

TEKNIK PEMANTAUAN KONTAMINASI BAHAN RADIOAKTIF DI UDARA

Gatot Suharyono

Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir – BATAN

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

PENDAHULUAN

Pemantauan kontaminasi bahan radioaktif di udara sangat penting untuk melindungi kesehatan dan keselamatan pekerja dan masyarakat pada umumnya di sekitar instalasi nuklir. Hal ini karena kontaminasi udara adalah salah satu faktor utama sebagai penyebab pajanan terhadap individu melalui pernapasan dan pencernaan makanan, dan sebagai penyebab difusi kontaminasi terhadap lingkungan. Pemantauan dilakukan dengan melakukan pencuplikan sampel udara, pengukuran dan evaluasi hasil pengukuran dengan teknik yang disesuaikan dengan tipe kontaminan di udara. Kontaminasi radioaktif di udara dari segi proteksi radiasi, dapat dikelompokkan ke dalam tiga tipe yaitu :

- aerosol
- gas pada umumnya (seperti ^3H , $^{14}\text{CO}_2$) dan gas mulia (^{41}Ar , ^{85}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{222}Rn)
- gas volatil (seperti ^{131}I , ^{129}I , ^{125}I , ^{32}P , ^{35}S) dan uap air (seperti HTO, DTO, T_2O) [1]

Tujuan pemantauan dan evaluasi kontaminasi bahan radioaktif di udara adalah :

- Untuk mendeteksi secara cepat bila terjadi kehilangan/lepas kontrol dari bahan-bahan radioaktif atau alat-alat pengukur udara, termasuk kontrol konsentrasi radioaktif di udara dalam jangka panjang.
- Untuk membantu dalam mengidentifikasi individu terpajan yang melebihi baku mutu standar yang ditetapkan dan untuk memperkirakan tingkat pajanan, sehingga

tindakan proteksi yang tepat terhadap pekerja dapat disediakan sesuai kebutuhan.

- Untuk memperkirakan tingkat penerimaan dan dosis udara yang diterima individu yang terpajan.
- Untuk melengkapi dokumen radioaktivitas udara dalam rangka memenuhi berbagai persyaratan yang ditetapkan oleh instansi yang berwenang [1,2].

TEKNIK DAN METODE PENCUPLIKAN SAMPEL

Beberapa data yang diperlukan dalam pencuplikan antara lain adalah catatan kondisi operasi, kondisi pelepasan udara, sifat dasar bahan yang diukur, dan persyaratan pemantauan. Sifat pencuplikan dapat kontinyu, periodik, tertentu atau tergantung tujuan pencuplikan itu sendiri. Semakin sering dilakukan pencuplikan semakin baik, tentunya tergantung tenaga, waktu, kondisi alat dan biaya.

1. Pencuplikan Aerosol

Konsentrasi partikel aerosol total ditentukan menggunakan kertas filter yang secara komersial tersedia dengan berbagai karakteristik. Pemilihan filter tergantung metode yang digunakan untuk analisis dan persyaratan operasional. Filter tersedia dengan berbagai jangkauan karakteristik, seperti filter serat selulose, filter asbestos selulose, filter serat gelas, dan filter sintesis (filter membran dan filter

nukleopore). Efisiensi pencuplikan dan ketahanan aliran dari filter pencuplik udara ditampilkan pada Tabel 1. Teknik pengendapan (presipitasi) elektrostatik dan termal dapat juga digunakan untuk pencuplikan radioaktif udara, tetapi laju alirnya sangat rendah dan perawatannya sulit [3].

gas mulia dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat dingin, seperti menggunakan arang aktif yang dijaga konstan pada suhu dingin dengan nitrogen cair [4].

Tabel 1. Efisiensi pencuplikan dan ketahanan aliran dari filter pencuplik udara [4]

Jenis Filter	Nama dagang	Efisiensi pencuplikan (%) pada diameter DOP 0,3 µm				Ketahanan aliran (mmHg)				Negara Asal
		Laju alir (cm / detik)				Laju alir (cm / detik)				
		10,7	26,7	53,0	106	35	53	71	106	
Selulosa	Whatman 41	64	72	84	98	24	36	48	72	Inggris
	SS-589/1	46	56	66	80	18	27	37	56	Jerman
	TFA-41	62	74	86	98	23	40	48	81	USA
Asbes Selulosa	S-P Rose	99,18	99,28	99,52	99,75	38	57	75	112	Perancis
	HV-70	96,6	98,2	99,2	99,8	44	64	87	127	USA
Serat Gelas	MSA 1106 B	99,968	99,932	99,952	99,978	20	30	40	61	USA
	Gelman A	-	98,1	98,2	98,9	-	33	-	-	USA
	Gelman E	99,974	99,964	99,970	99,986	19	28	38	57	USA
	Schleicher & Schull No.6	lebih besar dari 99,9 untuk semua laju alir								Jerman
	Whatman GF/A	99,989	99,982	99,985	99,992	20	29	40	60	Inggris
	Reeve Angel 934 AH	-	99,0	99,4	99,7	-	37	-	-	Inggris
Membran	Millipore AA (φ pori 0,8 µm)	99,992	99,985	99,980	-	98	142	195	285	USA
	Gelman AM-1 (φ pori 5 µm)	88	88	92	95	56	84	117	190	USA
Nucleo- pore	Nucleopore ^a (φ pori 0,8 µm)	-	-	-	-	-	99	-	-	USA

^a tersedia dalam berbagai macam komposisi

2. Pencuplikan Gas Mulia

Jika konsentrasi aktifitas gas mulia cukup tinggi, pencuplikan cukup diabsorpsi melalui filter dari aliran udara yang berada di dalam kontainer kosong dengan volume tertentu. Seandainya konsentrasi tidak cukup tinggi, gas mulia dapat dicuplik dengan menggunakan kompresor yaitu teknik mengisi kontainer pencuplikan dengan gas mulia pada tekanan tinggi dan dengan jumlah besar ke dalam volume yang kecil, sehingga lebih sensitif. Setelah pencuplikan, kontainer diambil untuk dianalisis dan kandungan radioaktifnya diukur dengan alat cacah secara langsung. Jika perlu, pencuplikan

3. Pencuplikan Iodin

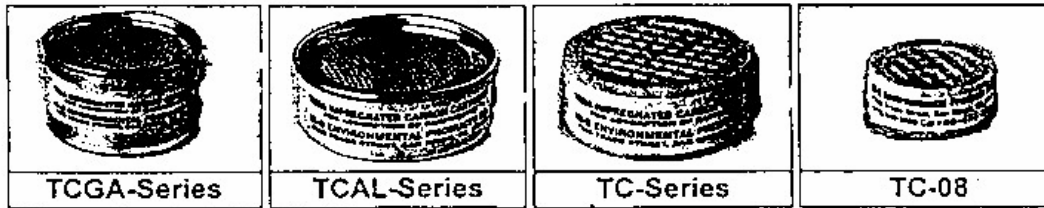
Isotop radioaktif iodin mungkin dihasilkan di fasilitas nuklir dengan bentuk kimia dan fisika yang berbeda, diantaranya dapat menembus filter aerosol. Pencuplikan dilakukan dengan menarik aliran sampel melalui filter aerosol yang mengandung bahan penyaring iodin seperti arang aktif, silver zeolit atau bahan yang lain. Peningkatan efisiensi pencuplikan iodin dalam bentuk fisika dan kimia yang berbeda dilakukan secara arang aktif diolah dengan bahan kimia, seperti kalium iodida (KI) atau triethylene diamine (TEDA). Efisiensi pencuplik dipengaruhi oleh parameter fisik, seperti suhu udara, uap air,

organik dan waktu. Efisiensi akan menurun, bila pencuplikan dilakukan dalam waktu lama (*aging*). Pemanasan aliran udara untuk menurunkan kandungan air di dalam arang aktif merupakan metode efektif untuk mengumpulkan iodida organik [5]. Wadah (*cartridge*) pencuplik arang aktif ditunjukkan pada Gambar 1. Bentuk dan pencuplik iodin ditampilkan pada Tabel 2.

Melewatkan udara yang mengandung uap tritium oksida melalui kondensasi atau pendinginan dengan es kering atau nitrogen cair.

b. Metode Pengering

Melewatkan udara melalui beberapa pengering yang sesuai, seperti silika gel atau



Gambar 1. Jenis wadah (*cartridge*) arang aktif [5]

Tabel 2. Bentuk dan pencuplik iodin yang digunakan [5]

Bentuk Iodin	Pencuplik iodin yang digunakan
Elemental (I ₂)	<ul style="list-style-type: none"> a. Kasa tembaga atau perak (harus dalam keadaan bersih) b. Arang aktif yang dilapisi kertas c. Pembersih dengan larutan AgNO₃, NaI, Na₂S₂O₃ d. Arang aktif e. Ayakan (<i>sieve</i>) / saringan molekuler
CH ₃ I	<ul style="list-style-type: none"> a. Pembersih dengan larutan AgNO₃ b. Arang yang sudah terlapisi bahan kimia c. Asam silikat dilapisi dengan AgNO₃ atau Ag d. Ayakan molekuler dilapisi dengan Ag
HOI	<ul style="list-style-type: none"> a. Aluminium atau asam silikat dilapisi dengan AgNO₃ b. Arang aktif c. Ag-X13 (silver zeolit) jika kelembabannya rendah d. Alumina dilapisi 4-iodophenol
LiI atau iodida yang lain	Iodin ini adalah berupa partikel dan dapat dicuplik dengan HEPA (<i>High Efficiency Particulate Air</i>)

4. Pencuplikan Tritium dan Tritium Oksida

Teknik pencuplikan tergantung pada bentuk tritium. Bentuk tritium lebih banyak ditemukan adalah uap air tritium (HTO, DTO, T₂O) dan gas tritium elemental (³H) [6,7].

Metode yang digunakan untuk mencuplik uap air tritium adalah sebagai berikut :

a. Metode Pembekuan

ayakan molekuler (alumino silikat) untuk menahan uap air tritium. Pengering mempunyai kapasitas yang tinggi terhadap kelembaban dan akan menahannya sampai jenuh, sehingga uap air terlepas (didesorpsi). Efisiensi pencuplikan lebih besar daripada 99 % di dalam pencuplik dengan kapasitas yang memadai dan ditentukan dengan

pencuplik yang sesuai di dalam rangkaian tersebut.

c. Metode Penggelembungan

Melewatkan udara melalui air yang tidak mengandung tritium atau pelarut lain (air suling atau etilen glikol). Melalui pertukaran isotop, tritium oksida dari aliran udara dilarutkan di dalam air. Metode penggelembungan adalah sederhana dan efektif, tetapi kerugiannya adalah uap air yang terkumpul mengandung ³H akan diencerkan 10 sampai 100 kali dengan air di dalam penggelembung (*bubbler*). Oleh karena itu batas deteksi dari pengukuran ini pada dasarnya rendah.

Gas tritium tidak dapat dicuplik semudah tritium oksida, tetapi harus diubah ke dalam bentuk tritium oksida terlebih dahulu dengan melewati aliran udara yang sudah dipanaskan diselimuti wol yang terbuat dari tembaga oksida atau ditambahkan katalis palladium (Pd) dengan suhu sekitar 300 °C di dalam ayakan molekuler. Tembaga oksida murah, tetapi perlu suhu tinggi sekitar 700 °C.

Pencuplikan campuran tritium dilakukan dengan menggabung beberapa metode pencuplik uap air tritium dan gas tritium di atas.

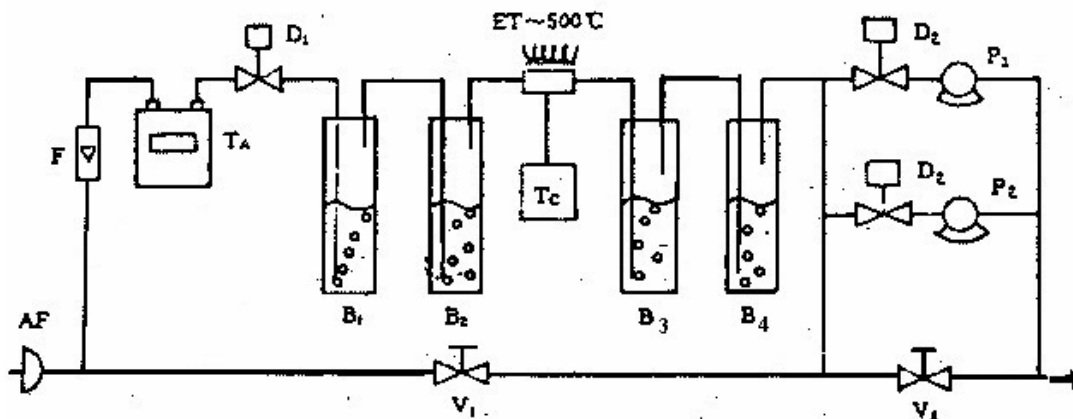
Pencuplikan dilakukan terhadap uap air tritium lebih dulu, kemudian mencuplik gas tritium sesudah mengubahnya menjadi uap air tritium (Gambar 2).

5. Pencuplikan Carbon-14

Carbon-14 berada di udara dalam bentuk senyawa seperti CO₂, CO dan CH₄ atau hidrokarbon lainnya. Pencuplikan ¹⁴C dapat dilakukan dengan mengambil sampel di dalam botol atau kontainer bertekanan. Dapat juga di dalam tas plastik dengan volume besar sekitar 800 liter. Pencuplikan ¹⁴C secara kontinyu lebih baik lebih dari seminggu atau sebulan. ¹⁴C dapat dicuplik dengan pelarut NaOH [4].

PENGUKURAN DAN EVALUASI SAMPEL KONTAMINAN DI UDARA

Jika suatu radionuklida tunggal yang sudah diketahui jenisnya berada di lingkungan kerja, maka sampel yang tercuplik dapat diukur dengan pendeteksi radiasi untuk mengetahui secara kuantitas perkiraan konsentrasi radionuklida di udara. Jika sampel yang tercuplik mengandung campuran radionuklida dengan perbandingan bermacam-macam, analisis harus dilakukan secara kualitas dan kuantitas. Radionuklida dapat



Gambar 2. Pencuplik tritium bentuk HTO dan HT dari cerobong [7]

Keterangan : AF = filter aerosol dari cerobong, F = laju alir, D_{1,2} = katup pengatur suhu dan tekanan, P_{1,2} = Pompa isap, B_{1,2} = bejana pencuplik gelembung HTO, B_{3,4} = bejana pencuplik gelembung HTO sesudah oksidasi HT, V_{1,2} = katup udara, ET = pemanas, T_{A,C} = pengatur katalis dan suhu.

diidentifikasi melalui waktu paro, jenis radiasi dan energi radiasi yang dipancarkan.

Sampel yang dicuplik dengan memakai kertas filter mudah dikerjakan, disimpan dan diukur. Sampel-sampel dalam bentuk gas dapat diukur dengan detektor secara langsung atau dicuplik ke dalam botol / wadah tertutup secara tidak langsung, kemudian diukur dengan detektor pengganda cahaya (PMT) yang ditutup perisai, jika pencuplikannya memerlukan analisis di laboratorium.

Permasalahan dalam pengukuran kontaminan udara radioaktif antara lain yaitu :

- a. Penyesuaian kondisi detektor terhadap persyaratan mekanik dari berbagai kondisi sampel, seperti diameter dan ukuran filter, tekanan udara yang berubah-ubah, dan seterusnya.
- b. Pengukuran radioaktivitas tingkat rendah bercampur dengan radioaktivitas alam, khususnya radon, thoron dan anak luruhnya.
- c. Pemisahan radioisotop yang diperlukan bercampur dengan radioisotop lain pada saat yang bersamaan [4].

1. Aerosol Udara

Banyak metode yang umum dari pengukuran aerosol udara secara kontinyu yaitu mencuplik sampel dengan melewati udara melalui kertas filter (baik statis atau dinamis) dan kemudian mengukur radioaktivitas dengan hanya menempelkan kertas filter di atas jendela detektor pencuplikan. Pemantauan kontinyu dengan filter yang statis adalah yang terbaik untuk pengukuran di ruangan dengan udara relatif bersih (*clean air*). Sebagai contoh, pencuplikan kontinyu selama 40 jam dengan laju alir 12 liter per menit di udara bersih, konsentrasi radioaktifnya rendah rata-rata $3,7 \times 10^{-5} \text{ Bq/m}^3$ [4].

Untuk menghindari penambahan radioaktivitas dan debu pada filter dalam waktu lama, digunakan peralatan yang memakai filter dinamis (dapat digerakkan). Filter tersebut cocok untuk lokasi yang konsentrasi radioaktifnya tinggi. Pengikat filter dapat dipindahkan sesuai dengan

rancangan yang dibuat dan bergerak terus menerus. Filter tersebut dapat digunakan untuk mengukur seketika itu juga dan dapat dilakukan penundaan. Penundaan dapat diatur sedemikian rupa sehingga radioaktivitas alam pada filter berkurang sampai dapat diabaikan. Pemilihan detektor untuk pengukuran tergantung jenis aktivitas yang diukur dan ukuran filter.

Permasalahan dalam pemantauan radioaktivitas tingkat rendah di udara dengan peralatan pengukuran yang dapat seketika dibaca yaitu :

- a. Keberadaan radionuklida alam di udara, seperti radon, thoron dan anak luruhnya
- b. Variasi konsentrasi radionuklida alam di udara bergantung pada cuaca, lamanya per hari, kondisi ventilasi, dan lain-lain [3, 8].

Radon dan thoron masing-masing berasal dari ^{226}Ra dan ^{224}Ra berada di tanah dan bahan-bahan bangunan. Radon dan thoron keduanya berupa gas, tetapi waktu paro anak luruhnya pendek dan berupa padat serta sisanya melayang di udara atau saling melekat dengan sesamanya membentuk partikel di udara. Anak luruhnya memancarkan radiasi α dan β . Waktu paro anak luruh radon sekitar 30 menit dan untuk anak luruh thoron sekitar 10 jam.

Keberadaan radioaktivitas alam menjadi banyak masalah, ketika pemantauan radionuklida pemancar alpa aktif dengan konsentrasi agak rendah, seperti partikel plutonium dan unsur-unsur transplutonium. Metode pemisahan terhadap radioaktivitas alam di dalam pemantauan aerosol tergantung pada perbedaan sifat antara aerosol alam dan buatan. Metode-metode pemisahan terhadap radioaktivitas alam tersebut adalah :

- a. Pemisahan melalui pencuplikan
Hasil peluruhan radon atau thoron ditemukan bercampur khusus dengan partikel udara yang berdiameter kecil, sedangkan diameter aerosol buatan manusia biasanya lebih besar, seperti debu metalurgi, abu terbang (*fly ash*) dan sebagainya. Alat impaktor kinetik satu

tingkat mempunyai efisiensi pencuplikan partikel aerosol jenis plutonium 70 % dan efisiensi pencuplikan hasil peluruhan radon dan thoron 10 %.

b. Pemisahan melalui perbedaan waktu paro radionuklida

1. Penundaan pengukuran

Pengukuran ditunda dilakukan sesudah pencuplikan dalam waktu cukup lama (beberapa jam atau hari), agar radioaktivitas alam meluruh semua.

2. Pengumpulan pengukuran

Dalam metode ini penimbunan pencuplikan menggunakan kertas filter statis, aktivitas alam secara total dijenuhkan atau dikumpulkan pada kertas filter sekitar 2 jam, tetapi aktivitas radionuklida ditingkatkan dengan memperpanjang waktu pencuplikan. Dengan demikian kontaminasi dari radioaktivitas dapat ditemukan di atas cacah latar yang stabil.

c. Pemisahan melalui perbedaan energi radiasi

Energi alpa dari anak luruh radon dan thoron semua lebih besar daripada 5,99 MeV, tetapi untuk ^{238}U , ^{239}Pu , ^{210}Po , ^{241}Am , dan sebagainya semua di bawah 5,5 MeV. Oleh karena itu hal ini dapat digunakan untuk memisahkan radioaktivitas alam dengan menggunakan spektrometri alpa (baik detektor semikonduktor atau kamar ionisasi).

d. Pemisahan dengan metode koinsidensi

Radioaktivitas alam diukur secara khusus dengan memperkirakan dua peluruhan dari RaC (β) dan RaC' (α) yang mengikuti induknya dengan waktu paro 160 μ detik (disebut *pseudo-coincidence*). Laju cacah *pseudo-coincidence* ini, kemudian dibandingkan terhadap faktor konstanta dan dikurangi laju cacah alpa total.

e. Pemisahan dengan perbandingan cacah α /cacah β

Perbandingan cacah α terhadap cacah β dari sampel aktivitas alam akan mendekati konstan, karena berasal dari rantai peluruhan yang sama dan rantai tersebut dalam kondisi setimbang. Cacahan α buatan di dalam sampel ($N_{\alpha a}$) dapat diperoleh dengan mengurangi cacahan α total di dalam sampel ($N_{\alpha t}$) dengan cacahan α alam di dalam sampel ($N_{\alpha n}$), dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$N_{\alpha a} = N_{\alpha t} - N_{\alpha n} = N_{\alpha t} - \frac{N_{\beta n}}{K_n} \quad (1)$$

Keterangan :

$N_{\beta n}$: cacahan beta alam di dalam sampel

K_n : perbandingan cacah α alam terhadap cacah β alam di dalam sampel dalam kondisi pencuplikan dan pengukuran (ini dapat ditentukan dengan penelitian)

Untuk metode *pseudo-coincidence*, persamaan penghitungan $N_{\alpha a}$ seperti persamaan (1), tetapi konstanta K_n sama dengan perbandingan cacah α alam terhadap cacah *pseudo-coincidence* β , α alam.

2. Gas Mulia

Sebagian besar radiasi beta digunakan untuk pengukuran kontinyu. Hal ini perlu untuk ^{85}Kr yang merupakan pemancar beta murni (hanya 0,7 % sinar gamma pada energi 520 KeV) dan tidak ada alasan tidak dapat dideteksi [4].

Terdapat tiga bentuk utama kamar (*chamber*) pengukuran yang umum digunakan yaitu : 1). Kamar berbentuk silinder dengan detektor sintilasi atau GM di sepanjang tengah-tengah sumbu. 2) Kamar berbentuk kubus dengan satu dinding untuk menempatkan detektor proporsional dengan luas permukaan yang lebar. 3) Kamar berbentuk empat persegi panjang datar dengan dimensi yang sama sebesar detektor dan ketebalannya sekitar 10 cm. Detektor

proporsional dengan luas permukaan lebar (sekitar 700 cm²) adalah detektor yang sangat sensitif untuk pemantauan gas radioaktif

Detektor GM sederhana dan murah, namun cukup sensitif. Detektor tersebut mempunyai kelemahan yakni batas deteksi energi beta lebih besar daripada 300 KeV, waktu mati (*dead time*) panjang dari batas deteksi GM pada konsentrasi maksimum yang dapat diukur, dan karakteristik berubah tergantung usia detektor GM.

Phosphor plastik dapat digunakan dengan jendela (*window*) tipis, sehingga cocok untuk mengukur partikel beta energi rendah. Responnya 100 kali lebih besar daripada respon dari detektor GM. Luas permukaan yang lebar dari phosphor diperlukan untuk memperoleh kepekaan (sensitifitas) yang tinggi dan ketebalannya yang tipis (~ 1 mm) perlu untuk meminimalkan cacah latar yang disebabkan radiasi gamma. Variasi cacah latar eksternal dapat diimbangi menggunakan sepasang detektor yang sebenarnya salah satunya dibuat tidak sensitif terhadap radiasi beta dengan cara melapisinya menggunakan pelindung (*shield*) plastik yang ketebalannya sekitar 1 g/cm².

3. Udara Yang Mengandung Tritium

Tritium yang terkandung di dalam udara mempunyai energi beta rendah ($E_{maks} = 18$ KeV) perlu mendapat perhatian, karena sebagian besar berbentuk uap air tritium sehingga perlu detektor yang sesuai untuk mengukurnya. Terdapat tiga jenis detektor yang sesuai untuk pemantauan udara secara kontinyu yaitu kamar ionisasi, detektor proporsional dan detektor sintilasi. Dalam kondisi normal kamar ionisasi modern dengan volume sekitar 10 liter dapat mendeteksi $\sim 3,7 \times 10^4$ Bq/m³, sedangkan detektor proporsional mampu mendeteksi lebih rendah dari $3,7 \times 10^2$ Bq/m³. Detektor sintilasi yang mempunyai daerah aktif permukaan beberapa ribu cm² mampu mengukur antara $3,7 \times 10^2$ Bq/m³ dan $3,7 \times 10^4$ Bq/m³. Seandainya waktu tundanya lama (sampai satu jam) dan perlakuan secara kimia seperti di laboratorium

dapat dikerjakan, maka uap air di udara dapat dikondensasikan secara kontinyu, sehingga air tritium yang dihasilkan dapat diukur. Metode ini sebagian besar menghilangkan campur tangan dari radionuklida lain dan radiasi cacah latar. Sampel air tritium dapat diukur dengan alat LSC (*Liquid Scintillation Counter*). Jika di udara ada campuran HT (gas tritium) dan HTO (tritium oksida), maka terlebih dahulu HT harus dirubah terlebih dulu menjadi HTO [7].

Di dalam metode pembekuan, konsentrasi uap air tritium di udara (C_u) dapat diperoleh dengan persamaan :

$$C_u = \frac{M \cdot Ca}{E_c \cdot V} \text{ (Bq/m}^3\text{)} \quad (2)$$

Keterangan :

M : berat air yang terkondensasi (g)

Ca : konsentrasi air yang dikondensasi (Bq/g)

E_c : efisiensi pencuplik dari kondensasi (%)

V : volume udara total melalui alat penggelembung (*bubbler*) (m³)

Di dalam metode pengering, konsentrasi tritium di udara (C_u) dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

$$C_u = \frac{M \cdot Ca}{E \cdot V \cdot d} \text{ (Bq/m}^3\text{)} \quad (3)$$

Keterangan :

E : efisiensi penangkapan dari pengering (%)

d : koefisien desorpsi yang ditentukan secara eksperimen dengan perbandingan tritium yang didesorpsi dari/ke absorber di dalam pengering (%)

Di dalam metode penggelembungan, konsentrasi tritium di udara (C_u) adalah

$$C_u = \frac{M_0 \cdot Ca}{E_b \cdot V} \text{ (Bq/m}^3\text{)} \quad (4)$$

Keterangan :

- M_0 : berat air di dalam penggelembung pada permulaan pencuplikan (g)
- E_b : koefisien jenuh dari HTO di udara di dalam penggelembung (%)

Pemantauan tritium total berdasarkan penggelembung oksidasi katalis untuk pemantauan cerobong asap di dalam fasilitas nuklir telah dikembangkan di Institut Proteksi Radiasi Cina. Komponen utamanya adalah pipa stainless steel dipanaskan di dalam pemanas listrik sekitar 550 °C, dimana terjadi oksidasi katalis yang merubah sampel udara menjadi karbondioksida dan uap air, pengering kalsium sulfat mengeluarkan semua uap air yang mengandung tritium. Batas deteksi dari tritium adalah 0,04 Bq/L selama pencuplikan seminggu pada laju alir 80 sampai 200 mL/menit dengan pencacahan langsung menggunakan LSC (Gambar 2.).

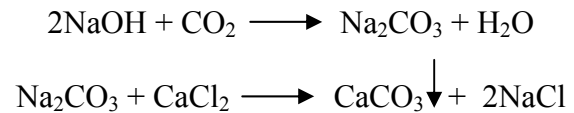
4. Iodin

Isotop iodin radioaktif ^{131}I dan ^{125}I merupakan radioisotop penting dalam kedokteran nuklir. Untuk mengukur ^{131}I digunakan detektor sintilasi atau semikonduktor yang lebih utama daripada detektor yang lain. Pengukuran radiasi di dalam pencuplik iodine hanya diukur radiasi gammanya, karena sinar beta hampir secara total diabsorpsi di dalam wadah pencuplik itu sendiri. Jika dicuplik dengan kertas arang aktif (*charcoal*), pengukuran radiasi beta dapat juga dilakukan [5].

5. Carbon-14

^{14}C adalah pemancar beta murni dengan energi maksimum 148 KeV, sehingga pengukuran dan pencuplikannya perlu metode khusus. Pengukuran ^{14}C umumnya menggunakan LSC. Teknik pengukurannya mempunyai

efisiensi deteksi yang baik dan secara normal melibatkan preparasi kimia yang minimum. Gas $^{14}\text{CO}_2$ dapat dicuplik di dalam pelarut yang sesuai dan dicacah di dalam LSC [4]. Untuk contoh, carbon-14 dapat dicuplik sebagai carbon dioksida di dalam larutan natrium hidroksida dengan persamaan reaksi sebagai berikut :



Senyawa yang mengendap berupa calcium carbonat (CaCO_3) di dalam hasil larutan tersebut. CaCO_3 ini dicampur dengan larutan sintilasi untuk dicacah dengan LSC. Konsentrasi aktivitas ^{14}C di udara dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$C = \frac{K_c \cdot R_n}{2,22 \cdot V \cdot \eta_{ch} \cdot \eta_2} \quad (5)$$

Keterangan :

- R_n : laju pulsa total (cacah / menit)
- C : konsentrasi aktivitas ^{14}C (jika satuan C adalah Ci/m³, maka $K_c = 10^{-12}$)
(jika satuan C dalam Bq/m³, maka $K_c = 3,7 \times 10^{-2}$)
- V : volume sampel udara (m³)
- η_2 : efisiensi detektor
- η_{ch} : kelimpahan di alam = E / A
- E : berat sampel CaCO_3 digunakan untuk pengukuran (g)
- A : berat CaCO_3 yang mengendap (g)

Batas deteksi (L) adalah :

$$L = \frac{3 K_c \cdot \sqrt{Ro / t_m}}{2,22 \cdot V \cdot \eta_2 \cdot \eta_{ch}} \quad (6)$$

Keterangan :

- Ro : laju cacah latar (cacah / menit)
- t_m : waktu pengukuran (menit)

1. Impaktor

Untuk pengukuran 100 menit, batas deteksinya $7,4 \times 10^{-2}$ Bq/m³. Rangkuman pencuplikan dan pengukuran kontaminasi udara diperlihatkan pada Tabel 3.

Impaktor bertingkat (*cascade impactor*) adalah kemungkinan peralatan yang lebih disukai untuk menentukan karakteristik ukuran diameter partikel di lingkungan kerja. Pencuplikan

Tabel 3. Rangkuman Pencuplikan dan pengukuran kontaminasi udara [4]

Jenis	Metode pencuplik	Metode Pengukuran
Aerosol	a. kertas filter (umum dipakai) b. elektrostatis c. pengendapan	a. detektor sintilasi b. detektor semikonduktor (in-situ atau di laboratorium)
Gas mulia	a. kontainer (kosong atau dengan tekanan) b. perangkap dingin (arang aktif pada suhu rendah)	a. kamar pengukuran dengan detektor (GM, sintilasi, proporsional) b. plastik phosphor
Uap air tritium	a. Pembekuan dan pengembunan dengan perangkap dingin b. Pengeringan c. Penggelembungan	a. kamar ionisasi b. detektor proporsional c. detektor sintilasi d. <i>Liquid Scintillasi Counter (LSC)</i>
Gas tritium	Dirubah ke dalam bentuk tritium oksida dengan katalis pemanasan terlebih dahulu, kemudian dicuplik sebagai oksida	a. kamar ionisasi b. detektor proporsional c. detektor sintilasi d. <i>Liquid Scintillasi Counter (LSC)</i>
Iodine	a. kertas arang b. arang (<i>charcoal</i>) aktif c. ayakan molekuler d. arang yang sudah diisi bahan kimia	Detektor sintilasi (NaI) dan semikonduktor
Carbon-14	a. kontainer, seperti untuk gas mulia b. dicuplik di dalam pelarut yang sesuai (seperti NaOH)	a. LSC b. Kamar ionisasi atau detektor proporsional

ANALISIS UKURAN DIAMETER PARTIKEL

Data diperoleh dari pencuplikan aerosol total mungkin tidak memadai untuk perkiraan bahaya inhalasi terhadap pekerja. Hal ini perlu untuk mengetahui distribusi ukuran diameter partikel, agar dapat diperkirakan deposisi, retensi atau bentuk translokasi pada saluran pernapasan di paru-paru. Analisis ukuran diameter partikel juga melengkapi informasi pada transport partikel dan deposisinya di lingkungan. Analisis diameter partikel dapat dilakukan dengan menggunakan teknik impaktor, mikroskop, autoradiografi dan autoscintigrafi [3, 4].

berdasarkan sifat-sifat kelambanan (*inertia*) relatif dari partikel di dalam perubahan aliran udara dengan arah aliran tegak lurus dan sejajar terhadap permukaan tumbukan. Partikel yang cukup lamban, karena ukuran dan densitasnya, tidak akan mengikuti arah aliran udara, tetapi akan bertumbukan dan tertahan di permukaan pencuplik (filter). Dengan pilihan yang sesuai dari pemisahan jarak antara pancaran partikel (*jet*) dan permukaan tumbukan, dari lebar *jet* dan dari laju alir, memungkinkan untuk mencuplik ukuran diameter partikel dengan parameter fisik yang sesuai. Impaktor biasanya disusun bertingkat dengan mencuplik ukuran diameter partikel mulai terbesar sampai pada tingkat

terkecil. Tingkat terkecil terdapat pada tingkat terakhir atau paling bawah. Makin ke bawah lebar *jet* makin kecil diameter lubangnya, oleh karena itu diharapkan laju alirnya tinggi, sehingga dapat mencuplik partikel yang berukuran lebih kecil. Tingkat terakhir dari impaktor diletakkan filter untuk mencuplik partikel yang melewati semua tingkatan impaktor.

Kalibrasi impaktor biasanya dilakukan menggunakan aerosol *monodisperse* (penyebaran tunggal) berbentuk bola dan densitasnya diketahui. Data kalibrasi dari pabrik pembuat impaktor umumnya dapat disertakan.

2. Mikroskop

Mikroskop optik atau elektron dapat juga digunakan untuk pengukuran diameter partikel. Teknik ini berguna di dalam penelitian, tetapi tidak umum digunakan di dalam proteksi radiasi. Teknik ini lebih banyak menghabiskan waktu untuk analisisnya dan hasilnya tidak terkait dengan parameter fisik dari ukuran diameter partikel.

3. Autoradiografi dan Autosintigrafi

Kedua teknik ini berguna untuk analisis pengukuran diameter partikel pemancar alfa dan beta. Di dalam metode ini sampel dapat terkena cahaya terhadap film emulsi nuklir atau dijaga kontak dengan sintilator (seperti lapisan ZnS untuk detektor alfa). Di dalam putaran diatur kontak dengan film fotografik yang peka terhadap cahaya selama periode waktu yang sudah ditentukan. Banyaknya jejak (*track*) adalah merupakan ukuran dari aktivitas partikel. Metode ini hanya menentukan distribusi ukuran diameter partikel dengan sampel filter sesudah terjadi kecelakaan (*accident*) atau secara kebetulan.

PENUTUP

Pemantauan dan evaluasi kontaminasi udara sangat penting untuk melindungi kesehatan

dan keselamatan pekerja dan masyarakat pada umumnya di sekitar instalasi nuklir. Pemantauan dan evaluasi kontaminasi udara sebaiknya dilakukan secara periodik atau terus menerus, agar dapat diketahui fluktuasi konsentrasi udara di tempat kerja dan di lingkungan sekitar fasilitas nuklir dibandingkan baku mutu yang ditetapkan pemerintah, serta dapat segera diambil tindakan pencegahan dan penanggulangannya secara dini demi keselamatan dan keamanan pekerja dan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiological Surveillance of Airborne Contaminants in the working Environment, Safety Series No. 49, 1979.
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Objectives and Design of Environmental Monitoring Programmes for Radioactive Contaminants, Safety Series No. 41, 1975.
3. XIA YIHUA, Equipment and Technique for Aerosol Sampling and the Activity Determination by Decay, *Health Protection No. 2*, 1963.
4. XIA YIHUA, Monitoring and Evaluation Techniques for Airborne Contamination, Proceedings of the IAEA/RCA Training workshop on contamination monitoring, Tokai, Japan, JAERI-Conf 97-008, 1997
5. XIA YIHUA, Study of Collection Efficiency of Charcoal paper for Mixed ¹³¹I in off-gas, Atomic Energy Science and Technology, No. 3, 1978.
6. POPPY INTAN TJAHAJA DAN PUTU SUKMABUANA, Tritium, Radionuklida yang perlu mendapat perhatian, *Buletin Alara 2 (1)*, 19-25, 1998.
7. YANG HUAIYUAN, Environmental Tritium Measurement Techniques, Regional Training Course for Asia and the Pacific Region on Environmental Monitoring and Assessment of Nuclear Facility, Beijing, RRC, 1991.
8. XIA YIHUA, Measurement of α -radioactivity in environmental Samples, Regional Training Course for Asia and the Pacific Region on Environmental Monitoring and Assessment of Nuclear Facility, Beijing, RRC, 1991.