
PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS UDARA BUANG INSTALASI RADIOMETALURGI TAHUN 2008

Susanto

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

ABSTRAK

PEMANTAUAN RADIOAKTIVITAS UDARA BUANG INSTALASI RADIOMETALURGI TAHUN 2008. Pemantauan Radioaktivitas Udara Buang Instalasi Radiometalurgi Tahun 2008, telah dilakukan. Laboratorium IRM berfungsi untuk melakukan penelitian, pengujian terhadap elemen bahan bakar dan komponen reaktor, dimana proses tersebut akan menimbulkan gas produk fisi dan aerosol yang mengandung radioaktif yang dapat terdispersi ke udara. Tujuan pemantauan udara buang adalah untuk mengetahui konsentrasi radioaktivitas α dan β yang dilepaskan dari cerobong IRM, agar dapat diambil tindakan yang cepat untuk keselamatan radiasi lingkungan apabila melebihi nilai batas yang diijinkan. Metoda pemantauan radioaktivitas α dan β tersebut dilakukan dengan cara pencuplikan udara buang dengan menggunakan *air sampler*. Kemudian cuplikan tersebut dicacah dengan alat *Portable Scaler Ratemeter (PSR-8)*. Hasil pemantauan menunjukkan konsentrasi tertinggi untuk radioaktivitas *gross* α selama tahun 2008 sebesar $2,43 \text{ Bq/m}^3$, sedangkan konsentrasi radioaktivitas *gross* β sebesar $16,44 \text{ Bq/m}^3$. Konsentrasi rerata tahunan untuk radioaktivitas α di udara sebesar $(0,60 \pm 0,62) \text{ Bq/m}^3$ dan untuk konsentrasi rerata radioaktivitas β di udara sebesar $(2,27 \pm 3,63) \text{ Bq/m}^3$. Radioaktivitas α dan β yang dilepas dari cerobong IRM selama tahun 2008 tidak menimbulkan dampak radiologi dan aman bagi masyarakat serta lingkungan disekitar gedung IRM.

Kata kunci : radioaktivitas α dan β , pemantauan, udara buang.

PENDAHULUAN

Instalasi Radiometalurgi (IRM) berfungsi untuk melakukan penelitian, pengujian dan pemeriksaan terhadap elemen bakar pasca irradiasi dan komponen reaktor. Fasilitas IRM terdiri dari laboratorium dan gedung *Media & Energy Supply (MES)*. Masalah yang dibahas pada penulisan ini adalah pemantauan dari limbah gas/aerosol yang dibuang melewati cerobong asap gedung Instalasi Radiometalurgi (IRM) yang terbawa oleh sistem *Ventilation Air Conditioning (VAC)*. Sebelum dibuang limbah gas aerosol tersebut disaring memakai media pengumpul kontaminan udara berupa *filter High Efficiency Particulate Absorber (HEPA)* yang berlapis atau bertingkat. Khusus partikulat kontaminan radioaktif dari *hot-cell*, juga disediakan filter *HEPA* pada *hot cell* sebelum masuk ke *ducting* sistem ventilasi. Gas/aerosol dibuang melalui cerobong yang berada di sisi luar IRM dengan ketinggian 60 m dari permukaan tanah.

Tujuan pemantauan radioaktivitas udara buang adalah untuk mengetahui besarnya radioaktivitas α dan β yang dilepaskan dari cerobong IRM ke lingkungan pada tahun 2008. Ruang lingkup penulisan adalah pemantauan radioaktif gas/aerosol yang dilakukan secara rutin dan kontinyu terhadap udara buang. Metoda yang dilakukan adalah dengan melakukan pencuplikan, pencacahan dan melakukan pencatatan hasil pantau radioaktivitas α dan β setiap bulan, dan dibuatkan grafik radioaktivitas udara buang. Pemantauan udara buang tersebut dilakukan dengan cara

mencuplik udara buang yang melewati cerobong asap dengan menggunakan pompa penyedot udara. Hasil cuplikan tersebut kemudian dicacah secara *gross* dengan menggunakan alat pencacah radioaktivitas α dan β . Selanjutnya dilakukan pencatatan dan evaluasi terhadap radioaktivitas udara buang tersebut berdasarkan batasan yang diizinkan, (*Maximum Permissible Concentration = MPC*) yaitu 20 Bq/m^3 untuk U-235 dan U-238 berikut turunannya dalam harian untuk pelepasan di dalam laboratorium^[1]. Untuk keluaran *stack monitor* mengacu kebatasan yang sudah dimasukkan faktor pengenceran udara dan perhitungan dari persamaan *Pasquill*, yaitu sebesar 3850 Bq/m^3 untuk α dan sebesar 38500 Bq/m^3 untuk β ^[2].

TEORI

Ketentuan umum proteksi radiasi terhadap pekerja radiasi dilakukan dengan cara pembatasan penyinaran, pemantauan, dan pencatatan dosis radiasi serta pengawasan kesehatan terhadap pekerja radiasi. Untuk kebutuhan keselamatan pekerja radiasi selama operasional, dilakukan dengan cara menyediakan sarana perlengkapan teknis dan administrasi pelaksanaan yang meliputi segala sesuatu yang menyangkut tatalaksana kerja, dengan memperhatikan peraturan yang dibuat oleh badan yang berwenang.

Proteksi radiasi dimaksudkan sebagai usaha untuk melindungi seseorang, dan juga anggota masyarakat secara keseluruhan terhadap kemungkinan terjadinya akibat biologi yang merugikan. Sedangkan tujuan proteksi radiasi adalah membatasi peluang terjadinya akibat stokastik atau resiko akibat pemakaian radiasi yang dapat diterima oleh pekerja dan mencegah terjadinya bahaya akibat non-stokastik dari radiasi yang membahayakan pekerja atau seseorang.

Ketentuan tentang sistem pembatasan dosis dimaksudkan untuk mengatur dengan lebih tegas nilai penyinaran dan dosis radiasi tertinggi yang dapat diterima personel didasarkan pada jumlah dosis yang berasal dari radiasi eksternal dan radiasi internal. Nilai Batas Dosis (NBD) untuk personel berdasarkan Keputusan Kepala BAPETEN No. 01/Ka-BAPETEN/V-1999, yaitu sebesar 50 mSv/tahun (pekerja radiasi) dan 5 mSv/tahun (masyarakat)^[1,3].

Setiap pengusaha instalasi nuklir harus menjamin agar baku tingkat radioaktivitas penyinaran yang berasal dari instalasinya pada anggota masyarakat secara keseluruhan serendah mungkin sesuai dengan sistem pembatasan dosis. Baku Tingkat Radioaktivitas adalah nilai batas yang dinyatakan dalam kadar tertinggi yang diizinkan yaitu batas kadar radionuklida yang diperbolehkan terdapat di lingkungan, namun tidak menimbulkan gangguan terhadap makhluk hidup, tumbuh-tumbuhan dan atau benda ^[1].

Gedung IRM dibagi menjadi dua daerah kerja yaitu: daerah perkantoran (*office area*) dan daerah laboratorium (*laboratory area*). Gedung perkantoran terdiri dari tiga

lantai yang saling berbatasan dengan laboratorium. Daerah laboratorium terdiri dari 4 lantai dan digunakan untuk pemeriksaan elemen bakar pasca irradiasi yang meliputi: pemeriksaan dan pengujian (merusak dan tidak-merusak) di dalam bilik panas (*hotcell*), serta analisis kimia dan radiokimia, laboratorium *hotcell*, laboratorium kimia fisika, laboratorium radiokimia, dan laboratorium fisika kesehatan.

Sistim ventilasi (*VAC*) untuk perkantoran dan laboratorium tidak saling berhubungan. Sistim ventilasi (*VAC*) untuk perkantoran dirancang seperti sistim ventilasi perkantoran pada umumnya. Sedangkan sistim ventilasi untuk laboratorium, difungsikan untuk mengontrol konsentrasi kontaminasi udara di daerah kerja dan keradioaktifan udara buang. Sumber radioaktif tersebut berbentuk gas/aerosol di IRM yang berasal dari proses pengujian merusak bahan bakar bekas. Gas produk fisi dan aerosol berupa partikulat-partikulat kecil yang mengandung radioaktif dapat terdispersi ke udara saat terjadi proses pengujian. Guna mencegah tersebarnya kontaminan aerosol ke atmosfer, udara buang laboratorium IRM disaring melalui 2 tingkat filtrasi *HEPA* dengan tingkat efisiensi minimal 99,97% untuk aerosol berukuran 0,3 μm . Bila filter tersebut telah jenuh yang ditandai dengan perbedaan yang besar antara sisi atas angin dan bawah angin, filter segera diganti. Sedangkan jaminan keselamatan untuk buangan aerosol ke lingkungan ditunjukkan dari pemantauan keradioaktifan udara cerobong (*stack monitor*). Udara buang dilepas ke lingkungan dengan laju pembuangan sebesar 14.277 m^3/jam setelah mengalami penyaringan dengan filter *HEPA* secara bertingkat.

Tinggi cerobong (*stack*) IRM adalah 60 m dengan diameter 2 m . Sistem udara buang berasal dari 3 jalur yaitu: jalur laboratorium, jalur *fume hood* dan jalur *hotcell*. Pemantauan keradioaktifan udara dilakukan dengan cara mencuplik udara buang yang melewati cerobong (*stack*). Pencuplikan tersebut menggunakan pompa penyedot udara yang disaring dengan kertas filter yang diambil sesaat (interval waktu tertentu), kemudian mencacahnya. Pengambilan cuplikan dan pencacahannya tidak terintegrasi, sehingga data yang dihasilkan merupakan data yang terputus. Cuplikan kontaminan radioaktif di udara yang terkumpul pada kertas filter kemudian dicacah dengan pencacah radiasi α dan β secara total (*gross counting*). Dengan suatu perumusan yang membandingkan antara hasil cacahan terhadap volume udara yang tercuplik akan memberikan konsentrasi keradioaktifan udara tersebut ^[3].

Pencacahan cuplikan dapat dilaksanakan segera setelah pengambilan cuplikan untuk mengetahui konsentrasi radioaktivitas α atau β . Untuk mengetahui konsentrasi radioaktivitas α atau β di udara, dilakukan pencacahan terhadap cuplikan udara buang, kemudian dihitung menggunakan rumus ^[4] :

$$A_u = \frac{C}{ef.D.t} \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

- Au = Konsentrasi zat-zat radioaktif di udara (Bq/m^3)
C = laju cacahan (cps)
ef = efisiensi pencacahan (%)
D = debit penghisapan udara (m^3/menit)
T = lama pencuplikan udara (menit).

METODOLOGI

Untuk melakukan kegiatan ini metoda yang dipakai adalah melakukan pemantauan udara yang dibuang melalui cerobong IRM dengan cara mencuplik udara yang melewati cerobong buang dengan menggunakan pompa penyedot udara. Hasil cuplikan tersebut kemudian dicacah secara *gross* dengan menggunakan alat pencacah radioaktivitas α dan β . Selanjutnya dilakukan pencatatan dan evaluasi terhadap radioaktivitas udara buang tersebut. Bahan-bahan yang diperlukan dalam pengambilan cuplikan udara adalah kertas *filter* tipe *GF-8* buatan *Schleicher & Schuell* (diameter: 5,8 cm). Sedangkan alat – alat yang diperlukan adalah pompa hisap jenis *low volume air sampler*, buatan *Victoren* dengan *flowrate* 15 – 35 lpm, alat pencacah cuplikan : *portable scaler ratemeter* (PSR-8), buatan *Nuclear Enterprises*, pinset, gunting.

Untuk menjaga agar peralatan selalu dalam kondisi baik, perlu dilakukan persiapan dan pemeriksaan alat. Pemeriksaan dan persiapan tersebut meliputi pengecekan oli pelumas pompa, sambungan kelistrikan, sambungan pipa ke cerobong asap (*stack*) , kebersihan dan kondisi kertas filter (tidak boleh kotor dan cacat secara fisik), dengan demikian kesalahan dalam pengambilan sampel udara buang bisa ditekan sekecil mungkin.

Untuk mendapatkan hasil yang optimal, dalam pengambilan sampel udara buang dilakukan secara urut. Langkah pertama adalah dengan memperkuat dudukan pompa penyedot udara jenis *low volume air sample* untuk mengurangi getaran yang berlebihan. Kemudian menyambung pipa spiral dari pompa ke (*stack monitor*). Kertas *filter* dibersihkan dan dirapihkan, kemudian dipasang pada pompa penghisap udara buang. Mesin pompa dihidupkan dengan laju alir (*flow rate*) sebesar 30 l/menit, setelah 15 menit kemudian pompa dimatikan. Kertas filter diambil dan dilakukan pencacahan dengan menggunakan alat *Portable Scaler Ratemeter-8 (PSR-8)*.

Sebelum dilakukan pencacahan cuplikan, dilakukan pencacahan latar terlebih dahulu dengan cara kertas *filter blank* (latar) dimasukkan pada laci *filter*. Tombol *preset time* diatur sesuai dengan yang diinginkan, tekan tombol *start* dengan waktu 3 menit. Dilakukan pencacahan sebanyak 3 kali, masing-masing hasil cacah latar tersebut dicatat, diambil rata-rata dan diubah menjadi cacahan per detik (cps).

Pencacahan cuplikan Radioaktivitas α dan β dilakukan secara bergantian. Untuk radioaktivitas α dilakukan dengan memasang *probe*/detektor seri AP2 dan untuk radioaktivitas β dipasang *probe*/detektor seri BP ke alat *Portable Scaler Ratemeter-8 (PSR-8)*. Untuk melakukan pencacahan cuplikan radioaktivitas α dan β tata cara pelaksanaan pekerjaan sama dengan melakukan pencacahan cuplikan latar seperti di atas. Perhitungan radioaktivitas α dan β dari cuplikan tersebut menggunakan persamaan (1) dan hasil akhirnya dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\bar{A}_u = A_u \pm sA_u \dots\dots\dots(2)$$

dengan :

\bar{A}_u = Konsentrasi rerata radioaktivitas di udara (Bq/m^3)

sA_u = Deviasi rata-rata radioaktivitas di udara (Bq/m^3)

Pengambilan sampel udara buang dilakukan dalam satu bulan minimal 3 kali, atau sewaktu waktu jika diperlukan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengambilan sampel udara buang, secara teknis di lapangan banyak yang harus diperhatikan, atur jarak antara pompa dengan cerobong sependek mungkin, menjaga kestabilan hisapan pompa. Selain tersebut di atas sistem pengambilan sampel udara buang dipengaruhi oleh beberapa parameter, antara lain aktivitas cacahan pada filter, jenis radiasi yang dicacah, efisiensi alat, *filter*, lama pencuplikan, dan debit udara.

Hasil pemantauan radioaktivitas udara buang α dan β yang dilakukan di Gedung 20 IRM selama tahun 2008 tersebut terdapat pada Tabel-1 dan Tabel-2,

Tabel-1. Konsentrasi radioaktivitas α udara buang IRM tahun 2008^[5]

Bulan	C _{netto} (Cps)	Ef (%)	D (m ³ /menit)	T (menit)	Au (Bq/m ³)	keterangan
Januari	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	
Bulan	C _{netto} (Cps)	Ef (%)	D (m ³ /menit)	T (menit)	Au (Bq/m ³)	keterangan
Februari	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,23	tertinggi
Maret	0,038	37	0,03	15	0,16	
	0,026	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,2	tertinggi
	0,033	37	0,03	15	0,1	
April	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	

	0,016	37	0,03	15	0,73	tertinggi
Mei	0,121	37	0,03	15	0,63	
	0,105	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,8	tertinggi
Juni	0,133	37	0,03	15	0,7	
	0,116	37	0,03	15	0,6	
	0,1	37	0,03	15	0,7	
Juli	0,116	37	0,03	15	0,83	tertinggi
	0,138	37	0,03	15	0,3	
	0,05	37	0,03	15	1,6	
Agustus	2,66	37	0,03	15	2,43	tertinggi
	0,405	37	0,03	15	1,5	
	0,25	37	0,03	15	1,2	
	0,2	37	0,03	15	1,46	
September	0,243	37	0,03	15	0,16	
	0,026	37	0,03	15	0,83	tertinggi
	0,138	37	0,03	15	0,7	
Oktober	0,116	37	0,03	15	2,4	tertinggi
	0,4	37	0,03	15	1,2	
	0,2	37	0,03	15	0,6	
Nopember	0,1	37	0,03	15	0,7	tertinggi
	0,116	37	0,03	15	0,53	
	0,088	37	0,03	15	0,33	
Desember	0,055	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	
	0,016	37	0,03	15	0,1	
Konsentrasi rerata radioaktivitas α di udara (\bar{A}_u) = (0,60 \pm 0,62) Bq/m ³						

Tabel-2. Konsentrasi radioaktivitas β udara buang IRM tahun 2008^[5]

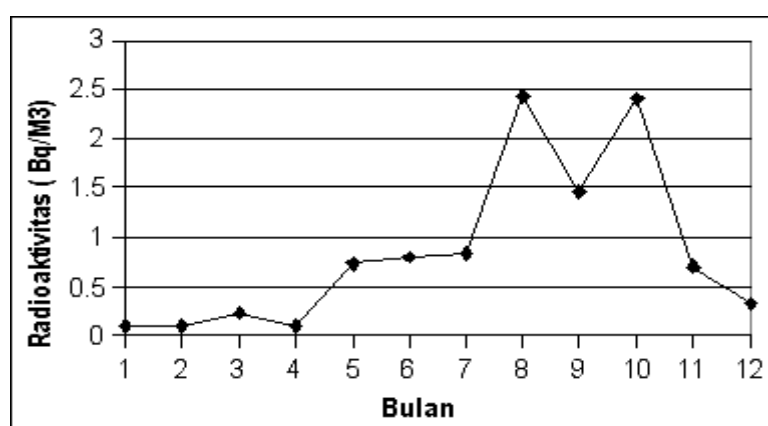
Bulan	C _{netto} (Cps)	Ef (%)	D (m ³ /menit)	T (menit)	Au (Bq/m ³)	Keterangan
Januari	0,016	24	0,03	15	0,15	
	0,016	24	0,03	15	0,15	
	0,016	24	0,03	15	0,15	
Bulan	C _{netto} (Cps)	Ef (%)	D (m ³ /menit)	T (menit)	Au (Bq/m ³)	Keterangan
Februari	0,71	24	0,03	15	6,57	tertinggi
	0,16	24	0,03	15	1,48	
	0,066	24	0,03	15	0,61	
Maret	0,033	24	0,03	15	0,31	
	0,038	24	0,03	15	0,35	tertinggi
	0,016	24	0,03	15	0,15	
	0,016	24	0,03	15	0,15	
April	0,11	24	0,03	15	1,02	
	0,166	24	0,03	15	1,54	tertinggi
	0,076	24	0,03	15	0,7	
	0,06	24	0,03	15	0,56	

Mei	1,776	24	0,03	15	16,44	tertinggi
	0,22	24	0,03	15	2,04	
	0,12	24	0,03	15	1,11	
Juni	1,31	24	0,03	15	12,11	tertinggi
	1,255	24	0,03	15	11,62	
	0,588	24	0,03	15	5,44	
Juli	0,016	24	0,03	15	0,15	
	0,138	24	0,03	15	1,28	
	0,166	24	0,03	15	1,54	tertinggi
Agustus	0,06	24	0,03	15	0,56	
	0,126	24	0,03	15	1,17	
	0,376	24	0,03	15	3,48	tertinggi
	0,176	24	0,03	15	1,63	
September	0,36	24	0,03	15	3,33	
	0,471	24	0,03	15	4,36	tertinggi
	0,2	24	0,03	15	1,85	
Oktober	0,183	24	0,03	15	1,69	
	0,243	24	0,03	15	2,25	tertinggi
	0,171	24	0,03	15	1,58	
Nopember	0,021	24	0,03	15	0,19	
	0,038	24	0,03	15	0,35	tertinggi
	0,033	24	0,03	15	0,31	
Desember	0,016	24	0,03	15	0,15	tertinggi
	0,016	24	0,03	15	0,15	
	0,016	24	0,03	15	0,15	

Konsentrasi rerata radioaktivitas β di udara ($\bar{A}u$) = $(2,27 \pm 3,63)$ Bq/m³

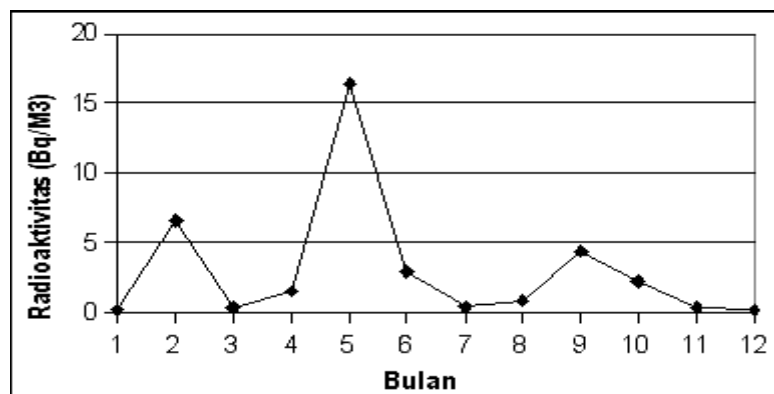
Dari Tabel-1 dan Tabel-2 disajikan dalam bentuk Gambar-1 dan Gambar-2. Hasil pemantauan yang diperoleh tersebut adalah konsentrasi radioaktivitas *gross* α dan *gross* β , yang merupakan gabungan udara buang yang berasal dari jalur laboratorium, jalur *fumehood* dan jalur *hotcell*.

Konsentrasi radioaktivitas udara buang IRM tertinggi selama tahun 2008, untuk radiasi- α sebesar 2,43 Bq/m³ dapat dilihat pada Gambar-1.



Gambar-1 : Grafik radioaktivitas α udara buang di IRM tahun 2008

Untuk radiasi- β sebesar $16,44 \text{ Bq/m}^3$ dan dapat dilihat pada Gambar-2.



Gambar-2 : Grafik radioaktivitas β maksimum udara buang di IRM tahun 2008

Peningkatan besaran radioaktivitas yang tinggi, terjadi untuk radiasi β pada bulan Februari yaitu sebesar $6,57 \text{ Bq/m}^3$ dari bulan sebelumnya (Januari = $0,15 \text{ Bq/m}^3$). Kemudian terjadi peningkatan lagi pada bulan Mei sebesar $16,44 \text{ Bq/m}^3$, selanjutnya sedikit menurun pada bulan Juni menjadi sebesar $12,11 \text{ Bq/m}^3$, sedangkan untuk bulan - bulan yang lain radiasi β berada pada tingkat yang sama. Untuk radiasi α terjadi peningkatan pada bulan Agustus sebesar $2,43 \text{ Bq/m}^3$ dan Oktober sebesar $2,4 \text{ Bq/m}^3$. Konsentrasi rerata radioaktivitas α di udara sebesar $(0,60 \pm 0,62) \text{ Bq/m}^3$ dan konsentrasi rerata radioaktivitas β di udara sebesar $(2,27 \pm 3,63) \text{ Bq/m}^3$. Besaran konsentrasi radiasi α dan β udara buang IRM tertinggi pada tahun 2008 tersebut jika dibandingkan dengan batasan konsentrasi maksimum yang diijinkan untuk batasan pelepasan maksimum *stack* IRM masih jauh di bawah batas maksimum yang diijinkan, yaitu sebesar 3850 Bq/m^3 untuk α dan sebesar 38500 Bq/m^3 untuk β [2].

Pada bulan – bulan yang lain selama tahun 2008 radiasi α berada pada tingkat yang tidak jauh berbeda. Peningkatan radiasi α dan β tersebut, disebabkan diantaranya oleh adanya kegiatan pekerjaan perbaikan di *Hot Cell* 107 dan juga dipengaruhi oleh kegiatan penelitian ruang 135, 136 dan ruang 137.

Setelah melewati *HEPA filter*, udara buang tersebut dilepas ke lingkungan pada ketinggian cerobong 60 m. Dengan ketinggian tersebut akan terjadi pengenceran yang sangat besar terhadap konsentrasi radioaktivitas α dan β . Pengenceran tersebut akan menyebabkan konsentrasi radioaktivitas α dan β yang dilepas ke lingkungan menjadi lebih kecil, sehingga penerimaan radiasi ke lingkungan dan masyarakat tidak menimbulkan dampak radiologi.

KESIMPULAN

Konsentrasi udara buang IRM tertinggi selama tahun 2008 untuk radiasi- α terjadi pada bulan Agustus sebesar $2,43 \text{ Bq/m}^3$ dan rata rata $0,6 \text{ Bq/m}^3$, sedangkan

untuk radiasi- β terjadi pada bulan Mei sebesar $16,44 \text{ Bq/m}^3$ dan konsentrasi rerata radioaktivitas α di udara sebesar $(0,60 \pm 0,62) \text{ Bq/m}^3$ dan untuk konsentrasi rerata radioaktivitas β di udara sebesar $(2,27 \pm 3,63) \text{ Bq/m}^3$. Besaran konsentrasi radiasi α dan β udara buang IRM tertinggi pada tahun 2008 tersebut jika dibandingkan dengan batasan konsentrasi maksimum yang diijinkan untuk batasan pelepasan maksimum *stack* IRM^[2] masih jauh di bawah batas maksimum yang diijinkan, sehingga efluen gas/aerosol radioaktif yang dilepas dari cerobong IRM selama tahun 2008 tidak menimbulkan dampak radiologi dan aman bagi masyarakat serta lingkungan disekitar gedung IRM.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir nomor: 01/Ka.Bapeten/V-99, BAPETEN, Jakarta, tahun 1999.
2. BUDI PRAYITNO, Perhitungan Nilai Batas Pelepasan Maksimum (BPM) Untuk Radioaktif Alpha Dan Beta Dari Udara Buang Instalasi Radiometalurgi, Buletin Urania, Volume 12 nomor 1, tahun 2006.
3. ANONIM, Laporan Analisis Keselamatan Instalasi Radiometalurgi, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, No. Dok: KK20J09002, revisi 6, tahun 2006.
4. MARTIN A AND HARBINSON S.A., An Introduction to Radiation Protection, London, 1986.
5. ANONIM, Lembar Data Pemantauan Radioaktivitas Daerah Kerja IRM, Serpong, tahun 2008.