

ANALISIS DEPOSISI RADIONUKLIDA PEMANCAR ALFA PADA SALURAN PERNAFASAN MELALUI PROSES INHALASI DALAM KONDISI SISTEM TATA UDARA YANG BERBEDA DI INSTALASI RADIOMETALURGI

Eko Pudjadi⁽¹⁾, Budi Prayitno⁽²⁾ dan Sri Wahyuningsih⁽²⁾

1. Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) - BATAN
2. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

ANALISIS DEPOSISI RADIONUKLIDA PEMANCAR ALFA PADA SALURAN PERNAFASAN MELALUI PROSES INHALASI DALAM KONDISI SISTEM TATA UDARA YANG BERBEDA DI INSTALASI RADIOMETALURGI. Telah dilakukan analisis deposisi radionuklida gros alfa dalam saluran pernafasan pekerja melalui proses inhalasi. Analisis ini bertujuan untuk melihat seberapa besar konsentrasi radionuklida gros alfa yang terhirup oleh pekerja dibandingkan dengan batasan yang direkomendasikan oleh IAEA. Metode yang digunakan adalah menggunakan pendekatan model biokinetika sistem pernafasan manusia sesuai ICRP Publikasi 66/1994 yang diekstrapolasi dari pengukuran konsentrasi radioaktifitas radionuklida pemancar alfa di udara. Pengukuran radionuklida pemancar alfa di udara dilakukan di *operating area* dan *service area* Instalasi Radiometalurgi (IRM). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa aktifitas radionuklida pemancar α di paru-paru untuk orang yang bekerja selama 4 jam per hari di *operating area* berturut-turut sebesar 1.232 Bq, 3.988 Bq dan 38.917 Bq per hari dalam kondisi VAC normal, VAC Off 8 jam dan VAC Off 51 jam. Sedangkan untuk *service area*, aktifitas radionuklida pemancar α di paru-paru berturut-turut menunjukkan 1.577 Bq, 3.756 Bq dan 36.561 Bq per hari. Aktifitas radionuklida pemancar α di paru-paru dalam kondisi VAC Off 51 jam harus menjadi perhatian khusus karena aktifitas yang masih terdeposit selama 16 jam setelah mengalami proses *clearance* oleh jaringan paru-paru masih di atas batasan turunan yang diijinkan.

Kata kunci: Aerosol, diameter partikel, radiasi interna, proses inhalasi dan model biokinetika.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ALFA EMITTED RADIONUCLIDE DEPOSITION AT RESPIRATORY TRACT VIA INHALATION PROCESS UNDER DIFFERENCE AIR-VENTILATION SYSTEM AT RADIOMETALLURGY INTALLATION. Analysis of alfa gross radionuclide deposition in RMI worker respiratory tract has been done. The objective is proposed to examine widely level of alfa gross radionuclide inhaled if compared it to the IAEA recommendation. Analysis method used biokinetic modeling for human respiratory tract according ICRP Publication No. 66/ 1994. This calculation was extrapolated from measurement of indoor air alfa radioactivity. Indoor air alfa gross radionuclide activity was measured at *operating area* and *service area* in Radiometallurgy Installation (RMI). The calculation results showed that α gross radionuclide activity in lung for worker during 4 hours per day in *operating area* was 1.232 Bq, 3.988 Bq and 38.917 Bq per day for condition of VAC normal, VAC

Off 8 hours and VAC Off 51 hours respectively. Calculation of service area showed that α gross radionuclide activity in the lung was 1.577 Bq, 3.756 Bq and 36.561 Bq per day respectively for the three different VAC condition. α radionuclide activity in the lung for VAC Off 51 hours condition must be noticed because deposited activity during 16 hours after clearance process by lung tissue still higher than permissible derived limit.

Keywords: *Aerosol, particle size, internal radiation, inhalation process and biokinetic model.*

PENDAHULUAN

Instalasi Radiometalurgi (IRM) – Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN) telah melakukan pengujian elemen bakar bekas sejak tahun 1993. Proses pengujian elemen bakar bekas dilakukan melalui pengujian merusak dan pengujian tak merusak. Dalam melakukan pengujian merusak, elemen bakar bekas dibongkar sehingga memungkinkan terbentuknya serbuk halus dari hasil pemotongan elemen bakar tersebut. Namun dengan sistem tata udara yang baik, kondisi radioaktifitas di dalam bilik panas tempat pemotongan elemen bakar ini terjaga sehingga tidak terjadi kebocoran pada bilik panas.

Untuk melindungi para pekerja di daerah operasional (*Operating Area*) dan daerah layanan (*Service Area*) dari kontaminasi udara karena menghirup udara di daerah tersebut maka dilakukan pemantauan radioaktifitas udara secara rutin. Dalam keadaan sistem tata udara (VAC) normal, semua peralatan sistem udara bertekanan diaktifkan sehingga udara bersih mengalir menuju udara terkontaminasi. Sedangkan apabila VAC dimatikan, udara terkontaminasi dimungkinkan bercampur dengan udara bersih. Proses ini perlu diamati untuk melihat sejauh mana kenaikan radioaktifitas udara pada saat VAC mati dapat mempengaruhi keselamatan pekerja radiasi karena adanya aliran udara terkontaminasi ke udara bersih.

Perubahan konsentrasi radioaktifitas udara dalam kondisi VAC normal dan VAC mati telah dikaji melalui pengukuran radioaktifitas udaranya [1]. Namun demikian,

analisis keselamatan radiasi interna bagi pekerja radiasi tidak cukup hanya didasarkan pada besarnya konsentrasi radioaktifitas udara saja, tetapi proses masuknya radionuklida tersebut ke dalam sistem pernafasan perlu juga dipelajari. Hal ini dapat dipahami mengingat kemampuan paru-paru setiap orang dalam menghisap udara berbeda-beda. Akibatnya volume udara yang masuk memenuhi paru-paru pun berlainan antara orang yang satu dengan yang lain. Pada akhirnya, serangkaian analisis ini dapat digunakan untuk memperkirakan 'budget' konsentrasi aktifitas radionuklida yang ada di udara, di dalam tubuh, dan yang keluar dari tubuh (ekshalasi dan sekresi). Oleh karena itu dalam makalah ini dibuat perhitungan besarnya aktifitas radionuklida pemancar α udara yang masuk ke dalam tubuh khususnya ke dalam sistem pernafasan. Perhitungan ini akan menguraikan besarnya konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α yang terdeposit di daerah pernafasan bagian atas seperti hidung dan *trachea*, serta pernafasan bagian bawah seperti *bronchioles*. Melalui dasar perhitungan ini diharapkan dapat diaplikasikan untuk membuat variasi kemampuan bernapas tiap pekerja dan lamanya bekerja. Dengan demikian perhitungan ini bertujuan untuk memperkirakan beban organ pernafasan pekerja selama bekerja di daerah tersebut.

TEORI

Bernafas merupakan proses penghisapan sejumlah volume udara yang ada di udara ambien yang masuk melalui

hidung atau mulut. Kemampuan penghirupan udara ini dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti ukuran aerodinamik partikel, laju alir, kecepatan dan arah angin. Fraksi terhirup rata-rata untuk semua arah angin sebagai fungsi ukuran aerodinamik partikel (d_{ae}) dinyatakan dalam hubungan sebagai berikut [2].

$$E = 0,5 (1 + e^{-0,06d_{ae}}) \dots\dots\dots(1)$$

dengan $0 < d_{ae} \leq 100 \mu\text{m}$

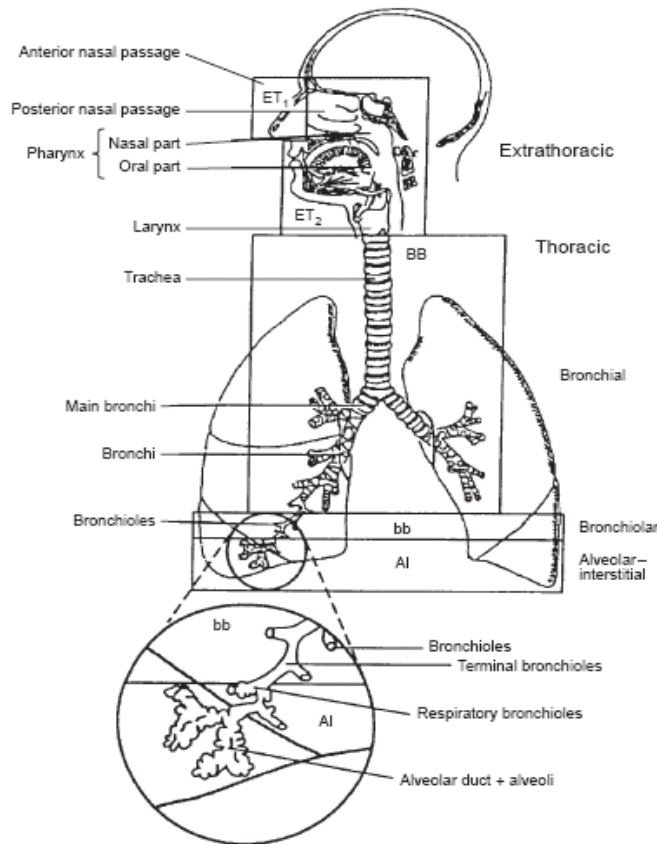
keterangan:

- E : Fraksi partikel udara yang terhirup
- d_{ae} : Diameter aerodinamik partikel (μm)

Nilai fraksi yang dihasilkan dari persamaan (1) tidak akan berubah apabila kecepatan angin 0,5 – 9 m/s. Untuk partikel yang lebih besar dari 100 μm , fraksi yang

terhirup belum diketahui dengan pasti. Namun beberapa penelitian menunjukkan fraksi yang terhirup sebesar 0,5 untuk partikel berukuran $> 100 \mu\text{m}$ [3].

Diameter geometris partikel yang paling umum ada di alam berukuran 0,001 sampai 100 μm . Ada dua cara yang biasa digunakan untuk menyatakan ukuran partikel yaitu diameter Stokes (d_{st}) dan diameter aerodinamis (d_{ae}) [4,5]. Hampir seluruh aerosol terdiri dari partikel yang mempunyai jangkauan ukuran yang lebar. Oleh karena itu aerosol biasanya dinyatakan sebagai fungsi dari distribusi ukuran. Untuk aerosol radioaktif, besarnya radioaktifitas dinyatakan dalam *Activity Median Aerodynamic Diameter* (AMAD). Jika aerosol radioaktif itu homogen maka *Mass Median Aerodynamic Diameter* (MMAD) akan sebanding dengan AMAD [2].



Gambar 1. Sistem pernafasan yang dikembangkan dalam *Human Respiratory Tract Model* [6]

Banyak negara telah mengembangkan model inhalasi partikel radioaktif di udara ke dalam sistem pernafasan manusia, diantaranya Mondal (*National Institute of Radiological Sciences*, Jepang), IMBA (*Health Protection Agency*, Inggris) atau Biokmod (*Oak Ridge National Laboratory*, USA). Semua pemodelan ini mengacu pada model biokinetik yang dikembangkan oleh *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) Publikasi 66 tahun 1994. Model sistem pernafasan manusia yang digunakan dalam ICRP Publikasi 66 mendeskripsikan model anatomi dan fisiologi tubuh yang lebih realistis. Model ini membagi sistem pernafasan ke dalam dua daerah yaitu daerah *extrathoracic* (ET) dan *thoracic* (Gambar 1). Jalur masuk udara dalam daerah ET dibagi menjadi dua kategori yaitu jalur anterior nasal (**ET₁**, hidung bagian luar), dimana endapan di dalamnya dibuang melalui sistem pembuangan di hidung seperti ekshalasi dan selaput lendir hidung, dan jalur posterior nasal yaitu hidung bagian dalam (**ET₂**). Jalur masuk udara pada thorax meliputi daerah *bronchi* (BB), *bronchioles* (bb) dan *alveolar-interstitial* (AI). Partikel yang terdeposit dalam jalur *thoracic* akan dibersihkan lewat darah melalui proses absorpsi dan diteruskan ke sistem pencernaan (GI, *Gastrointestinal Tract*).

Ada banyak mekanisme yang menyebabkan partikel terdeposit di dalam jalur pernafasan setelah partikel tersebut masuk melalui pernafasan hidung atau mulut. Mekanisme pertama adalah impaksi inersial karena partikel mempunyai massa, dan mekanisme ini untuk ukuran partikel $> 1 \mu\text{m}$. Probabilitas mekanisme ini dinyatakan dalam persamaan (2) dan (3).

$$P_1 = 1 - \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(\theta St) + \frac{1}{\pi} \sin[2 \cos^{-1}(\theta St)]$$

untuk $\theta St < 1$ (2)

$$P_1 = 1 \text{ untuk } \theta St \geq 1 \quad (3)$$

dengan P_1 : Probabilitas deposisi impaksi

θ : Sudut belokan atau sudut percabangan (dalam radian)

Bilangan Stokes =

$$St = \frac{C \rho_p r_p^2 v}{9 \mu R}$$

Mekanisme kedua adalah sedimentasi (pengendapan) yang disebabkan adanya gaya gravitasi yang bekerja pada partikel, dan ini penting untuk ukuran partikel $> 0,5 \mu\text{m}$. Probabilitas deposisi sedimentasi dihitung dengan persamaan (4).

$$P_s = 1 - \exp\left[\frac{-4gC\rho_p r_p^2 L \cos \phi}{9\pi\mu R v}\right] \quad (4)$$

Dengan P_s : Probabilitas deposisi sedimentasi

ρ_p : Kerapatan partikel

ϕ : Sudut inklinasi relatif terhadap gravitasi (dalam radian)

Mekanisme ketiga adalah difusi apabila ukuran partikel sangat kecil $< 0,5 \mu\text{m}$, gerak acak (gerak Brownian) dan tumbukan dengan molekul udara. Probabilitas deposisi difusi untuk aliran laminar dinyatakan dalam persamaan (5).

$$P_D = 1 - 0,819e^{-7,315x} - 0,0976e^{-44,61x} - 0,0325e^{-114x} - 0,0509e^{-79,31x^{2/3}}$$

(5)

Sedangkan untuk aliran turbulen, probabilitas deposisi difusi adalah

$$P_D = 2 \frac{\sqrt{Dt}}{R} \left(1 - 2 \frac{\sqrt{Dt}}{9R} + \dots \right) = 2,828x^{1/2} (1 - 0,314x^{1/2} + \dots)$$

(6)

dengan: P_D : Probabilitas deposisi difusi
 D : Koefisien difusi partikel, $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
 R : Jari-jari tabung atau jalur udara, cm
 \bar{v} : Kecepatan aliran rata-rata, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$
 L : Panjang tabung atau jalur
 x : $\frac{LD}{2R^2\bar{v}}$
 t : Waktu yang dibutuhkan ketika melewati jalur udara = L/\bar{v}

Rekomendasi ICRP untuk aerosol yang terhirup didasarkan pada inhalasi dan deposisi aerosol yang berukuran 1 μm . Berdasarkan ukuran aerosol 1 μm ini, model Biokmod [7] yang dikembangkan oleh Eckerman (ORNL, USA) dengan menggunakan persamaan (1) sampai (6) menghasilkan besarnya fraksi deposisi aerosol dalam sistem pernafasan adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Fraksi deposisi aerosol berukuran 1 μm untuk orang dewasa [5]

Daerah dalam sistem pernafasan	Fraksi deposisi (%)
ET1 (<i>extrathoracic</i> bagian atas)	14,89
ET2 (<i>extrathoracic</i> bagian bawah)	18,97
BB (<i>bronchi</i>)	1,29
bb (<i>bronchioles</i>)	1,95
AI (<i>alveolar-interstitial</i>)	11,48
-----	-----
---	48,58
Total	

Laju deposisi partikel di daerah paru-paru dinyatakan dengan [8] :

$$\text{Laju deposisi} = \text{laju pernafasan} \times \text{fraksi deposisi} \times \text{konsentrasi} \quad (7)$$

Fraksi laju pembuangan / pengeluaran oleh organ paru-paru per hari di daerah paru-paru mengikuti persamaan berikut:

$$M(t) = 0,005 \cdot e^{-0,02t} + 0,001 \quad (8)$$

dengan: $M(t)$: Fraksi laju pembersihan di paru-paru
 t : Waktu setelah inhalasi, dalam hari

TATA KERJA

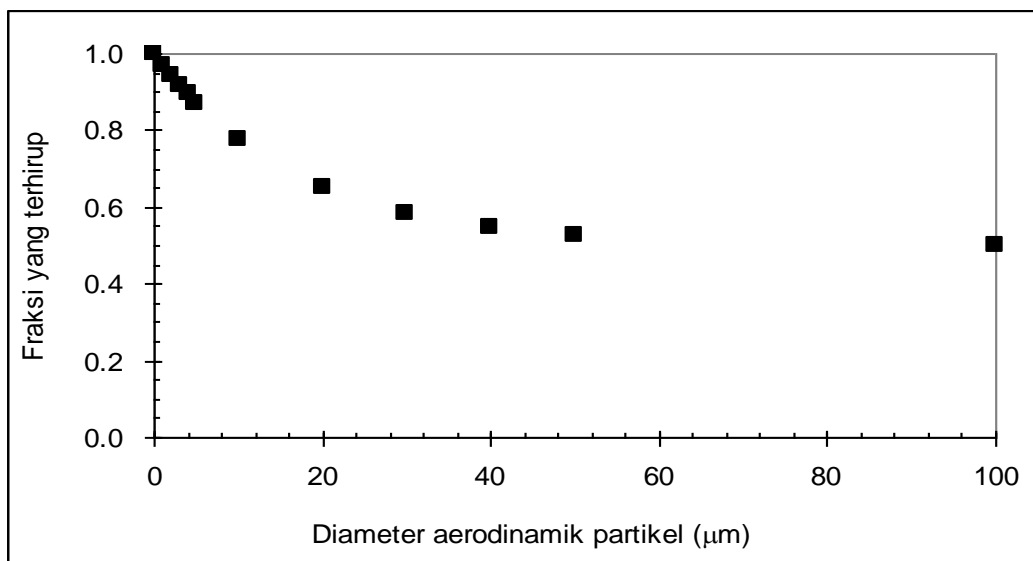
Udara di ruangan *Operating Area* dan *Service Area* dicuplik menggunakan filter *fiber glass* berdiameter 5,8 cm yang dipasang pada *air sampler* pada ketinggian 150 cm. Debu halus yang tertangkap filter selanjutnya dicacah menggunakan *Scintillation Alfa Counter* (SAC-4) dan dianalisis kandungan radionuklidanya menggunakan spektrometri gamma.

Perhitungan konsentrasi radionuklida pemancar α dari aerosol udara yang dihirup oleh orang yang berada di suatu ruangan dilakukan menggunakan program Microsoft Excel. Analisis ini didasarkan dari hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan model BiokMod (ORNL, USA). Data konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara yang telah disampling, dianalisis menggunakan model biokinetik ICRP 66 yang ada dalam model Biokmod [7] dan diperoleh konsentrasi aktifitas pada 5 (lima) daerah dalam sistem pernafasan yaitu daerah *extrathoracic*, *thoracic* dan respirasi. Besarnya konsentrasi aktifitas di tiap-tiap daerah ini dianalisis berdasarkan batas dosis yang diijinkan sesuai rekomendasi IAEA [6].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Besarnya fraksi partikel udara yang terhirup berdasarkan persamaan (1) dapat dilihat pada Gambar 1. Fraksi partikel yang terhirup akan semakin kecil secara eksponensial untuk diameter aerodinamik partikel yang membesar. Fraksi yang terhirup relatif stabil sebesar 50 % untuk partikel yang memiliki diameter lebih dari 50 μm . Fraksi terhirup 50% berarti apabila

konsentrasi udara sebesar 100 Bq/m^3 maka 50 Bq/m^3 partikel berukuran lebih dari $50 \mu\text{m}$ akan terhirup masuk ke dalam sistem pernafasan. Hal ini dapat dipahami mengingat partikel yang berukuran besar akan dibersihkan/ditahan terlebih dahulu oleh bulu-bulu dan selaput lendir yang ada di daerah hidung (ET_1)



Gambar 1. Fraksi aerosol yang terhirup fungsi diameter aerodinamis partikel

Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α di udara dalam *operating* dan *service area* Instalasi Radiometalurgi (IRM) telah dipantau dengan berbagai kondisi sistem tata udara (VAC) [1]. Dalam kondisi normal dan sistem VAC mati selama 8 jam, konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara di kedua daerah itu menunjukkan nilai

yang masih di bawah batas yang diijinkan (20 Bq/m^3). Sementara itu, dalam kondisi sistem VAC mati lebih dari 50 jam (lebih dari 2 hari), konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara di kedua daerah itu melampaui batas yang diijinkan (Tabel 1). Hal ini ditunjukkan dalam penulisan besarnya konsentrasi dibuat dengan huruf tebal

Tabel 2. Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara dalam berbagai kondisi sistem tata udara di laboratorium IRM [1]

Kondisi sistem tata udara (VAC)	Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara (Bq/m^3)	
	<i>Operating area</i>	<i>Service area</i>
Kondisi normal	1,227	1,570
VAC mati 8 jam	3,970	3,739
VAC mati 51 jam	38,738	26,482

Besarnya konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α udara yang tercantum dalam Tabel 2, tidak seluruhnya terhirup oleh orang yang bekerja di daerah itu. Berdasarkan pemodelan Biokmod,

perhitungan konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α dalam 5 daerah sistem pernafasan untuk partikel yang berukuran 1 μm menghasilkan besarnya konsentrasi aktifitas yang dirangkum dalam Tabel 3.

Tabel 3. Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α berukuran 1 μm dalam sistem pernafasan hasil perhitungan menggunakan Model Biokmod [7]

Daerah sistem pernafasan	Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α (Bq/m^3)					
	Operating area			Service area		
	Normal	VAC Off 8 jam	VAC Off 51 jam	Normal	VAC Off 8 jam	VAC Off 51 jam
ET1 (extrathoracic)	0,183	0,591	5,768	0,234	0,557	3,943
ET2 (extrathoracic)	0,233	0,753	7,349	0,298	0,709	5,024
BB (bronchi)	0,016	0,051	0,500	0,020	0,048	0,342
bb (bronchioles)	0,024	0,077	0,755	0,031	0,073	0,516
AI (alveolar-interstitial)	0,141	0,456	4,447	0,180	0,429	3,040

Konsentrasi aktifitas radionuklida pemancar α dalam Tabel 3 menunjukkan bahwa deposisi radionuklida pemancar banyak mengendap di daerah *extrathoracic* (ET) dan *alveolar-intertitial* (AI). Kondisi ini terjadi karena ukuran partikelnya 1 μm cukup kecil sedangkan daerah *bronchi* maupun *bronchioles* merupakan daerah yang berbentuk seperti pipa sehingga partikel dapat lolos dengan mudah. Mekanisme sedimentasi dan elektrostatik dimungkinkan terjadi di daerah ini. Sedangkan pada daerah *extrathoracic* terdapat bulu-bulu hidung dan selaput lendir yang membuat partikel dengan mudah terdeposisi di daerah ini. Begitu pula deposisi di daerah AI, konsentrasinya besar karena daerah ini merupakan jaringan lunak sehingga partikel lebih mudah mengendap.

Beban paru-paru akibat deposisi radionuklida pemancar α dapat dihitung dari laju deposisi radionuklida tersebut yang terhirup per gram paru-paru. Apabila kita menggunakan asumsi laju pernafasan

manusia standar sebesar 20 liter per menit dan berat paru-paru adalah 1,4% dari berat tubuh maka laju deposisi radionuklida pemancar α di daerah paru-paru untuk orang yang melakukan aktifitas ringan di daerah tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan (7). Hasil perhitungan laju deposisi tersebut ditampilkan dalam Tabel 4. Laju deposisi ini menggunakan hitungan fraksi deposisi untuk pernafasan melalui hidung sebesar 0,23 dengan partikel berukuran 1 μm [7]. Apabila hitungannya menggunakan pernafasan mulut maka fraksi deposisinya sebesar 0,3. Sedangkan aktifitas radionuklida pemancar α di paru-paru yang ditampilkan dalam kolom 4 dan 5 pada Tabel 4 dihitung berdasarkan asumsi berat badan 65 kg dan lamanya bekerja di daerah tersebut adalah 4 jam.

Seperti dapat dibaca pada Tabel 4, beban paru-paru akibat radiasi interna karena penghirupan udara selama 4 jam per hari dalam kondisi VAC normal sebesar 1.232 Bq

untuk operating area dan 1.577 Bq untuk orang yang bekerja di *service area*. Dalam kondisi VAC mati selama 51 jam, beban paru-

paru meningkat tajam mencapai lebih dari 35 kBq per hari atau sekitar $1 \mu\text{Ci}$.

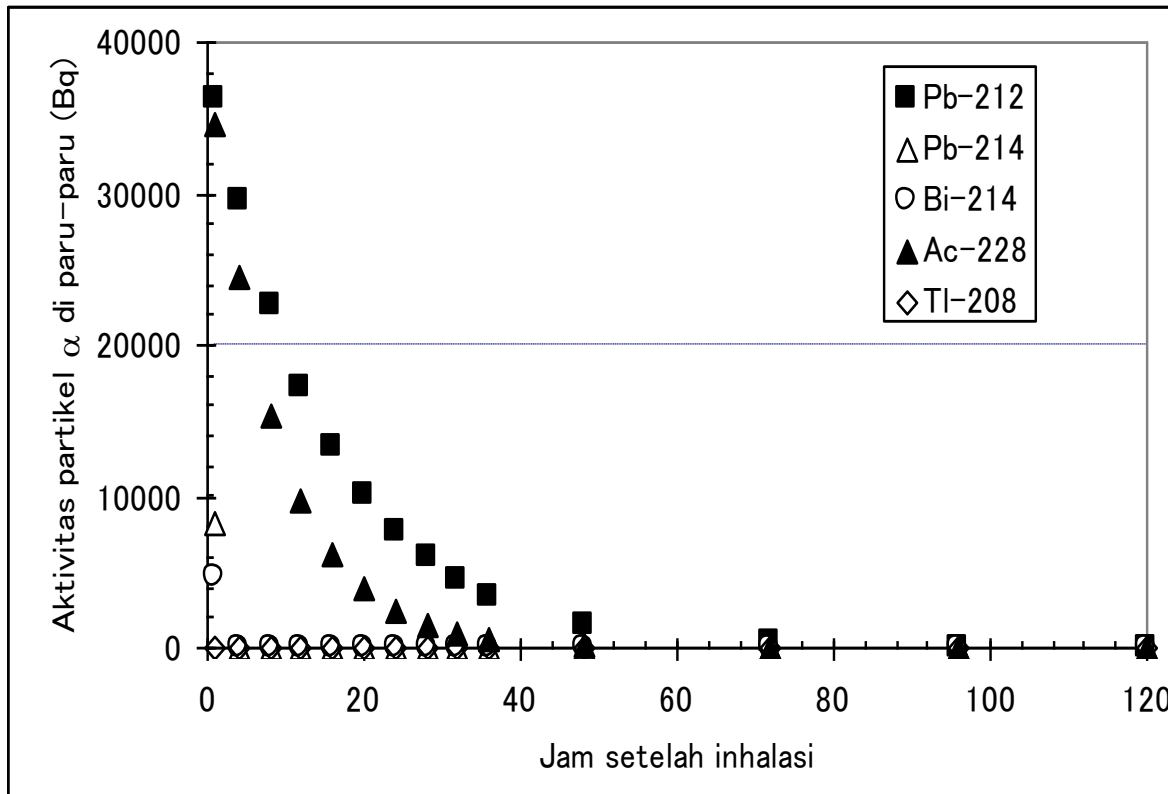
Tabel 4. Laju deposisi radionuklida pemancar α berukuran $1 \mu\text{m}$ dan beban radioaktifitas dalam paru-paru per hari

Kondisi sistem tata udara (VAC)	Laju deposisi radionuklida pemancar α (Bq/menit.g.paru-paru)		Aktifitas radionuklida pemancar α di paru-paru (Bq/hari)	
	Operating Area	Service Area	Operating Area	Service Area
Kondisi normal	0,006	0,007	1.232	1.577
VAC mati 8 jam	0,018	0,017	3.988	3.756
VAC mati 51 jam	0,178	0,168	38.917	36.651

Dilihat dari jenis radionuklidanya, udara ruangan di *operating area* dan *service area* terdiri dari Pb-212, Pb-214, Tl-208, Bi-214, Ac-228 dan K-40 [1]. Semua radionuklida tersebut mempunyai waktu paruh pendek berorde menit, kecuali Pb-212 dan Ac-228 yang waktu paruhnya masing-masing 10, 24 jam dan 6,13 jam. Sedangkan K-40 meskipun berumur panjang ($1,28 \times 10^9$ tahun), namun radionuklida ini merupakan radionuklida alam yang memang sudah ada di dalam tubuh. Oleh karena itu, walaupun aktifitas radionuklida gros α cukup besar, apabila disimulasikan untuk radionuklida di atas, maka hanya dalam waktu 16 jam, aktifitasnya sudah mendekati nol (Gambar 2).

Pb-212 dan Ac-228 merupakan radionuklida yang perlu diperhatikan karena

pada waktu aktifitas radionuklida lainnya sudah diabaikan setelah 16 jam inhalasi, tetapi Pb-212 dan Ac-228 aktifitasnya masih sekitar $1/3$ dan $1/7$ dari aktifitas ketika penghirupan. Dilihat dari segi aktifitasnya memang sangat kecil dan sudah mendekati aktifitas ketika kondisi VAC normal, namun hasil luruhan Pb-212 yaitu Bi-212 dan Po-214 yang memancarkan partikel α dan kemudian menjadi isotop stabil Pb-206 inilah yang berpotensi menyebabkan kanker. Sedangkan Ac-228 akan meluruh menjadi Th-228 yang berumur panjang (1,91 tahun) dengan memancarkan partikel α . Begitu pula dengan Pb-214 dan Bi-214 yang dalam waktu 2 jam saja aktifitasnya sudah sama dengan aktifitas udara dalam kondisi VAC normal, namun hasil luruhannya yaitu Po-214 merupakan pemancar α yang dapat memicu timbulnya kanker paru-paru.



Gambar 2. Fraksi aktifitas radionuklida pemancar α yang terdeposit di paru-paru setelah 4 jam inhalasi. Garis putus-putus menunjukkan batas turunan yang diijinkan

Seperti halnya organ tubuh lainnya, paru-paru juga memiliki sistem pertahanan tubuh terhadap serangan racun dari luar tubuh. Radionuklida yang terdeposit di paru-paru akan dibuang oleh sistem yang ada di jaringan paru-paru. Pembuangan ini nantinya bisa melalui proses ekshalasi (pengeluaran udara melalui hidung atau mulut), keringat, urine, feses ataupun darah yang keluar ketika mengalami luka. Laju pembuangan (*clearance rate*) radionuklida oleh paru-paru yang dinyatakan oleh persamaan (8) menghasilkan aktifitas yang selalu tersisa dalam paru-paru. Seperti tampak pada Gambar 2, setelah 40 jam menghirup radionuklida gros α dalam kondisi sistem VAC dimatikan selama 51 jam, radionuklida gros α yang terdeposit dalam paru-paru relatif stabil walaupun sangat kecil. Hal ini dapat dipahami karena ada faktor konstanta 0,001 dalam laju *clearance* per hari sesuai persamaan (8). Akumulasi yang terus-

menerus inilah yang harus dihindari agar tidak menaikkan risiko kanker paru-paru karena adanya penghirupan radionuklida gros α yang umumnya berasal dari radionuklida alamiah. Dengan demikian, apabila pekerja ingin melakukan perbaikan sistem VAC (misalnya penggantian filter HEPA atau lainnya) yang memaksanya harus mematikan sistem VAC maka harus memperhatikan lamanya bekerja di kedua daerah ini. Sistem pengaturan lamanya bekerja dan penggiliran pekerja merupakan cara yang dapat dipakai untuk meminimalisasi terjadinya risiko penyakit saluran pernafasan. Namun demikian, apabila keadaan memaksa yang mengharuskan untuk bekerja setelah sistem VAC mati selama 50 jam misalnya untuk perbaikan filter HEPA, maka pekerja maksimum diijinkan hanya 3 jam saja. Setelah itu pekerja yang bersangkutan harus diganti dengan pekerja lain dengan lama waktu bekerja yang lebih singkat dari pekerja

pertama, karena adanya kenaikan aktifitas setelah sistem VAC mati.

SIMPULAN

Besarnya aktifitas radionuklida pemancar α yang masuk ke dalam sistem pernafasan sangat bergantung pada besarnya diameter aerodinamis aerosol udara. Apabila ukuran aerodinamis aerosol udaranya kecil sekitar 1 μm maka deposisi radionuklida gros α terbesar mengendap di daerah *extrathoracic* dan *alveolar-interstitial*. Pada saat sistem VAC IRM dimatikan selama 50 jam, beban paru-paru akibat penghirupan radionuklida pemancar α (khususnya Pb-212 dan Ac-228) harus mendapat perhatian khusus karena hingga 8 jam setelah penghirupan konsentrasinya masih di atas batas yang diijinkan. Oleh karena itu, apabila keadaan yang memaksa untuk bekerja dalam keadaan VAC mati setelah 50 jam, maka pembatasan waktu bekerja secara ketat harus diberlakukan dengan maksimum lamanya bekerja adalah 3 jam.

DAFTAR PUSTAKA

1. BUDI PRAYITNO dan SRI WAHYUNINGSIH." Pengamatan Radioaktifitas Alfa Di Udara Instalasi Radiometalurgi Saat Sistem Tata Udara Dimatikan". Prosiding seminar Pengelolaan Perangkat Nuklir, ISSN 1978-9858, Tangerang 2007.
2. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). " *Deposition, Retention and Dosimetry of Inhaled Radioactive Substances*".NCRP Report No. 125,USA, 1997.
3. USACHPPM." *Inhalability and Respirability of Airborne Particles and Adjusting the ALI and CEDE for Various Particle Sizes*. Appendix D. HRA Consultation No.26-MF-7555D, September 15, 2000.
4. RUZER, L.S and HARLEY, N.H. (Ed.). " *Aerosols Handbook: Measurement, Dosimetry and Health Effects*". CRC Press, 2005.
5. HINDS, W.C. " *Aerosol Technology: Properties, Behavior and Measurement of Airborne Particles*". John Wiley and Sons, USA, 1982.
6. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). " *Committee 2: Supporting Guidance Document Interpretation of Bioassay Data. Tables And Figures*". Vienna, 26 January 2006.
7. ECKERMAN, K.F. " *Biokinetic Model of Respiratory Tract*. Oak Ridge National Laboratory". Tennessee, 2000.
8. MASSARO, E.J.(Ed.). " *Handbook of Human Toxicology*". CRC Press, New York 1997.