

Perkiraan Kontribusi Tritium (HTO) di Ruang Reaktor terhadap Dosis Seluruh Tubuh Para Pkerjanya

Abdul Wa'id, Bunawas, Bambang Priwanto
PSPKR - BATAN

ABSTRAK

Pekerja radiasi yang bekerja di sekitar reaktor nuklir dengan sistem pendingin primer tipe air kolam mempunyai kebolehdjian terkontaminasi interna oleh tritium melalui paru-paru dan kulit akibat lepasan uap air tritium (HTO). Tingkat kontaminasi interna tritium ini bergantung pada tinggi dan berat tubuh. Berdasarkan pada model metabolisme tritium di dalam tubuh dapat diperlihatkan bahwa dosis ekivalen terikat HTO pada jaringan lunak karyawan Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG) berkisar antara 0,56 – 0,73 mSv/th untuk WR (faktor kualitas radiasi untuk tritium) = 1 atau 1,12 – 1,46 Sv/th untuk WR = 2 dan konsentrasi tritium di udara sebesar 11751 Bq/m³.

PENDAHULUAN

Dalam pengoperasian reaktor nuklir dengan air sebagai bahan pendingin reaktor, akan dihasilkan limbah radioaktif tritium (H-3) yang terbentuk melalui proses aktivasi neutron terhadap deuterium (H-2) yang terdapat di air pendingin primer reaktor⁽¹⁾.

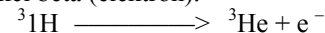
Tritium yang berada di air pendingin primer biasanya berbentuk molekul HTO, yaitu molekul air dengan salah satu atom hidrogennya diganti oleh tritium⁽²⁾. Mengingat suhu air pendingin lebih tinggi daripada suhu udara di dalam ruang gedung reaktor, maka tritium ini mudah menyebar ke udara dalam bentuk 1110 melalui proses penguapan.

Pekerja radiasi yang berada di dalam ruangan yang terkontaminasi tritium dalam bentuk HTO akan mempunyai peluang terkontaminasi interna baik melalui pernapasan, difusi melalui pori-pori kulit dan kontak tubuh dengan permukaan yang terkontaminasi⁽³⁾. Potensi sebagai sumber radiasi eksterna dapat diabaikan, karena radiasi beta yang dipancarkan cukup rendah (maksimum 18,6 keV, rata-rata 5,7 keV) sehingga penetrasinya hanya 6 µm pada permukaan kulit⁽⁴⁾.

Pada makalah ini dicoba diulas karakteristik kimia-fisika, pengaruh parameter tubuh terhadap tingkat kontaminasi interna, proses transport biologi, dari perkiraan dosis interna tritium serta risikonya terhadap kesehatan.

KARAKTERISTIK TRITIUM

Tritium adalah isotop hidrogen radioaktif dengan nomor atom 1 dan berat atom 3 yang disimbolkan sebagai ³H atau T dengan waktu paruh 12,35 tahun dan dalam peluruhannya memancarkan partikel beta (elektron).



Partikel beta yang dipancarkan ini berenergi rendah (maksimum 18,6 keV, rerata 5,7 keV). Energi sebesar ini dalam lintasannya mampu mengeksitasi molekul dan mengionkan (~ 0,03 keV per pasang ion). Jangkauan energi maksimum 5 mm di udara dan 6 µm di permukaan kulit, padahal sasaran sel kulit yang berpotensi mengakibatkan kanker adalah pada kedalaman 20–100 µm bagian epidermis dan kulit. ini berarti potensi sebagai radiasi eksterna dapat diabaikan⁽⁴⁾.

Di lingkungan (khususnya di dalam gedung reaktor) ada dua bentuk tritium yang perlu mendapat perhatian yaitu tritium dalam bentuk gas (HT) dan tritium dalam bentuk uap air (HTO); yang dominan adalah HTO. Gas tritium (HT) di udara dapat berubah menjadi HTO melalui beberapa proses yaitu oksidasi, reaksi pertukaran isotopik dengan air dan oksidasi fotokimia⁽⁵⁾. Bahaya radiasi HTO jauh lebih tinggi dibandingkan HT dengan perbandingan 25.000: 1⁽⁶⁾. Oleh karena itu dalam makalah ini hanya dibahas tritium dalam bentuk HTO.

JALUR KONTAMINASI INTERNA TRITIUM

Tritium di udara dan sebagai kontaminan pada permukaan tertentu di tempat kerja dapat masuk ke dalam tubuh melalui jalur pernapasan, difusi melalui pori-pori kulit, melekat bersama makanan dan minuman, dan kontak tubuh (kulit) dengan permukaan bahan yang terkontaminasi⁽³⁾.

Tritium yang masuk lewatjalurpernapasan, sewaktu berada di daerah trachea-bronchi akan terkondensasi sehingga tingkat kelembaban di ruang tersebut mencapai 80–90%. Akibatnya sebagian besar tritium bentuk HTO ini akan diserap oleh paru-paru dengan faktor absorpsi 98–99% dan sisanya dilepaskan kembali ke udara bebas⁽⁷⁾. Tubuh manusia yang dibungkus kulit dengan luas permukaan tertentu (bergantung pada tinggi dan berat tubuh), merupakan jalan masuk tritium (HTO) lewat pori-pori kulit melalui proses difusi. Laju kecepatan difusi tritium pada pori-pori kulit sebanding dengan tekanan uap air di udara dan tebal membran (barrier) kulit, laju kecepatan difusinya sebesar 1,1 l/menit/m^{2(7,8)}. Apabila kulit bersentuhan dengan permukaan tertentu (khususnya logam) yang terkontaminasi tritium (HTO), maka tritium tersebut dapat masuk ke lapisan ekstrasvaskuler kulit seperti halnya tinta yang diserap oleh kertas. Pemasukan lewat jalur ini, melalui proses *blotter effect*, adalah sebesar 1 gram/m²⁽⁹⁾.

Kebolehdjian seseorang makan di tempat kerja (khususnya di reaktor) adalah sangat kecil, tetapi kebiasaan minum sulit untuk dihindari, sehingga ada potensi kontaminasi interna tritium melalui jalur minuman. Perlu diketahui bahwa gelas yang berisikan air (air teh, air kopi, air putih) dan diberi tutup, tidak akan terhindar dari kontaminasi tritium (HTO) di udara melalui proses difusi lewat celah-celah antara gelas dan tutupnya. Laju difusi efektif uap air HTO ke dalam gelas bergantung pada diameter celah. Mekanisme ini sama dengan sistem pencuplikan tritium secara pasif (tanpa pompa pencuplik) yang dikembangkan di AECL Kanada^(10,11).

PERKIRAAN LAJU PEMASUKAN TRITIUM KE DALAM TUBUH

Dan keempat jalur kontaminasi interna tritium ke dalam tubuh (pernapasan, kulit, pencernaan dan kontak dengan permukaan), hanya dua jalur yang direkomendasikan oleh ICRP 30 yaitu melalui pernapasan dan kulit⁽⁶⁾. Kedua jalur yang lain diabaikan sebab sulit diperkirakan dan kontribusinya relatif kecil⁽⁹⁾. Perlu diketahui pula bahwa luas permukaan tubuh (kulit), tidak sama untuk setiap orang, bergantung pada tinggi dan berat badan; luas permukaan kulit secara empiris diperkirakan

kan dengan persamaan sebagai berikut⁽¹²⁾ :

$$S = 0,0072 B^{0,425} \times T^{0,725} (m^2) \quad (1)$$

Mengingat ukuran tubuh antara pria dan wanita tidak sama, dilakukan koreksi sehingga persamaan di atas berubah menjadi sebagai berikut⁽¹⁵⁾ :

$$S = 0,0072 B^{0,425} \times T^{0,725} \times f (m^2) \quad (2)$$

dengan B = berat tubuh (kg)

T = tinggi tubuh (cm)

f = faktor koreksi bentuk tubuh, 1,05 (untuk wanita) dan 0,95 (untuk pria).

Mengingat sifat tritium (HTO) mirip dengan air di dalam tubuh, maka distribusinya bergantung pada kadar air tubuh. Kadar air tubuh (MA) dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan empiris⁽⁸⁾.

$$MA = 0,55 B^{0,53} \times T^{0,4} (\text{liter}) \quad (3)$$

Laju pemasukan tritium ke dalam tubuh adalah penjumlahan dan dua jalur utama pemasukan⁽⁹⁾.

$$A_o = A_i + A_k (\text{Bq}) \quad (4)$$

$$A_i = RTHN (\text{Bq}) \quad (5)$$

$$A_k = SITHN (\text{Bq}) \quad (6)$$

Keterangan :

A_o = total pemasukan tritium ke tubuh pada waktu tertentu (Bq),

A_i = pemasukan tritium ke tubuh lewat jalur pernapasan (Bq).

A_k = pemasukan tritium ke tubuh lewat jalur kulit (Bq).

R = laju pernapasan (10,2 l/menit).

T = waktu pernapasan (menit).

N = aktivitas spesifik HTO dan uap air (Bq/g).

S = luas permukaan kulit (m²)

I = laju pemasukan melalui kulit secara difusi (= 5,1 l/menit/m²)

H = kelembaban udara (g/l).

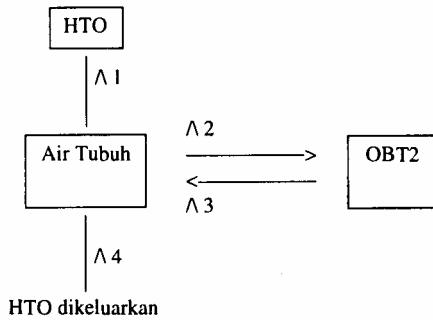
DOSIMETRI DAN METABOLISME TRITIUM DIDALAM TUBUH

Tritium dalam bentuk HTO yang masuk ke dalam tubuh baik melalui jalur pernapasan, absorpsi kulit atau pencernaan, dengan cepat akan terdistribusi ke seluruh tubuh, karena sebagian besar tubuh manusia terdiri atas air (~ 70%)⁽¹³⁾. Konsentrasi tritium dalam keringat, air liur, urin, darah, dan uap air dalam pernapasan dianggap sama setelah 2–4 jam dari saat pemaparan⁽⁶⁾.

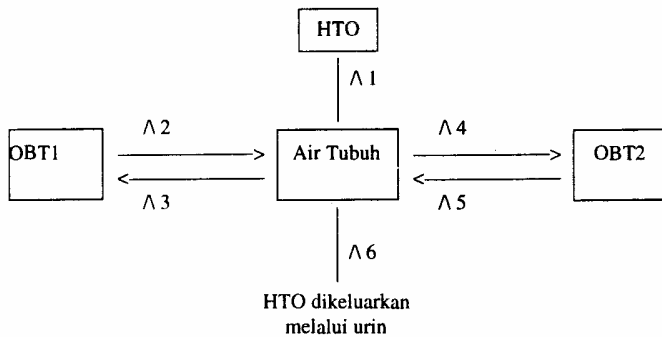
Waktu panuh biologik HTO di dalam tubuh terdiri atas 3 komponen. Komponen pertama (T₁) sekitar 8–12 hari, kedua (T₂) antara 21 dan 76 hari dan ketiga antara 280 dan 550 hari⁽¹⁴⁾. Komponen pertama mirip dengan kesetimbangan air pada manusia acuan, T = 0,693 x 42/3 = 9,7 hari (42 adalah kadar air tubuh dan 3 adalah pemasukan air per hari). Oleh karena itu komponen T₁ merupakan replikasi dan metabolisme air. Komponen yang kedua (T₂) mirip dengan ikatan organik hidrogen (OBT). Bila diperkirakan dari kesetimbangan karbon pada manusia acuan diperoleh T = 0,693 x 16/0,3 = 37 hari (kadar karbon total = 16 kg dan penyerapan karbon harian = 0,3 kg). Waktu paruh yang lebih panjang untuk komponen ketiga (T₃) mencerminkan keberadaan tritium di dalam kolagen dan lipid dalam jaringan lemak dan otak pada hewan percobaan⁽¹⁾. Untuk memudahkan dalam memperkirakan waktu tinggal HTO di dalam tubuh dengan fungsi eksponensial 2 komponen, ICRP menggunakan waktu paruh biologik untuk T₁ sebesar 10 hari dan T₂ sebesar 40 hari.

Untuk memperkirakan dosis tritium, telah dikembangkan

model kompartemen HTO menggunakan 2 kompartemen^(6,15) maupun model 3 kompartemen⁽¹⁶⁾ (**Gambar 3 dan 4**). ICRP memperkirakan kontribusi dosis tritium di dalam tubuh yaitu 95% berasal dari HTO dan 5% dari OBT Hal ini berarti bahwa apabila tritium dalam bentuk HTO masuk ke dalam tubuh, maka ada 5% bentuk komposisinya diubah menjadi bentuk organik.



Gambar 2. Model kompartemen HTO di dalam tubuh^(6,15)



Gambar 2. Model kompartemen HTO di dalam tubuh^(6,15)

Mengingat fraksi OBT di dalam tubuh adalah kecil ($\approx 5\%$), maka model untuk memperkirakan dosis interna dapat lebih disederhanakan dengan menganggap bahwa tubuh adalah satu organ dan tritium langsung didistribusikan ke seluruh jaringan lunak. Laju dosis serap dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$D = 1,602 \times 10^{-13} \frac{E \cdot A(t)}{M} \text{ (Gy/detik)} \quad (7)$$

$$\text{atau } D = 1,384 \times 10^{-8} \frac{E \cdot A(t)}{M} \text{ (Gy/hari)} \quad (8)$$

dengan : D = Laju dosis serap (Gy/detik).
E = energi beta rerata yang diabsorpsi (MeV).
A(t) = Aktivitas dalam tubuh pada waktu t (Bq).
M = masa jaringan lunak (kg).
t = waktu paparan (detik, hari).

Menurut manusia acuan ICRP, bahwa 80% jaringan lunak terdiri atas air, sehingga persamaan di atas menjadi:

$$D = 1,384 \times 10^{-8} \frac{0,8 \cdot E \cdot A(t)}{MA} \text{ (Gy/hari)} \quad (9)$$

dengan MA = kadar air tubuh (kg) = .

Dosis serap terikat (D) yang diterima tubuh selama waktu t :

$$D = 1,1072 \times 10^{-8} \frac{E}{MA} \int_0^t A(t) dt \text{ (Gy)} \quad (10)$$

$$A_t = A_0 \exp \left(\frac{-0,693 \cdot t}{T_{1/2}} \right) \quad (11)$$

Dosis ekuivalen terikat (H):

$$H = 1,1072 \times 10^{-8} \frac{E \cdot WR \cdot A_0}{MA} \int_0^t \exp \left(\frac{-0,693 \cdot t}{T_1} \right) dt \quad (12)$$

Untuk keperluan proteksi radiasi, waktu paparan dosis interna selama 50 tahun = 11800 hari, sehingga persamaan (12) menjadi:

$$H = 90,5 \times 10^{-11} \frac{A_0}{MA} \text{ (Sv) untuk } WR = 1 \quad (13)$$

$$= 181,0 \times 10^{-11} \frac{A_0}{MA} \text{ (Sv) untuk } WR = 2$$

dengan A₀ = aktivitas tritium di tubuh saat t=0 (Bq).
T_{1/2} = waktu paruh Biologi HTO (= 10 hari).
E = energi beta (= 0,0057 MeV).
WR = faktor kualitas radiasi untuk tntium
= 1 (menurut ICRP 30 tahun 1977)
= 2 (menurut ICRU 40 tahun 1986)

PEMBAHASAN

Dari data tinggi dan berat tubuh 17 responden karyawan PRSG (**Tabel 1**), dan konsentrasi tritium (HTO) di dalam ruang gedung reaktor adalah 11751 Bq/m³(17), lama kerja 8jam/hari dengan 20 hari/bulan, dapat diperkirakan melalui persamaan (4), (5) dan (6) tingkat kontaminasi interna tritium berkisar antara 22,531 dan 24,993 MBq/tahun. Variasi tingkat kontaminasi tritium untuk masing-masing karyawan ini disebabkan karena luas permukaan tubuhnya tidak sama. Padahal jalur pemasukan tritium ke dalam tubuh salah satunya melalui pori-pori kulit. Tingkat kontaminasi tritium ini masih jauh dari batas pemasukan maksimum yang direkomendasikan oleh ICRP sebesar 3000 MBq/tahun⁽¹⁸⁾.

Perkiraan dosis ekuivalen terikat tritium berdasarkan persamaan (12) hanya bergantung pada 2 parameter yaitu kadar air tubuh dan kadar tritium yang masuk ke dalam tubuh. Untuk laju pemasukan tritium di dalam tubuh berkisar antara 22,531 – 24,993 MBq/tahun maka dosis ekuivalen terikat yang diterima oleh karyawan PRSG berkisar antara 0,560 dan 0,730 mSv/tahun untuk WR = 1 atau antara 1,120 dan 1,460 mSv/tahun untuk WR = 2 (**tabel 1**). Hasil perkiraan dosis ekuivalen terikat menurut ICRP 54 antara 0,383 – 0,425 mSv/tahun untuk WR = 1 dan 0,766 – 0,850 mSv/tahun untuk WR = 2⁽¹⁸⁾. Perbedaan perkiraan dosis ini karena ICRP menggunakan manusia acuan dengan berat badan 75 kg (kadar air tubuh 42 kg). Ini berarti untuk keperluan perkiraan dosis tritium, maka sebaiknya

Tabel 1. Perkiraan dosis ekuivalen terikat dan kontaminasi interna Tritium yang diterima oleh responden untuk konsentrasi tritium di udara rata-rata 11751 Bq/m³

No.	Rpdn	BB (Kg)	TB (cm)	Ao (MBq/th)	H (mSv/th)*	H (mSv/th)
1	02	44	158	22,531	0,660	1,320
2	03	54	160	24,539	0,640	1,280
3	04	64	165	24,476	0,580	1,160
4	05	60	160	23,933	0,590	1,180
5	09	47	163	23,012	0,640	1,280
6	10	59	173	24,474	0,590	1,180
7	11	50	161	23,182	0,630	1,260
8	12	37	153	22,560	0,730	1,460
9	14	69	168	23,993	0,560	1,120
10	15	44	158	23,506	0,690	1,380
11	16	53	163	23,522	0,620	1,240
12	17	55	160	23,546	0,610	1,220
13	19	53	161	23,431	0,620	1,240
14	20	54	160	23,466	0,610	1,220
15	22	50	160	23,138	0,630	1,260
16	23	55	163	23,685	0,610	1,220
17	24	51	163	23,356	0,620	1,240

Keterangan:

* = menggunakan faktor kualitas radiasi (WR) = 1 (JCRP 30)

** = menggunakan faktor kualitas radiasi (WR) = 2 (ICRU 40)

menggunakan data berat kadar air tubuh per individu seperti pada persamaan (13). Faktor berat badan, menentukan besar dosis yang diterima. Sebagai contoh responden 14 dengan berat badan

69 kg dengan pemasukan tritium 24,993 MBq/tahun dan responden 12 dengan berat badan 37 kg dengan pemasukan tritium 22,560 MBq/tahun, maka dosis ekuivalen terikat yang diterima oleh responden 12 adalah 1,3 kali lebih tinggi daripada responden 14. Hal ini berarti bahwa apabila dua orang tersebut mempunyai jam kerja di tempat yang sama, maka orang yang badannya kurus akan mempunyai faktor risiko kanker dan genetik yang lebih tinggi dibandingkan dengan orang yang gemuk. Karena menurut Straum, faktor risiko kanker $81 \times 10^{-3}/Sv$ dan faktor risiko genetik sebesar $7,9 \times 10^{-3}/Sv^{(19)}$.

Walaupun perkiraan secara teori dosis dan tritium yang diterima oleh responden karyawan PRSG masih rendah, tetapi perlu diingat ada sumber kontaminan lain yang potensial memberikan kontribusi dosis yaitu gas argon-4 $1^{(20)}$ selain daripada itu ada upaya dan ICRP untuk menurunkan dosis yang diterima pekerja dari 0,5 Sv/tahun menjadi 0,2 Sv/tahun⁽²¹⁾. Oleh karena itu program bioassay melalui urine atau pernapasan perlu di-realisasikan dalam upaya memberikan rasa aman dan meningkatkan budaya keselamatan terhadap para pekerja.

KESIMPULAN DAN SARAN

1) Tingkat kontaminasi interna tritium dari 17 responden karyawan PRSG berkisar antara 22,531–24,993 MBq/tahun, untuk konsentrasi tritium di udara sebesar 11751 Bq/m³. Perbedaan ini disebabkan karena luas permukaan tubuh responden tidak sama,

Tabel 2. Konsentrasi Tritium di udara pada beberapa ruangan di RSG GAS Serpong

Daya	Tanggal	Waktu sampling	Konsentrasi H-3 di ruangan						Keterangan
			Hall reaktor		Hall eksperimen		R. Kendali Utama		
			Dpm	C (Bq/m ³)	Dpm	C (Bq/m ³)	Dpm	C (Bq/m ³)	
30	16-11-93	09.00-09.30	85,08	50477,95	47,47	19522,75	40,23	13563,82	-WL Reaktor Shut Down pk. 15.00
		12.00-12.30	9097	55325,76	47,99	19950,74	41,77	14831,32	
		15.00-15.30	95,30	58889,23	48,83	20642,11	40,25	13580,28	
0	19-11-93	09.00-09.30	35,10	9341,62	35,16	9391,00	3338	7925,87	Reaktor tidak beroperasi
		12.00-12.30	35,25	9465,08	35,08	9325,16	34,01	8444,40	
		15.00-15.30	35,04	9292,23	35,35	9547,38	3390	8353,86	
25	22-11-93	09.00-09.30	48,37	20263,49	4345	16214,09	3915	12674,91	+WL Reaktor start up pk.08.00
		12.00-12.30	48,50	20370,49	43,65	16378,70	39,35	12839,52	
		15.00-15.30	49,27	21004,24	43,95	16625,61	38,90	12469,15	
25	23-11-93	09.00-09.30	50,37	21909,59	43,99	16658,54	37,30	11152,26	+ WL
		12.00-12.30	51,34	22707,95	4423	16856,07	38,23	11917,70	
		15.00-15.30	5204	23284,08	4437	16971,30	3900	12551,45	
25	24-11-93	09.00-09.30	5601	26551,59	44,69	17234,67	36,71	10666,65	- WL
		12.00-12.30	59,32	29275,99	44,87	17382,89	37,83	11588,48	
		15.00-15.30	64,10	32210,20	44,97	17465,12	39,04	12584,38	
25	25-11-93	09.00-09.30	67,34	35876,91	45,35	17777,88	38,18	11876,55	- WL
		12.00-12.30	70,92	38823,46	45,66	18033,03	39,55	13004,14	
		15.00-15.30	74,78	42000,46	45,89	18222,33	36,05	10123,43	
25	26-11-93	09.00-09.30	77,10	43909,95	46,10	18395,17	38,18	11876,55	- WL Reaktor Shut Down pk. 11.00
		12.00-12.30	79,90	46214,51	6673	18913,69	39,10	12633,76	
		15.00-15.30	80,83	46486,12	46,93	19078,30	3847	12115,23	

Keterangan:

Dpm = Disintegrasi per menit (Bq)

C = Konsentrasi tritium (Bq/m³)

padahal kulit merupakan jalur pemasukan tritium ke dalam tubuh.

2) Berdasarkan model dosimetri tritium, dapat diperkirakan dosis ekivalen terikat yang diterima oleh responden karyawan PRSG berkisar antara 0,56–0,73 mSv/tahun untuk $WR = 1$ dan 1,12– 1,46 mSv/tahun untuk $WR = 2$. Variasi dosis ini disebabkan karena berat badan responden tidak sama, padahal berat tubuh (kadar air tubuh) menentukan besarnya dosis yang diterima.

3) Perlu direalisasi program bioassay melalui urin atau pernapasan untuk memperkirakan dosis tritium secara tepat dan dalam rangka menyongsong penerapan ICRP 60.

KEPUSTAKAAN

1. Okada S, Momoshima N. Overview of Tritium: characteristics, sources, and problems. Health Physics 1993; 65.
2. Mukhlis Akhadi. Tinjauan teoritis beberapa pengukuran kadar Tritium dalam udara. Laporan Intern PSPKR-BATAN, 1994.
3. International Atomic Energy Agency. Safe Handling of Tritium. IAEA Technical Series Report No. 234, 1991.
4. International Commission on Radiological Protection. The Biological Basis for Dose Limitation in the Skin. ICRP Publication 59, 1991.
5. Noguchi H, Kato S. Conversion of Tritium Gas to Tritiated Water in the Environment (literatur survey). Hoken-Butsuri 1985; 40: 49–59.
6. International Commission on Radiological Protection. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30(1979–1982).
7. Pinson EA, Canghai WH. Physiology and toxicity of Tritium in man. Health Physics 1980; 30: 1087–10.
8. Osborne RV. Absorption of Tritiated Water Vapour by People. Health Physics 1966; 12: 1527–37.
9. Osborne RV. Intake of Tritium when Skin is Splashed with Tritiated Water. Health Physics 1968; 15: 155–56.
10. Woods MJ, Workman WJG. Environmental Monitoring of Tritium in Air with Passive Diffusion Samplers. Fusion Technology 1992; 21 529–35.
11. Stephenson J. Re-evaluation of the Diffusion Sampler for Tritiated Vapor (HTO). Restricted Report HSD-SD-90-20, 1990.
12. Mattar JA. A Simple calculation to estimate body surface area in adult and its correlation with to the Du Bois Formula. Crit. Care Medicine 1989; 17: 846–47.
13. International Commission on Radiation Protection. Reference Man: Anatomical, Physiological and Metabolic Characteristics. ICRP Publication 1977; 26.
14. National Council on Radiation Protection. Tritium and Other Radionuclide Labeled Organic Compounds Incorporated in Genetic material. NCRP Report 1979; 63.
15. Balonov INI, Likhtarev IA, Moskalen YI. The Metabolism of Tritium Compound and Limits for Intake by Workers. Radiation Protection Dosimetry 1984; 47: 761–73.
16. Hill RL, Johnson JR. Metabolism and Dosimetry of ^3H . Health Physics 1993; 65: 628–47.
17. Bunawas Made Udiyani, Rahma BS. Pengukuran Tritium di Udara RSG GA. Siwabessy. Belum Terbit, 1994.
18. International Commission on Radiation Protection. Individual Monitoring for Intakes of Radionuclide by Workers : Design and Interpretation. ICRP Publication 198 54.
19. Straume I. Tritium Risk Assessment. Health Physics 1993; 65(6): 673–682.
20. Bunawas, Antony S. Teresia R, Pondi U. Pemantauan Gas Radioaktif di Reaktor Serbaguna G.A. Siwabessy pada Operasi Normal. Belum Diterbitkan, 1994.
21. International Commission on Radiological Protection. Recommendation of The International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 1991; 60.

