisi. Jika terjadi refleksi sempurna oleh permukaan tanah, maka hubungan konsentrasi kontaminan di udara dari sumber kontaminan bentuk titik di atas permukaan tanah dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\bar{c}(x, y, z) = \frac{Q}{2ps_y s_z U} \exp\left(-\frac{y^2}{2s_y^2}\right) \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2s_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2s_z^2}\right] \right\} \quad (1)$$

Menurut skema Pasquill-Gifford, stabilitas atmosfer dibedakan menjadi 6 kelas, yaitu

- A: Sangat tidak stabil
- B: Agak tidak stabil
- C: Sedikit tidak stabil
- D: Netral
- E: Sedikit stabil
- F: Cukup stabil

Hubungan kecepatan angin yang berbeda ketinggiannya dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^p \quad (2)$$

dengan

$u_i (i=1,2)$ = kecepatan angin pada ketinggian z_i .

p = tetapan sebagai berikut:

Tipe Stabilitas	A	B	C	D	E	F
p	0,15	0,15	0,20	0,25	0,40	0,60

Menurut Martin (1976), tetapan dispersi σ_y dan σ_z dapat dihitung dengan persamaan empiris sebagai berikut:

$$s_y = a \cdot x^{0,894} \quad (3)$$

$$s_z = c \cdot x^d + f \quad (4)$$

dengan a, c, d , dan f adalah tetapan Martin (Sincero A.P., dan Sincero G.A., 1996).

Kecepatan aliran gas buang keluaran cerobong mengakibatkan titik pelepasan gas buang ke atmosfer berada di atas puncak cerobong sehingga besaran tinggi cerobong pada persamaan (1), adalah tinggi cerobong efektif, yaitu tinggi sampai dengan puncak kepulan gas buang tersebut.

Untuk cerobong tinggi, yaitu cerobong yang tingginya paling tidak 2-2,5 tinggi bangunan di

sekitarnya, kenaikan kepulan di puncak cerobong untuk kondisi stabilitas atmosfer tidak stabil dan netral ditentukan dengan persamaan (5) dan (6), yang nilai kenaikan kepulan yang lebih rendah, sedangkan kondisi stabilitas atmosfer yang stabil dengan mengambil yang terendah dari nilai kenaikan kepulan yang dihitung dengan persamaan (5), (7), dan (8) (IAEA, 1980).

$$\Delta h = 1,44 D_i \left(\frac{W_0}{U} \right)^{2/3} \left(\frac{x}{U} \right)^{1/3} - 3 \left(1,5 - \frac{W_0}{U} \right) D_e \quad (5)$$

$$\Delta h = 3 \frac{W_0}{U} D_i \quad (6)$$

$$\Delta h = 4 \left(\frac{F_m}{S} \right)^{1/4} \quad (7)$$

$$\Delta h = 1,5 S^{-1/6} \left(\frac{F_m}{U} \right)^{1/3} \quad (8)$$

$$F_m = W_0^2 \left(\frac{D}{2} \right)^2$$

$$S \approx \frac{g}{T} \left(-\frac{\rho u}{\rho} \right)$$

Untuk cerobong pendek, yaitu cerobong yang tingginya kurang dari pada dua sampai dengan dua setengah tinggi bangunan di sekitarnya perlu dikoreksi dengan *entrainment coefficient* E_t , yang tergantung pada perbandingan kecepatan keluaran gas dari cerobong atau kecepatan gas arah vertikal dengan kecepatan udara arah horisontal (IAEA, 1980).

$$\Delta h = \Delta h(1 - E_t) \quad (9)$$

dengan

$$E_t = 1 \quad \text{untuk} \quad \frac{W_0}{U} < 1$$

$$E_t = 2,58 - 1,58 \left(\frac{W_0}{U} \right) \quad \text{untuk} \quad 1 \leq \left(\frac{W_0}{U} \right) \leq 1,5$$

$$E_t = 0,3 - 0,06 \left(\frac{W_0}{U} \right) \quad \text{untuk} \quad 1,5 < \left(\frac{W_0}{U} \right) \leq 5,0$$

$$E_t = 0 \quad \text{untuk} \quad \left(\frac{W_0}{U} \right) > 5,0$$

Salah satu kelebihan kontaminan radioaktif adalah dapat hilang sifat keradioaktivitasnya sejalan dengan bertambahnya waktu melalui proses peluruhan, sehingga konsentrasi kontaminan radioaktif sebenarnya akan lebih kecil dibandingkan dengan konsentrasi kontaminan terhitung dengan persamaan (1). Faktor koreksi akibat proses peluruhan tersebut adalah:

$$f\left(\frac{x}{U}\right) = \exp(-It) = \exp\left(-I\frac{x}{U}\right) \quad (10)$$

1.2. Integral konsentrasi kontaminan radioaktif tahunan

Integral konsentrasi kontaminan radioaktif terhadap waktu dapat dituliskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Psi(x, y, z) = \int_0^t c(x, y, z) dt \quad (11)$$

Parameter iklim yang meliputi arah angin, kestabilan atmosfer dan kecepatan angin merupakan besaran yang dinamis, maka untuk penyederhanaan hitungan, arah angin dibagi menjadi beberapa interval arah angin yang lebar intervalnya sama dengan θ . Dispersi kepulan arah radial dalam interval sudut arah angin θ dianggap sama, sehingga untuk stabilitas atmosfer i, arah angin j, dan kecepatan angin k, dapat disusun persamaan berikut:

$$\Psi_{ijk}(x, z) = \frac{Q_0 N_{ijk}}{\sqrt{2p x q s_d U_k}} \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_{jk})^2}{2s_d^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_{jk})^2}{2s_d^2}\right] \right\} \quad (12)$$

dengan N_{ijk} adalah interval waktu pelepasan selama satu tahun dengan stabilitas atmosfer i, arah angin j, dan kecepatan angin k (IAEA,1980).

Anasir cuaca dalam periode satu tahun bersifat siklis, sehingga untuk menentukan dampak pelepasan kontaminan radioaktif yang dilepaskan instalasi nuklir dalam operasi normal perlu ditentukan integral konsentras kontaminan radioaktif tahunan, yang dapat dilakukan dengan penjumlahan konsentrasi kontaminan radioaktif bulanan dalam tahun tersebut, yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Psi_{aj}(x, z) = \sum_{m=1}^{12} \Psi_{mj}(x, z) \quad (13)$$

Dengan menggunakan metode numerik, daerah penelitian dibagi menjadi banyak bagian luasan, dan masing-masing bagian luasan dihitung nilai integral konsentrasi kontaminan radioaktifnya dengan menggunakan persamaan (13). Berdasarkan nilai integral konsentrasi kontaminan radioaktif masing-masing titik tersebut dapat dilukis peta sebaran kontaminan radioaktif yang dinyatakan dengan sebaran nilai integral konsentrasi kontaminan radioaktif.

2. PELAKSANAAN PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian ini berpedoman pada *Safety Guide Safety Series No.50-SG-S3*. Daerah penelitian di sekitar Reaktor Kartini Yogyakarta

sampai dengan radius 1750 m, pada ketinggian 2 m di atas tanah.

Reaktor Kartini berada di kompleks Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM) Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang terletak pada 113°36'33" LS dan 7°46'76" BT dengan ketinggian dari permukaan air laut 118 meter, termasuk wilayah Desa caturtunggal, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta. Secara umum daerah ini merupakan daerah yang landai dengan kemiringan 5°- 6°30' (BATAN,1983).

Data ukuran cerobong dan data pelepasan gas buang dari reaktor kartini diperoleh dari Pusat Penelitian Dan Pengembangan Teknologi Maju (P3TM) BATAN Yogyakarta. Data iklim yang meliputi arah, kecepatan angin, dan prosen sinar matahari diperoleh dari Stasiun Pengamatan data Meteorologi Adisucipto tahun 1988 sampai dengan 1997.

Penelitian dilakukan dengan menyusun model matematika integral konsentrasi kontaminan radioaktif dari cerobong reaktor Kartini ke udara lingkungan sekitarnya didasarkan pada persamaan (13), dengan penyederhanaan sebagai berikut

1. Arah angin dikelompokkan menjadi 12 kelompok arah angin dengan lebar juring 30°.
2. Faktor curah hujan tidak diperhitungkan dalam analisis ini dengan pertimbangan kontaminan radioaktif bukan partikel padat.

Model matematika ditulis dalam bahasa pemrograman PASCAL, dan informasi nilai integral konsentrasi kontaminan radioaktif dari cerobong Reaktor Kartini ke udara lingkungan sekitarnya yang disimpan dalam bentuk text file yang dapat dibaca dengan perangkat lunak EXCEL, untuk disajikan dalam bentuk bentuk kurva kontour sebaran integral konsentrasi kontaminan radioaktif di daerah penelitian, yang selanjutnya ditampilkan pada peta lokasi.

Untuk menguji pengaruh faktor iklim, dilakukan uji variansi faktor arah, kelas nilai konsentrasi kontaminan radioaktif, dan waktu (tahun) terhadap besaran luas daerah, serta dilakukan pengamatan peta sebaran nilai integral konsentrasi tahunan kontaminan radioaktif yang dibuat dengan data selama sepuluh tahun mulai tahun 1988 sampai dengan 1997. Pengaruh pengoperasian Reaktor Kartini terhadap perubahan tingkat radioaktivitas udara lingkungan ditentukan dengan menyusun neraca aktivitas kontaminan radioaktif.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini adalah peta sebaran integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahunan dari Reaktor Kartini ke udara lingkungannya sampai dengan radius 1750 m, yang dihitung dengan data

iklim tahun 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, dan 1997, serta yang dihitung dengan data iklim selama 10 tahun, mulai tahun 1988 sampai dengan 1997. Pola sebaran integral konsentrasi Argon-41 pada Gambar 1 tampak bahwa mulai tahun 1988 sampai dengan tahun 1995 nilai maksimumnya cenderung menurun dan selanjutnya tidak berubah, yang menunjukkan adanya pengaruh pengaruh perubahan faktor iklim di daerah tersebut.

Berdasarkan peta sebaran tersebut di atas disajikan hubungan prosen luas, arah, dan kelas nilai integral konsentrasi kontaminan radioaktif Argon-41 pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3.

Analisis pengaruh faktor perubahan iklim tahunan di daerah tersebut dilakukan uji keragaman faktor waktu (tahun), arah sebaran, dan kelas integral konsentrasi Argon-41 terhadap luas sebarannya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MINITAB, yang hasilnya terinci pada Tabel 4, menunjukkan bahwa perubahan faktor iklim di daerah tersebut terhadap pola sebaran integral kontaminan Argon-41 tahunan tidak signifikan.

3.1. Konsentrasi kontaminan Argon-41

Pelepasan Argon-41 dari Reaktor Kartini akan meningkatkan konsentrasi argon di lingkungan sekitarnya. Laju peningkatan konsentrasi Argon-41 di suatu lokasi tergantung pada nilai integral konsentrasi Argon-41 dan sifat radioaktivitasnya, yang hubungannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\Psi}{365 \times 24} - \lambda C = 1,14 \times 10^{-4} \Psi - 0,379 C \quad (14)$$

Penyelesaian persamaan (14) dengan syarat batas pada saat reaktor belum beroperasi atau saat $t = 0$ nilai $C = 0$ dan saat reaktor beroperasi selama t nilai $C = C_t$, maka

$$C_t = 3,01 \times 10^{-4} \Psi (1 - e^{-0,379 t}) \quad (15)$$

dengan satuan Ψ dalam $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$, t dalam jam, dan C_t dalam $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$. Jika C dinyatakan dalam satuan Bq/m^3 , menjadi

$$C_t = 11,14 \Psi (1 - e^{-0,379 t}) \quad (16)$$

Berdasarkan persamaan di atas menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi Argon-41 terhadap waktu asimptotis berupa kurva asimptotis terhadap nilai maksimumnya.

Jika Reaktor tidak beroperasi maka tidak ada pelepasan Argon-41 sehingga akan terjadi

penurunan konsentrasi Argon-41, maka hubungan konsentrasi Argon terhadap waktu dapat dituliskan pada persamaan

$$C_t = 11,14 \Psi (1 - e^{-0,379 t_{op}}) e^{-0,379 (t - t_{op})} \quad (17)$$

Hubungan konsentrasi dan waktu jika Reaktor Kartini dioperasikan mulai pukul 7.00 sampai dengan pukul 15.00, digambarkan pada Gambar 2, yang menunjukkan penurunan yang tajam setelah Reaktor Kartini dimatikan sehingga pada hari berikutnya kontaminan Argon-41 hampir habis.

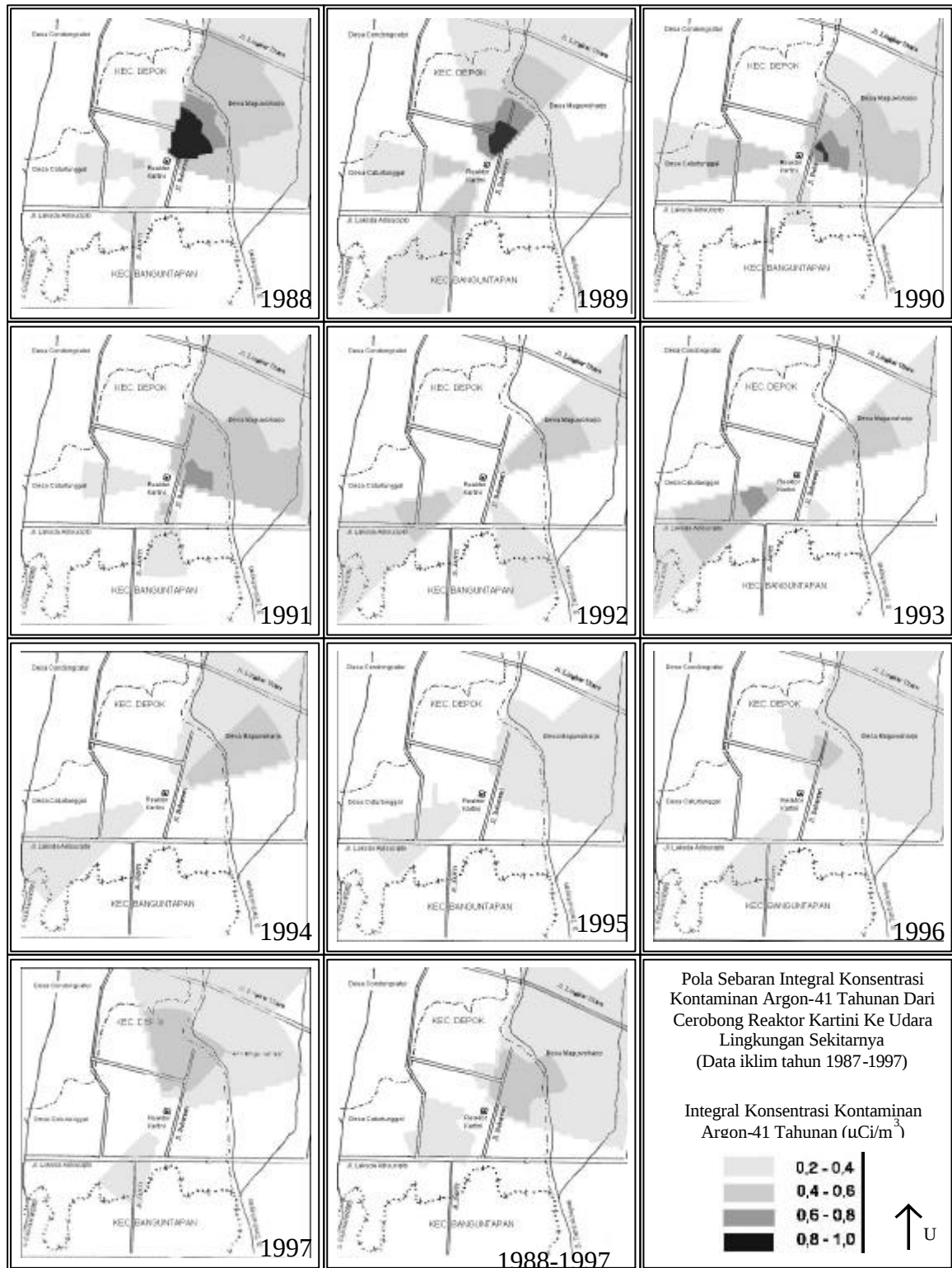
Sesuai dengan data perancangannya, Reaktor Kartini dioperasikan 8 jam per hari sehingga rerata konsentrasi kontaminan Argon-41 di udara dapat dihitung dengan menghitung rerata konsentrasi yang terjadi selama periode satu hari (24 jam) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \bar{C} &= 3,74 \times \Psi \text{ Bq} / \text{m}^3 \\ \bar{C} &= 1,01 \times 10^{-4} \times \Psi \text{ mCi} / \text{m}^3 \end{aligned} \quad (18)$$

Berdasarkan data tahun 1988 sampai dengan 1997 dilukiskan peta integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahunan dari cerobong Reaktor Kartini ke udara lingkungan sekitarnya pada Gambar 3 yang menunjukkan bahwa arah sebaran dominan pada 60° , diikuti 30° , dan 90° . Berdasarkan peta tersebut, nilai integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahunan kurang dari $0,6 \mu\text{Ci}$ atau setara dengan rerata konsentrasinya sebesar $2,24 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Daerah yang mempunyai nilai integral konsentrasi Argon-41 $0,4 - 0,6 \mu\text{Ci}$ (setara dengan konsentrasinya sebesar $1,49 - 2,24 \text{ Bq}/\text{m}^3$) meliputi arah 30° pada jarak $200 - 800 \text{ m}$, arah 60° pada jarak $200 - 1075 \text{ m}$, dan pada arah 90° pada jarak $300 - 575 \text{ m}$. Gambar 3 tersebut menunjukkan tingkat risiko relatif yang ditimbulkan dari pengoperasian Reaktor Kartini mulai tahun 1988 sampai dengan 1997.

Berdasarkan nilai integral konsentrasi Argon-41 tahunan pada Gambar 3 dan persamaan (18) di atas, rerata konsentrasi Argon-41 tertinggi sebesar $2,24 \text{ Bq}/\text{m}^3$, jika kita bandingkan pengukuran tingkat radioaktivitas udara yang dilakukan Yazid (1998), menunjukkan bahwa rerata konsentrasi kontaminan Argon-41 dari Reaktor Kartini relatif kecil dibandingkan dengan tingkat radioaktivitas udara hasil pengukuran.

Menurut Sutjipto (1989) turunan radon memberikan kontribusi sebesar 40% dari paparan radiasi alamiah, dan konsentrasi radon dan toron dalam gedung $0 - 111 \text{ Bq}/\text{m}^3$. Konsentrasi radon udara bebas di Gottingen pada ketinggian 2 m dari permukaan tanah bervariasi antara $5 - 100 \text{ Bq}/\text{m}^3$ pada malam hari dan $2 - 10 \text{ Bq}/\text{m}^3$ pada siang



Gambar 1. Pola sebaran integral konsentrasi kontaminan argon-41 dari cerobong Reaktor Kartini ke udara lingkungan sekitarnya

hari, dan konsentrasi reratanya $23,5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ pada malam hari dan $7,5 \text{ Bq}/\text{m}^3$ pada siang hari (Porstendörfer dkk, 1994). Menurut Grasty (1994), konsentrasi radon di Swedia pada ketinggian 0,8 m dan 3 m berturut-turut $46 \text{ Bq}/\text{m}^3$ dan $31,2 \text{ Bq}/\text{m}^3$.

Tingkat radioaktivitas radon alamiah tersebut menunjukkan bahwa pengaruh pengoperasian

Reaktor Kartini terhadap tingkat radioaktivitas lingkungan tidak berarti.

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini adalah peta sebaran kontaminan Argon-41 tahunan dari Reaktor Kartini

Tabel 1 Hubungan arah dan prosen luasan kelas integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahun 1988 - 1992.

Arah	1988		1989		1990		1991		1992	
	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2
0	14.11	0.00	74.52	21.19	13.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	15.20	84.80	45.70	54.30	13.98	86.02	69.76	24.78	0.00	0.00
60	22.14	75.07	34.88	0.00	28.48	71.52	57.15	42.85	55.94	44.06
90	49.68	21.29	84.19	13.38	51.10	19.39	17.03	62.98	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	67.49	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	41.33	0.49	0.00	0.00
210	21.58	0.00	74.57	25.43	22.51	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
240	3.47	0.00	0.00	0.00	3.65	0.00	0.00	0.00	77.19	22.81
270	35.67	2.07	54.12	7.00	35.67	2.07	26.77	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Keterangan

Kelas 1 : $\Psi = 0,2 - 0,4 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ Kelas 2 : $\Psi > 0,4 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ **Tabel 2.** Hubungan arah dan prosen luasan kelas integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahun 1993 - 1997.

Arah	1993		1994		1995		1996		1997	
	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2	Kelas 1	Kelas 2
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22.45	0.00	45.87	39.74
30	0.00	0.00	98.00	0.00	36.99	0.00	92.62	7.38	76.72	23.28
60	43.80	48.36	33.57	66.43	98.00	0.00	98.00	0.00	82.73	0.00
90	0.00	0.00	0.00	0.00	86.59	0.00	86.59	0.00	0.00	0.00
120	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
150	6.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
180	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
210	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	51.10	0.00	37.17	0.00
240	17.45	82.55	97.50	0.00	49.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
270	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
300	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
330	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Keterangan

Kelas 1 : $\Psi = 0,2 - 0,4 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$ Kelas 2 : $\Psi > 0,4 \mu\text{Ci}/\text{m}^3$

Yogyakarta mulai tahun 1988 sampai dengan 1997 dengan dasar perhitungan reaktor beroperasi sesuai dengan data perancangannya.

Peta tersebut menunjukkan sebaran tingkat risiko lingkungan relatif.

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan:

Tabel 3. Hubungan arah dan prosen luas kelas integral konsentrasi Argon-41 tahunan

Arah	1988-1997	
	Kelas 1	Kelas 2
0	15.42	0.00
30	78.47	21.21
60	64.52	34.97
90	91.05	8.22
120	0.00	0.00
150	0.00	0.00
180	0.00	0.00
210	15.42	0.00
240	33.59	0.00
270	17.05	0.00
300	0.00	0.00
330	0.00	0.00

1. Ada kecenderungan penurunan nilai integral konsentrasi Argon-41 tahunan maksimum mulai tahun 1988 sampai dengan 1997, tetapi pengaruh perubahan iklim tahunan terhadap pola sebaran integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tidak signifikan.
2. Berdasarkan peta sebaran integral konsentrasi Argon-41 tahunan yang dibuat dengan data iklim selama 10 tahun (1988-1997), daerah yang mempunyai nilai integral konsentrasi kontaminan Argon-41 tahunan sebesar 0,4 - 0,6 $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$ yang setara dengan rerata konsentrasi Argon-41 sebesar 1,49 - 2,24 Bq/m^3 untuk arah 60° pada jarak 200 - 1075 m, untuk arah 30° pada jarak 200 - 800 m, dan untuk arah 90° pada jarak 300 - 575 m.

3. Pengoperasian Reaktor Kartini tidak berpengaruh nyata terhadap tingkat radioaktivitas di lingkungan sekitarnya. Tingkat radioaktivitas yang ditimbulkan jauh lebih rendah dibandingkan dengan tingkat radioaktivitas alamiah dalam udara yang diantaranya adalah radon.

UCAPAN TERIMAKASIH

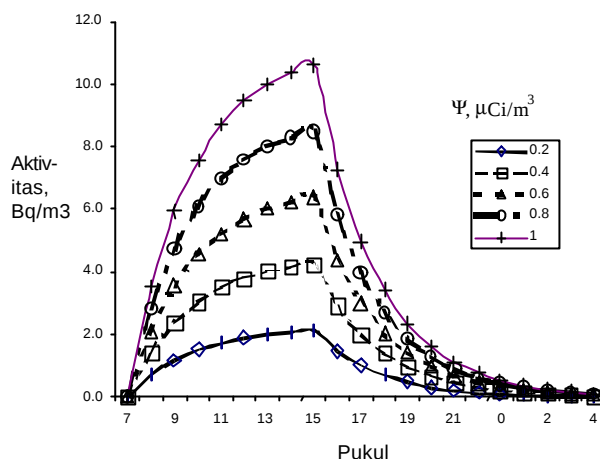
Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih kepada Bapak Kepala Pusat Penelitian Dan Pengembangan Teknologi Maju beserta staf dan bapak Kepala Stasion Pengamatan Data Meteorologi Adisucipto beserta staf atas bantuan data sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

DAFTAR PUSTAKA

- BATAN, 1983, *Laporan Analisa Keselamatan Reaktor Kartini*, PPBMI, Yogyakarta.
- Cember, H., 1988, *Introduction to Health Physic*, ed. 2nd, Pentagon Press, New York.
- Eichholz, G.G., 1976, *Environmental Aspects of Nuclear Power*, Ann Arbor Science Publishers Inc, Michigan.
- Grasty, R.L., 1994, Sumer Outdoor Radon Variations In Canada And Their Relation To Soil Moisture, *Health Physics*, February 1994, Vo. 66, No. 2.
- IAEA, 1980, *Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting, A Safety Guide*, Safety Series No. 50-SG-S3, IAEA, Vienna.
- IAEA, 1998, *Guidelines For Integrated Risk Assessment And Management In Large Industrial Areas*, IAEA-TECDOC-994, IAEA, Vienna.
- Mondjo. 2000. Pola Sebaran Integral Kontaminan Radioaktif Tahunan dari Cerobong Reaktor Kartini Yogyakarta ke Udara Lingkungan Sekitarnya. Tesis. Program Pascasarjana

Tabel 4. Hasil analisis variansi prosen luas sampai radius 1750 m

Sumber	Derajat Bebas	Jumlah Kuadrat	Kuadrat Tengah	F	P
Tahun (A)	10	2314.4	231.4	0.51	0.878
Arah (B)	11	57890.4	5262.8	11.64	0.000
Kelas (C)	1	9407.2	9407.2	20.82	0.000
A x B	110	43439.2	394.9	0.87	0.760
A x C	10	7412.2	741.2	1.64	0.105
B x C	11	6101.0	554.6	1.23	0.278
Galat	110	49713.6	451.9		
Total	263	176278.0			



Gambar 2. Hubungan konsentrasi Argon-41 terhadap waktu jika Reaktor Kartini dioperasikan mulai pukul 7.00-15.00 dengan variasi nilai integral konsentrasi tahunannya.

UGM, Yogyakarta.

Peavy, H.S., Rowe, D.R., Tchobanoglous, G., 1986, *Environmental Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.

Porstendörfer, J., Butterweck, G., dan Reineking, A., 1994, Daily Variation Of The Radon Concentration Indoor And Outdoors And The Influence Of Meteorological Parameter, *Health Physics*, Vol. 67, No.3.

Sincero, A.P., Sincero, G.A., 1996, *Environmental Engineering, Design Approach*, Prentice Hall, Inc, New Jersey.

Sofyan, H., 1998, 1998, Mewaspada Gas Radon, *Buletin ALARA*, Volume 1 No.: 3, April 1998, Jakarta.

Sutjipto, 1989, Penentuan Tingkat Kerja Dan Perkiraan Dosis Turunan Radon Dan Toron Di Dalam Ruangan, *Skripsi*, Jurusan Teknik Nuklir Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

Wardhana, W.A., 1995, *Dampak Pencemaran Lingkungan*, Andi Offset, Yogyakarta.

Wijatna, A.B., 1993, Pengaruh Pengoperasian Reaktor Nuklir Kartini Terhadap Radioaktivitas Lingkungan di Sekitarnya, *Tesis*, Program Pasca Sarjana, UGM, Yogyakarta

Wiryosimin, S., 1995, *Mengenal Asas Proteksi Radiasi*, ITB Bandung, Bandung.

Yazid M., 1998, *Pengelolaan Radioaktivitas Lingkungan di Kawasan Reaktor Kartini PPNY-BATAN*, Prsentasi Ilmiah tanggal 16 Desember 1998, PPNY-BATAN, Yogyakarta.

Arti lambang dan singkatan

Δh	=	Kenaikan keputan dari cerobong
λ	=	Tetapan peluruhan kontaminan radioaktif
σ_y	=	Parameter dispersi keputan atau simpangan baku distribusi konsentrasi pada arah vertikal, m.
σ_z	=	Parameter dispersi keputan atau simpangan baku distribusi

simpangan baku distribusi konsentrasi pada arah horizontal, m.

$\Psi(x,y,z)$ = Integral konsentrasi kontaminan radioaktif di titik (x,y,z)

$\Psi_{aj}(x,z)$ = Integral konsentrasi kontaminan radioaktif tahunan di sektor arah angin ke j, dengan jarak x, dan ketinggian di atas tanah z,

$\Psi_{mj}(x,z)$ = Integral konsentrasi kontaminan radioaktif bulanan di sektor arah angin ke j, dengan jarak x, dan ketinggian diatas tanah z,

$\bar{c}(x,y,z)$ = Konsentrasi kontaminan udara di atas permukaan tanah, di titik (x,y,z), Ci.m^{-3}

Bq = Becquerel, satuan aktivitas, jumlah peluruhan per detik

Ci = Currie, satuan peluruhan. 1 ci = $3,7 \times 10^{10}$ bq

C_t = Konsentrasi kontaminan radioaktif udara pada waktu t, $\mu\text{Ci/m}^3$, Bq/m^3

D_i = Diameter dalam cerobong

D_e = Diameter luar cerobong

E_t = *Entrainment coefficient*

F_m = Parameter fluks momentum

g = Percepatan gravitasi, m.det^{-2}

H = Tinggi cerobong, m

Q = Laju pelepasan kontaminan, Ci.det^{-1}

S = Parameter satbilitas

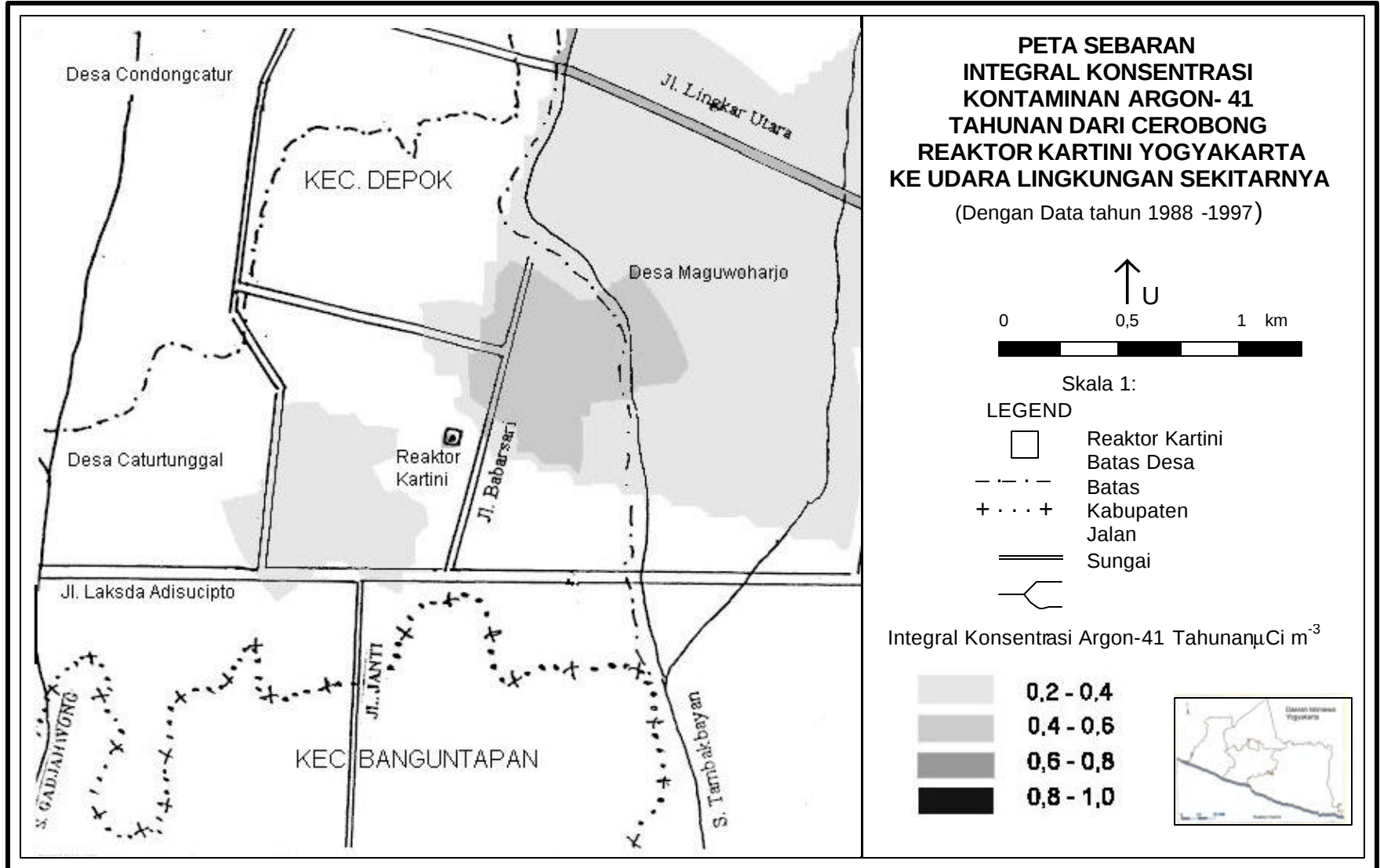
T = Temperatur ambien, K

t_{op} = Selang waktu operasi Reaktor Kartini, jam

U = Rerata kecepatan udara, m.s^{-1}

W_0 = Kecepatan keluaran, m s^{-1}

X = Jarak searah angin, m



Gambar 3. Sebaran Integral Konsentrasi Kontaminan Argon-41 tahunan Dari Cerobong Reaktor Kartini Ke Udara Lingkungan Sekitarnya