

PENGUKURAN RADIASI DAN PENGOLAHAN DATA DI INSTALASI NUKLIR

BUDI PRAYITNO

*Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15310
Banten Telp (021) 7560915*

Abstrak

PENGUKURAN RADIASI DAN PENGOLAHAN DATA DI INSTALASI NUKLIR. Pengukuran Radiasi dan Pengolahan Data di Instalasi Nuklir telah dilakukan. Beroperasinya instalasi nuklir perlu dilakukan pengukuran radiasi nuklir dengan tujuan agar pekerja radiasi, masyarakat dan lingkungan terhindar dari bahaya radiasi. Pengukuran dilakukan meliputi pengukuran paparan radiasi, kontaminasi udara, kontaminasi permukaan, udara buang dan pengolahan data. Pengukuran radiasi tersebut diuraikan secara rinci berikut pengolahan data pengukuran. Pengolahan data pengukuran radiasi menggunakan perambatan ralat dan deviasi standar dari nilai rerata. Dengan penjelasan secara rinci ini diharapkan memudahkan bagi operator yang bertugas dalam pelaksanaan pengukuran radiasi di instalasi nuklir.

Kata kunci : paparan radiasi, pengolahan data, pengukuran radiasi.

Abstract

RADIATION MEASUREMENT AND DATA PROCESSING IN NUCLEAR INSTALLATION. Radiation Measurement of Data Processing in Nuclear Installation has been done. Operating of nuclear installation require to be done by nuclear radiation measurement in order to protect radiation worker, public and environmental from radiation hazard. Measurement done to cover the measurement of radiation exposure, measurement of air contamination, measurement of surface area contamination, measurement of air release and data processing. The radiation measurement method elaborated in detail include data processing of measurement. Data processing of radiation measurement use the error data analysis and average standard deviation. This detailed clarification is expected to facilitate for operator in operation of radiation measurement in nuclear installation.

Keywords : radiation exposure, data processing, radiation measurement

PENDAHULUAN

Berdasarkan undang-undang Republik Indonesia nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Pasal 16 ayat 1 berbunyi : Setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup^[1]. Penjelasan lebih lanjut dari pasal ini ditetapkan dengan Peraturan Pemerintah dan Peraturan Kepala Badan

Pengawas Tenaga Nuklir. Salah satu hal yang perlu diperhatikan dalam pemanfaatan tenaga nuklir yaitu keselamatan pekerja dan lingkungannya dari bahaya radiologi. Bahaya radiologi dapat dicegah sedini mungkin dengan cara selalu memonitor zat radioaktif yang dipergunakan. Kegiatan yang dilakukan di Instalasi Nuklir seperti : Pabrik Elemen Bakar Nuklir, Produksi Radioisotop, Reaktor Nuklir, Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif dan Penambangan Uranium, perlu selalu dipantau udaranya dari bahaya terkontaminasi zat radioaktif, bahaya paparan radiasi, pemantauan

kontaminasi permukaan, pemantauan udara buang dan pemantauan limbah radioaktif. Kontaminasi udara di Instalasi Nuklir umumnya disebabkan oleh radioaktif α dan berpotensi terkena bahaya radiasi interna. Dalam tulisan ini dibahas bagaimana cara melakukan pengukuran paparan radiasi γ , pengukuran radioaktivitas di udara, pengukuran kontaminasi permukaan, pengukuran udara buang dan pengolahan data hasil pengukuran tersebut.

Pengukuran radioaktif yang terdapat di udara dilakukan dengan menggunakan *air sampler* dan dilengkapi kertas filter. Selanjutnya kertas filter yang dipergunakan untuk menangkap partikulat di udara dicacah radioaktivitasnya dengan mempergunakan detektor radiasi. Untuk keperluan pencacahan radiasi α digunakan detektor α . Data hasil cacahan diolah dan dihitung besar radioaktivitasnya dan ralatnya. Batasan udara yang terkontaminasi radioaktif dipakai untuk kadar U_{235} dan U_{238} dalam harian sebesar 20 Bq/m³[2]. Pemakaian batasan kontaminasi radioaktivitas α ini dengan pertimbangan Instalasi Nuklir tersebut menggunakan bahan baku U_{235} dan U_{238} . Apabila untuk keperluan yang lebih spesifik misalnya radiokontaminannya diketahui dipakai batasan radionuklidanya. Ketentuan ini mengacu kepada Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, PERKA BAPETEN nomor : 01/Ka-BAPETEN/V-1999.

Pengukuran paparan radiasi γ dengan menggunakan detektor γ . Sumber radiasi dipantau secara langsung dengan menggunakan detektor γ . Hasil bacaan dikalikan faktor kalibrasi alat dan dirata-rata. Kemudian dihitung deviasi standar dari nilai reratanya. Batasan paparan radiasi yang diizinkan, tanpa adanya pembatasan jam bekerja yaitu 25 μ Sv/jam^[2].

Pengukuran kontaminasi dipermukaan dilakukan dengan cara pengusapan permukaan yang terkontaminasi seluas 100 cm² menggunakan kertas filter. Kemudian kertas filter tersebut dicacah radiasinya dengan detektor radiasi sesuai dengan keperluannya (detektor α , detektor β). Dari hasil cacahan dihitung besarnya kontaminasi permukaannya dalam satuan Bq/m³ berikut ralat pengukurannya. Batasan kontaminasi permukaan yang dipakai ialah^[2] :

1. Daerah kontaminasi rendah, lebih kecil dari 0,37 Bq/cm² untuk pemancar α (untuk β lebih kecil dari 3,7 Bq/cm²).
2. Daerah kontaminasi sedang, untuk pemancar $\alpha \geq 0,37$ Bq/cm² tetapi $< 3,7$ Bq/cm², untuk pemancar $\beta > 3,7$ Bq/cm² tetapi < 37 Bq/cm²
3. Daerah kontaminasi tinggi, batasan untuk $\alpha \geq 3,7$ Bq/cm² dan untuk $\beta > 37$ Bq/cm².

Pengukuran udara buang biasanya dilakukan dengan menggunakan instrumen $\alpha \beta$ aerosol yang bekerja secara otomatis dan terus menerus. Batasan udara yang dibuang untuk radioaktif α dan β disesuaikan dengan tinggi cerobong buang, katagori udara, kecepatan angin dan baku mutu zat radioaktif dipermukaan. Penjabarannya dilakukan dengan menggunakan Persamaan *Pasquill*.

METODE

Pengukuran Paparan Radiasi

Pengukuran paparan radiasi γ di Instalasi Nuklir dilakukan secara langsung menggunakan detektor paparan radiasi. Pengukuran dapat dilakukan pada permukaan sumber radiasi atau jarak tertentu dari sumber radiasi sesuai dengan keperluannya. Banyak jenis dan tipe detektor untuk mengukur paparan radiasi. Namun yang perlu diperhatikan adalah masa kalibrasi dari detektor tersebut. Kemampuan dari alat ukur paparan radiasi ini biasanya disesuaikan besarnya paparan radiasi yang akan diukur. Biasanya dalam bacaan alat ukur tersebut terdapat untuk beberapa skala pengukuran, misalnya untuk skala pengukuran orde η Sv/jam, μ Sv/jam dan mSv/jam. Untuk skala bacaan yang dipergunakan harus terkalibrasi. Sebagai contoh untuk alat ukur paparan radiasi yang terkalibrasi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Faktor Koreksi Alat Ukur Paparan Radiasi Dalam Beberapa Skala Bacaan

Merek Alat	Skala Bacaan	Faktor Kalibrasi
GRAETZ tipe X5DE	0 – 999 η Sv/jam	-
	1 – 999 μ Sv/jam	1,03
	1 – 19,9 mSv/jam	-
EBERLINE tipe Ro-20	0 - 500 η Sv/jam	1,05
	0 - 500 μ Sv/jam	1,01
	0 - 50 mSv/jam	1,04

Sumber : Alat ukur paparan radiasi milik Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

Tabel 2. Faktor Koreksi Alat Ukur Paparan Radiasi Dalam Beberapa Skala Bacaan.

Merek Alat	Skala Bacaan	Faktor Kalibrasi
GRAETZ tipe X5DE	0 – 999 nSv/jam	-
	1 – 999 µSv/jam	1,03
	1 – 19,9 mSv/jam	-
EBERLINE tipe Ro-20	0 - 500 nSv/jam	1,05
	0 - 500 µSv/jam	1,01
	0 - 50 mSv/jam	1,04

Sumber : Alat ukur paparan radiasi milik Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir.

Langkah-langkah pengukuran.

1. Alat ukur yang akan dipergunakan dipersiapkan, meliputi sumber tegangan, faktor kalibrasi.
2. Disiapkan lembar pengambilan paparan radiasi meliputi tanggal, bulan, tahun, hari dan lokasi pengukuran paparan radiasi.
3. Dihidupkan sumber tegangan, diukur besarnya paparan radiasi yang dikehendaki dan faktor kalibrasi, jarak pengukuran dari sumber radiasi dicatat dilembar pengambilan.
4. Diulangi pengukuran tersebut minimal sebanyak 3 kali dan dicatat dalam lembar pengambilan.
5. Setelah selesai, dimatikan sumber tegangan alat tersebut.

Pengukuran Radioaktif Di Udara

Pengukuran radioaktivitas yang terdapat di udara dilakukan berdasarkan keperluannya. Di Instalasi Nuklir umumnya pengukuran awal dilakukan secara gross α , dengan pertimbangan radiasi α ini penyebab bahaya radiasi interna. Hasil pengambilan cuplikan partikulat yang tertangkap oleh kertas filter di udara, dapat langsung dilakukan pencacahan atau dengan penundaan tergantung keperluannya. Dengan pencacahan langsung akan lebih baik, karena radioaktivitas berumur pendek yang tertangkap oleh kertas filter belum sempat meluruh dan dapat dicacah. Kerugiannya hasil cacahan akan relatif lebih besar, sementara umumnya radioaktivitas yang berumur pendek ini relatif tidak berdampak kepada bahaya radiasi interna. Untuk mengatasi keadaan tersebut, akan lebih sempurna jika pencacahan dilakukan segera dan diulangi setelah 3,5 jam kemudian. Hal ini mengingat laju pertumbuhan Radon-222 yang berasal dari Radium-226 setimbang setelah 3,5 jam partikulat ditangkap dengan kertas filter^[3].

Langkah-langkah Persiapan.

1. Disiapkan lembar pengambilan cuplikan partikulat di udara meliputi tanggal, bulan, tahun, hari pengambilan cuplikan udara dan titik pengambilan cuplikan.
2. Dilakukan pemeriksaan dan disiapkan alat cacah yang akan dipergunakan meliputi masa kalibrasi, sumber listrik, kestabilan alat dan tegangan kerja detektor berdasarkan ketentuan 2/3 dari *curve plateu*.
3. Dicapah kertas filter yang akan dipergunakan selama 5 menit dengan bantuan detektor α yang tersedia untuk mengetahui cacah latar.
4. Dilakukan pemeriksaan terhadap alat *air sampler* meliputi *flow meter* alat dan kertas filter yang akan dipergunakan.

Pengambilan Cuplikan

1. Dipasang kertas filter yang telah diketahui cacah latarnya pada alat *air sampler* dan diletakkan di titik lokasi pengambilan setinggi ± 150 cm dari lantai.
2. Diperiksa sumber tegangan listrik dan dihidupkan sumber tegangan listrik.
3. Dicatat jam pada saat alat *air sampler* dihidupkan dan operasikan selama 15 menit.
4. Dicatat pengukuran skala *flow meter* pada saat 1 menit, 5 menit, 10 menit, dan menjelang 15 menit.
5. Dimatikan sumber tegangan listrik pada saat akhir pengambilan cuplikan (15 menit)
6. Dikeluarkan dan diambil kertas filter dari alat *air sampler*.
7. Dimasukkan kertas filter kedalam cawan patri yang sudah disediakan.
8. Dibawa kertas filter tersebut ke alat pencacahan untuk diproses lebih lanjut.

Pencacahan dan Pengukuran Radioaktivitas α Cuplikan Udara

1. Dicapah kertas filter tersebut dengan alat cacah yang tersedia (tanpa penundaan) selama 5 menit, minimal sebanyak tiga kali pencacahan.
2. Hasil cacahan tersebut dirata-rata dan dikurangi dengan cacah latar.
3. Dihitung besarnya radioaktivitas α di udara dengan menggunakan persamaan^[4] :

$$A_k = N \times \frac{1}{V} \times \frac{1}{E} \quad (1)$$

Dengan :

- A_k = aktivitas kontaminasi radioaktif alpha, Bq/m³
- N = cacah netto cuplikan, Cps
- V = volume udara yang dihisap, m³
- E = efisiensi alat cacah, %

$$A_k = \overline{A_k} \pm S_{A_k} \quad (2)$$

$$\overline{A_k} = \overline{N} \times \frac{1}{V} \times \frac{1}{E} \quad (3)$$

Adapun penurunan ralat perambatan sebagai berikut ^[5,6] :

$$S_{A_k} = \sqrt{\left(\frac{\partial A_k}{\partial N}\right)^2 (S_n)^2 + \left(\frac{\partial A_k}{\partial V}\right)^2 (S_v)^2 + \left(\frac{\partial A_k}{\partial E}\right)^2 (S_e)^2} \quad (4)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{V} \times \frac{1}{E}\right)^2 (S_n)^2 + \left(-N \times \frac{1}{V^2} \times \frac{1}{E}\right)^2 (S_v)^2 + \left(-N \times \frac{1}{V} \times \frac{1}{E^2}\right)^2 (S_e)^2} \quad (5)$$

Catatan : N, V, E pada Persamaan (5) adalah harga rerata.

dengan :

- S_n = ralat statistik dari pencacahan, dalam satuan cacah/detik.
- S_v = deviasi standar dari volume udara yang dihisap, dalam satuan m³
- S_e = deviasi standar dari efisiensi detektor, dalam satuan %.
- S_{ak} = ralat radioaktivitas α di udara, dalam satuan Bq/m³.

Pengukuran Kontaminasi Permukaan.

Untuk mengukur besarnya kontaminasi permukaan tersebut dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan cara pengukuran langsung atau dengan cara pengukuran tidak langsung. Pengukuran secara langsung sangat praktis karena hasil kontaminasi langsung diketahui. Namun demikian adakalanya tidak dapat dilakukan pengukuran secara langsung. Hal ini disebabkan Instalasi Nuklir tersebut tidak memiliki detektor yang dapat mengukur secara langsung, atau dapat juga disebabkan benda/lantai yang terkontaminasi tersebut tidak memungkinkan untuk diukur kontaminasinya secara langsung. Pengukuran kontaminasi lantai secara tidak langsung atau biasa disebut juga dengan *smear test* sering dilakukan di Instalasi Nuklir dengan alasan hasil dari tes usap tersebut selain dapat diketahui besarnya kontaminasi permukaannya juga dapat diketahui jenis radionuklida kontaminan dengan bantuan *Multy Channel Analyzer* (analisis kualitatif). Kelemahan dalam pelaksanaan tes usap diantaranya hasil dari pengukurannya tidak begitu akurat karena fraksi yang terangkat dalam tes usap sangat dipengaruhi banyak faktor. Faktor yang paling dominan adalah cara

petugas yang melaksanakan tes usap, jenis kontaminan dan jenis kertas usap yang dipakai. Disamping itu pengambilan tes usap sifatnya tidak bisa diulang (*Reproductible*). Berdasarkan literatur^[4] untuk jenis lantai licin nilai fraksi/prosentasi kontaminan yang terangkat besarnya sekitar 10 %. Faktor-faktor yang mempengaruhi harga prosentasi kontaminan yang terangkat ini diantaranya cara pengambilan, jenis kontaminan padat/cair, jenis kertas usap, diameter kontaminan dan faktor kelembaban ruangan tersebut.

Pengukuran tak langsung kontaminasi zat radioaktif dipermukaan dihitung dengan menggunakan Persamaan (6)^[4] :

$$A_k = N \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{E} \times \frac{1}{P} \quad (6)$$

dengan :

- A_k = ktivitas kontaminasi radioaktif α, Bq/Cm²
- N = cacah netto cuplikan, Cps
- A = luas permukaan yang di usap, 100 Cm²
- E = efisiensi alat cacah, %
- P = fraksi yang diambil dalam tes usap (10%)

Perhitungan nilai fraksi yang terambil (P) dalam pelaksanaan tes usap, diambil besarnya 10 %. Nilai inilah yang selalu menjadi bahan diskusi apakah nilai sebesar 10 % ini cukup meyakinkan. Mengingat bahaya radiasi interna lebih disebabkan oleh radiasi α , maka detektor yang dipakai adalah detektor α .

Langkah-langkah Persiapan

1. Disiapkan lembar pengambilan cuplikan partikulat di udara meliputi tanggal, bulan, tahun, hari pengambilan cuplikan udara dan titik pengambilan cuplikan.
2. Dilakukan pemeriksaan dan disiapkan alat cacah yang akan dipergunakan meliputi masa kalibrasi, sumber listrik, kestabilan alat dan tegangan kerja detektor berdasarkan ketentuan 2/3 dari *curve plateu*.
3. Dicapah kertas filter yang akan dipergunakan selama 5 menit dengan bantuan detektor α yang tersedia untuk mengetahui cacah latar.

Pengambilan Cuplikan

1. Ditentukan titik-titik lokasi pengambilan kontaminasi seluas 100 cm²
2. Kertas filter test usap yang telah diketahui cacah latarnya diusapkan searah jarum jam

$$s_{Ak} = \sqrt{\left(\frac{\partial Ak}{\partial N}\right)^2 (S_n)^2 + \left(\frac{\partial Ak}{\partial A}\right)^2 (S_a)^2 + \left(\frac{\partial Ak}{\partial E}\right)^2 (S_e)^2 + \left(\frac{\partial Ak}{\partial P}\right)^2 (S_p)^2} \quad (8)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{1}{A \times E \times P}\right)^2 (S_n)^2 + \left(-N \times \frac{1}{A^2} \times \frac{1}{E} \times \frac{1}{P}\right)^2 (S_a)^2 + \left(-N \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{E^2} \times \frac{1}{P}\right)^2 (S_e)^2 + \left(-N \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{E} \times \frac{1}{P^2}\right)^2 (S_p)^2} \quad (9)$$

Catatan : A, E, P dan N pada Persamaan (9) adalah harga rerata.

Pengukuran Udara Buang

Pengukuran udara buang yang melalui cerobong buang Instalasi Nuklir dilakukan dengan menggunakan *air sampler* yang bekerja secara terus menerus dan dihubungkan langsung dengan alat cacah radiasi. Hasil pantauan langsung terbaca di alat monitor ini. Alat monitor udara buang ini dapat berupa $\alpha\beta$ *aerosol*, $\alpha\gamma$ *aerosol* atau tergantung keperluan di Instalasi Nuklir tersebut. Data ukur yang terbaca di instrumen tersebut dalam satuan aktivitas radiasi persatuan volume (misal : Curie/m³, Bq/m³). Pada alat monitor udara buang ini dilengkapi batasan peringatan dini

pada titik pengusapan yang telah ditentukan seluas 100 cm² sebanyak satu kali usapan.

3. Kertas filter hasil usapan dimasukkan ke dalam kantong plastik/cawan patri yang telah disediakan (satu kantong plastik/cawan patri untuk satu cuplikan).
4. Kertas filter tersebut dibawa ke alat pencacahan untuk diproses lebih lanjut.

Pencacahan dan Perhitungan Hasil Tes Usap

1. Kertas filter test usap tersebut dicacah dengan alat cacah yang telah disediakan selama 5 menit, minimal sebanyak tiga kali pencacahan.
2. Hasil cacahan tersebut dirata-rata dan dikurangi dengan cacah latar.
3. Dihitung besarnya aktivitas kontaminasi radioaktif α dipermukaan dengan menggunakan Persamaan (9)
4. Hasil akhir pengukuran dituliskan dalam bentuk : $A_k = \overline{A_k} \pm S_{Ak}$

dengan :

$$\overline{A_k} = \overline{N} \times \frac{1}{A} \times \frac{1}{E} \times \frac{1}{P} \quad (7)$$

Adapun penurunan ralat perambatan sebagai berikut^[5,6] :

(*pre alarm*) dan batasan peringatan utama (*main alarm*). Pengaturan (*setting*) batasan *pre alarm* dan *main alarm* disesuaikan dengan keperluan Instalasi Nuklir, namun pada dasarnya harus mengacu kepada aturan Keputusan Direktur Jenderal Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN), Nomor: 293/DJ/VII/1995, tentang Baku Tingkat Radioaktivitas Di Lingkungan^[7]. Misal untuk Instalasi Nuklir yang bahan baku utamanya adalah Uranium-238 dan Uranium-235 baku mutu yang dipakai adalah sebesar 0,2 Bq/m³. Dari nilai baku mutu sebesar 0,2 Bq/m³ ini diturunkan besarnya radioaktif yang diizinkan atau Batas Pelepasan Maksimum (BPM) yang

dapat dibuang melalui cerobong buang Instalasi Nuklir. Untuk penentuan BPM digunakan model distribusi pencemaran udara dengan Persamaan *Gauss* yang dikenal dengan Persamaan *Pasquill*, disesuaikan dengan tinggi cerobong buang, katagori udara, kecepatan angin dan baku mutu zat radioaktif dipermukaan^[8].

Dalam makalah ini tidak dibahas bagaimana cara menentukan BPM, hal ini mengingat perlu pembahasan secara khusus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Contoh hasil pengukuran dan pengolahan data hasil pengukuran radiasi adalah sebagai berikut :

Pengolahan Data Ukur Paparan Radiasi

Untuk keakuratan data hasil pengukuran paparan radiasi γ harus diolah dengan cara mencari reratanya dan ralat pengukurannya. Hasil pengukuran dicatat di lembar pengukuran pada Tabel 2. Contoh pengolahan data dan hasil pengukuran paparan radiasi ditabelkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Contoh Hasil Pengukuran Paparan Radiasi.

Tanggal	Lokasi	Jarak ukur	Paparan Terukur ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	Faktor Koreksi	Paparan Sebenarnya ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)
10-9-07	Ruang limbah	Permukaan sumber radiasi	2,5	1,03	2,575
			2,3		2,369
			2,6		2,678
			2,5		2,575
			2,7		2,781

Tabel 3. Contoh Pengolahan Data Hasil Pengukuran Paparan Radiasi.

Paparan Sebenarnya ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)	Deviasi Standar ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$)
2,575	0,0206
2,369	0,2266
2,678	-0,0824
2,575	0,0206
2,781	-0,1854
$\Sigma = 12,978$	$ \Sigma = 0,5356$
Rerata = 2,5956	Rerata ralat = 0,10712

$$\begin{aligned} \text{Ketelitian pengukuran} &= \\ &= 100\% - (0,11/2,60 \times 100\%) \\ &= 100\% - 4,23\% \\ &= 95,77\% \end{aligned}$$

dengan :

$$\begin{aligned} P &= \text{Paparan radiasi} \\ P_{\text{rerata}} &= \text{Paparan radiasi rerata} \\ Sp &= \text{Standar deviasi rerata} \end{aligned}$$

Pengolahan Data Pengukuran Radioaktivitas di Udara

Data hasil pengukuran radioaktivitas di udara diolah dengan cara mencari dari ralat statistik, dari pencacahan, deviasi standar dari volume udara yang dihisap dan deviasi standar dari efisiensi detektor. Contoh hasil pengukuran radioaktivitas di udara berikut ralat deviasi standar di tabelkan pada Tabel 4.

Hasil akhir pengukuran dapat dituliskan :

$$P = (\text{Prerata} \pm Sp) \mu\text{Sv}/\text{jam} \quad (10)$$

$$P = (2,60 \pm 0,11) \mu\text{Sv}/\text{jam}$$

Tabel 4. Contoh Hasil Pengukuran Radioaktivitas A di Udara Berikut Ralat Deviasi Standar.

Lokasi	Cacah netto (cps)	Ralat cacah (cps)	Ef.d (%)	Ralat Ef.d (%)	Volume (m3)	Ralat Vol. (m3)
R.140	0.132	-0,0044	23,45	0,014	0.378	0,0018
	0.143	0,0066	23,32	-0,116	0.375	-0,0012
	0.151	0,0146	23,58	0,144	0.378	0,0018
	0.128	-0,0084	23,37	-0,066	0.378	0,0018
	0.128	-0,0084	23,46	0,024	0.372	-0,0042
	$\Sigma = 0,682$	$ \Sigma = 0,0424$	$\Sigma = 117,18$	$ \Sigma = 0,364$	$\Sigma = 1,881$	$ \Sigma = 0,0108$
$\bar{N} = 0,1364$	$S_n = 0,00848$	$\bar{E} = 23,436$	$S_e = 0,0728$	$\bar{V} = 0,3762$	$S_v = 0,00216$	

Dari data pada Tabel 4, dapat dihitung besarnya $A_k = \bar{A}_k \pm S_{A_k}$ dengan menggunakan Persamaan (3) dan (5). Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$A_k = (1,547 \pm 0,490) \text{ Bq/m}^3 \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Ketelitian pengukuran} &= \\ &= 100 \% - (0,490/1,547 \times 100\%) \\ &= 100 \% - 31,67 \% \\ &= 68,33 \% \end{aligned}$$

Catatan :

1. Pengambilan ralat cacah (N) dalam hal ini tidak diambil dari \sqrt{N} , hal ini disebabkan cacahan radiasi udara harganya sangat kecil, dengan demikian pengambilan ralat dalam contoh ini menggunakan ralat deviasi standar rerata hasilnya lebih signifikan.
2. Untuk menghitung deviasi standar rerata menggunakan persamaan :
3. Standar deviasi

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (12)$$

n = jumlah pengukuran

Pengolahan Data Pengukuran Kontaminasi Permukaan (Tes Usap)

Pengolahan data pengukuran kontaminasi permukaan dilakukan dengan cara mencari ralat dari variabel yang memberikan sumbangan ralat. Variabel tersebut ialah ralat statistik dari pencacahan, efisiensi detektor, luasan yang diusap dan fraksi yang terambil dalam tes usap. Dengan cara yang sama seperti contoh pengolahan data pengukuran radioaktivitas α di udara, dapat dihitung nilai $A_k = \bar{A}_k \pm S_{A_k}$ dengan A_k dan S_{A_k} menggunakan Persamaan (9) dan (12). Pengambilan ralat P diambil nilainya sebesar $\frac{1}{2}$ kali skala terkecil bacaan, dalam hal ini harga P :

$$\begin{aligned} P &= (P_{\text{rerata}} \pm S_p) \% \quad (13) \\ &= (10 \pm 0,5) \% \end{aligned}$$

Namun jika penentuan harga P ini pernah dilakukan di Instalasi Nuklir tersebut, ralat dari nilai P diambil dari nilai rata-rata P hasil penentuan. Contoh hasil pengukuran kontaminasi permukaan radiasi α berikut ralat deviasi standar di tabelkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Contoh Hasil Pengukuran Kontaminasi Permukaan Berikut Ralat Deviasi Standar.

Lokasi	Cacah netto (cps)	Ralat cacah (cps)	Ef.Detektor (%)	Ralat Ef.D (%)	Ralat Usap (cm ²)	Ralat P (%)
	15,37	3,9	23,00	-0,02		
	17,70	4,2	23,03	0,01		
	16,32	4,1	23,10	0,08		
R.Proses	16,65	4,1	22,99	-0,11	5	0,5
	17,66	4,2	23,10	0,08		
	$\Sigma = 83,7$	$ \Sigma = 20,5$	$\Sigma = 115,1$	$ \Sigma = 0,3$		
	$\bar{N} = 16,74$	$S_n = 4,1$	$\bar{E} = 23,02$	$Se = 0,06$	$S_a = 5$	$S_p = 0,5$

Dari data pada Tabel 5, dapat dihitung besarnya $A_k = \bar{A}_k \pm S_{A_k}$ dengan menggunakan Persamaan (7) dan (9). Hasil perhitungannya adalah sebagai berikut :

$$A_k = (7,27 \pm 2,65) \text{ Bq/cm}^2 \quad (14)$$

Ketelitian pengukuran
 = 100 % - $(2,65/7,27 \times 100\%)$
 = 100 % - 36,45 %
 = 63,55 %

Catatan :

1. Ralat cacah (N) diambil sebesar \sqrt{N} , pengambilan ralat dalam contoh ini hasilnya lebih signifikan karena cacahan kontaminasi permukaan cukup besar nilainya.
2. Untuk menghitung deviasi standar rerata menggunakan Persamaan (12).
3. Ralat ukur pengusapan diambil dari 1/2 skala terkecil dari 10 cm².

Pengukuran paparan radiasi di Instalasi Nuklir dimaksudkan untuk mengetahui besarnya paparan radiasi, dengan diketahuinya paparan radiasi tersebut diatur sistem proteksi radiasi bagi Pekerja Radiasi dan bertujuan agar Pekerja Radiasi terhindar dari bahaya radiasi eksternal. Batasan yang diizinkan tanpa pembatasan jam kerja adalah 25 $\mu\text{Sv/jam}$ ^[2]. Untuk pengukuran paparan radiasi hal-hal yang harus diperhatikan ialah alat ukur radiasi tersebut harus terkalibrasi dan masa kalibrasinya masih berlaku. Disamping itu jarak pengukuran dari sumber radiasi harus

dicantumkan, misal pada jarak dipermukaan sumber radiasi atau pada jarak 1 meter dari sumber radiasi. Pengukuran paparan radiasi suatu sumber harus dilakukan lebih dari satu kali pengukuran (minimal 3x pengukuran), hal ini bertujuan agar hasil ukur signifikan. Hasil akhir dari pengukuran ini adalah hasil rerata dari pengukuran berikut ralat ukurnya. Contoh hasil pengukuran paparan radiasi yang dilakukan adalah sebesar : $P = (2,60 \pm 0,11) \mu\text{Sv/jam}$ dengan ketelitian pengukuran sebesar 95,77 %.

Pengukuran radioaktif yang terdapat di udara Instalasi Nuklir bertujuan agar Pekerja Radiasi terhindar dari bahaya radiasi interna. Batasan radionuklida yang terdapat di udara mengacu kepada Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, BAPETEN nomor : 01/Ka-BAPETEN/V-1999. Untuk Instalasi Nuklir yang berbahan baku Uranium-235 dan Uranium-238 batasan yang dipakai untuk kadar U_{235} dan U_{238} dalam harian sebesar 20 Bq/m³. Selanjutnya untuk Instalasi Nuklir yang dapat menimbulkan produk fisi dari hasil kegiatannya batasan yang dipakai adalah batasan radionuklida produk fisi tersebut dan dapat dilihat di Peraturan Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi. Untuk mengetahui radionuklidanya dilakukan analisis kualitatif dengan menggunakan *Multy Channel Analizer (MCA)*. Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam pengukuran radioaktifitas yang terdapat di udara ialah : Kalibrasi dari detektor, tegangan kerja detektor (*plateu curve*), efisiensi detektor, kalibrasi *air sampler*, lama pengambilan cuplikan udara (di dalam Instalasi Nuklir

sekitar 5 – 15 menit), jumlah pengambilan cuplikan minimal 3x, saat pencacahan cuplikan (langsung atau dengan penundaan pencacahan). Contoh hasil dari pengukuran radioaktivitas α di udara adalah sebagai berikut : $A_k = (1,547 \pm 0,490)$ Bq/m³ dengan ketelitian pengukuran sebesar 68,33 %. Pengukuran radioaktivitas di Instalasi Nuklir cenderung menghasilkan ralat ukur yang besar atau ketelitian yang rendah, hal ini disebabkan umumnya radioaktivitas di udara hasil cacahannya kecil mendekati cacah latar, dengan demikian ralat cacahannya menjadi besar.

Jika dihubungkan dengan batasan kontaminasi radioaktif α sebesar 20 Bq/m³ di udara, nilai $(1,547 \pm 0,490)$ Bq/m³ ini jauh di bawah batas yang diizinkan.

Pengukuran kontaminasi permukaan di Instalasi Nuklir umumnya bertujuan agar Pekerja Radiasi terhindar dari bahaya radiasi interna. Permukaan yang diukur biasanya lantai, meja kerja, peralatan kerja yang diduga terkontaminasi. Pengukuran kontaminasi sebaiknya dilakukan secara langsung. Namun demikian adakalanya hal ini tidak mungkin dilakukan karena sumber kontaminan tidak dapat dijangkau dengan detektor kontaminasi. Pengukuran secara langsung lebih menguntungkan karena dapat dilakukan pengulangan pengukuran dan hasilnya cenderung lebih mendekati kebenaran. Batasan untuk kontaminasi permukaan adalah^[2] :

1. Daerah kontaminasi rendah, lebih kecil dari 0,37 Bq/cm² untuk pemancar α (untuk β lebih kecil dari 3,7 Bq/cm²).
2. Daerah kontaminasi sedang, untuk pemancar $\alpha \geq 0,37$ Bq/cm² tetapi < 3,7 Bq/cm², untuk pemancar $\beta > 3,7$ Bq/cm² tetapi < 37 Bq/cm²
3. Daerah kontaminasi tinggi, batasan untuk $\alpha \geq 3,7$ Bq/cm² dan untuk $\beta > 37$ Bq/cm².

Untuk pengukuran kontaminan secara tidak langsung (tes hapus) hal-hal yang harus diperhatikan ialah : Kalibrasi dari detektor, tegangan kerja detektor (*plateu curve* untuk pencacahan radiasi α), efisiensi detektor, fraksi yang terambil dalam tes usap besarnya 10 %, luasan permukaan yang di usap seluas 100cm³, cara pengusapannya searah jarum jam. Ralat dari fraksi yang terangkat dari tes usap ini diambil harganya ½ kali skala bacaan yaitu 0,5%. Pengolahan data pengukuran kontaminasi

permukaan ini menggunakan ralat perambatan yaitu variabel pengukuran yang berubah diralat dengan menggunakan metoda perambatan ralat yaitu : Persamaan (12). Contoh hasil akhir dari pengolahan datanya adalah sebagai berikut : $A_k = (7,27 \pm 2,65)$ Bq/cm² dengan ketelitian pengukuran sebesar 63,55 %. Jika dihubungkan dengan batasan kontaminasi permukaan lokasi tersebut termasuk daerah kontaminasi tinggi (Daerah kontaminasi tinggi, batasan untuk $\alpha \geq 3,7$ Bq/cm²).

Pengukuran udara buang yang dibuang melalui cerobong buang umumnya dilakukan dengan menggunakan *air sampler* yang bekerja secara terus-menerus dan dilengkapi dengan detektor cacah radiasi α , β dan γ . Alat ukur tersebut juga harus terkalibrasi. Batasan radioaktivitas yang dilepas kelingkungan harus memperhatikan baku tingkat radioaktivitas di lingkungan. Untuk Instalasi Nuklir yang menggunakan bahan baku utamanya adalah Uranium-238 dan Uranium-235 baku mutu yang dipakai adalah sebesar 0,2 Bq/m³ yang dapat diterima oleh masyarakat. Dari nilai baku mutu sebesar 0,2 Bq/m³ ini diturunkan besarnya radioaktif yang diizinkan atau Batas Pelepasan Maksimum (BPM) yang dapat dibuang melalui cerobong buang Instalasi Nuklir tersebut. Untuk penentuan BPM digunakan model distribusi pencemaran udara dengan Persamaan *Gauss* yang dikenal dengan penyelesaian Persamaan *Pasquill*, dan disesuaikan dengan tinggi cerobong buang, katagori udara, kecepatan angin serta baku mutu zat radioaktif dilingkungan^[8].

Dengan adanya pengukuran radiasi di Instalasi Nuklir dan pengolahan data yang benar diharapkan Pekerja Radiasi, Masyarakat dan lingkungan terhindar dari dampak radiologi. Hal ini sesuai dengan undang-undang Republik Indonesia nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Pasal 16 ayat 1 berbunyi : Setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup.

KESIMPULAN

Dengan pemahaman pengukuran radiasi di instalasi nuklir dan pengolahan datanya, hasil

pengukuran radiasi akan signifikan dan diharapkan pekerja radiasi, masyarakat serta lingkungan terhindar dari dampak radiologi sehingga sesuai dengan undang-undang Republik Indonesia nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, Pasal 16 ayat 1 berbunyi : Setiap kegiatan yang berkaitan dengan pemanfaatan tenaga nuklir wajib memperhatikan keselamatan, keamanan dan ketentraman, kesehatan pekerja dan anggota masyarakat, serta perlindungan terhadap lingkungan hidup.

SARAN

Pengalaman di instalasi nuklir, petugas pemantauan dilapangan kurang menguasai bagaimana cara melakukan pengukuran radiasi nuklir. Untuk meningkatkan pengetahuan petugas pemantauan dilapangan dan karyawan BATAN yang tugas belajar di Sekolah Tinggi Teknik Nuklir (STTN) Yogyakarta, perlu ditingkatkan pelajaran/pengetahuan tentang penanganan keselamatan radiasi di dalam instalasi nuklir, khususnya bagaimana cara mengukur paparan radiasi, radioaktivitas di udara, kontaminasi radioaktif dipermukaan, pemantauan udara buang serta pengolahan data pengukurannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. ANONIM, 1997, "Undang-undang no. 10 tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran", Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)
2. ANONIM, 1999, "Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi nomor : 01/Ka-BAPETEN/V-1999", Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
3. SOEDOJO, PETER, 1983, "Mekanisme Transport Dan Distribusi Gas Radon Alam", Disertasi, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
4. ALAN MARTIN AND SAMUEL A. HABIRSON, 1986, An introduction to radiation protection, London.
5. E. ZIJP, 1974, "Analisa Pengukuran Fisika, Fakultas Ilmu Pasti dan Alam", Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.
6. GANW KUZMA AND STEPHENE, 2001, "Basic Statistics For Health Science", 4rd Edition.

7. ANONIM, 1999, "Baku Tingkat Radioaktif di Lingkungan nomor : 01/Ka-BAPETEN/ V-1999", Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).
8. TAKEISHI, MINORU., 1996, "Determination of Derived Emission Limits for Airborne and Liquid", PNC,JAERI, Japan.

TANYA JAWAB

Pertanyaan

1. Berapa lama jangka waktu kalibrasi untuk alat pengukuran radiasi yang bekerja secara nonstop (24 jam) ? (Sidiq Rohmadi)
2. Kemudian kesalahan pengukuran walaupun pengukuran secara komputerisasi apakah alat perlu dilakukan kalibrasi ? (Sidiq Rohmadi)
3. Dalam penyampaian makalah disebutkan operator pemantauan dalam bekerja sering melakukan kesalahan pengukuran, apakah tidak ada prosedur baku yang harus dipatuhi oleh petugas tersebut ? (Sigit B)

Jawaban

1. Alat dikalibrasi sebelum dioperasikan dan alat sudah di desain oleh prabrikaan supaya dapat beroperasi secara terus menerus, setiap minggu saat penggantian filter di cek ulang bacaan kalibrasinya. Kemudian setiap tahun dikalibrasi ulang.
2. Perlu dikalibrasi dan faktor kalibrasinya dimasukkan kedalam data kalibrasi di komputer alat tersebut.
3. Prosedur sudah ada, namun di prosedur pemantauan secara teknis dan terperinci misalnya menentukan ralat ukur, mempergunakan nilai faktor koreksi pada alat umumnya tidak ada di prosedur.