

PEDOMAN PENGUKURAN LAJU KERMA UDARA DAN KALIBRASI ALAT UKUR RADIASI TINGKAT PROTEKSI SERTA PENILAIAN KETIDAKPASTIANNYA BERDASARKAN *THE MEASUREMENT GOOD PRACTICE GUIDE* No. 49/2003

Nazaroh

PTKMR-BATAN

Diajukan: 26 Maret 2010; Dinilai: 26 April 2010; Diterima: 5 Mei 2010

Abstrak

Kebutuhan akan prosedur yang dapat diterima secara Internasional tentang pengukuran laju kerma udara dan kalibrasi alat ukur radiasi tingkat proteksi, dan pelaporan ketidakpastiannya, telah disadari kepentingannya dan perlu direalisasikan karena tuntutan pengukuran yang akurat dan ketertelusurannya. Sesuai dengan tugas pokok dan fungsinya, PTKMR-BATAN sebagai SSDL-Jakarta memiliki tanggungjawab di bidang keselamatan dan metrologi radiasi. Salah satu tugasnya adalah menjaga ketertelusuran alat standar sekunder ke sistem internasional dan memberikan layanan kalibrasi alat ukur radiasi. Kalibrasi alat ukur radiasi dapat dilakukan dengan membandingkan bacaan alat yang dikalibrasi dengan bacaan alat standar (metode tip to tip dan substitusi) atau menggunakan sumber radiasi standar. Makalah ini menyajikan pedoman pengukuran laju kerma udara dan kalibrasi alat ukur radiasi dengan metode substitusi berdasarkan *The Measurement Good Practice Guide* No.49/2003.

Kata kunci: Laju kerma udara, kalibrasi, alat ukur radiasi

Abstract

Guidance on Measurement of Air Kerma Rate and Calibration of Radiation Measuring Instrument for Protection Level and Assessment of Its Uncertainty Based on the Measurement Good Practice Guide No. 49 / 2003

*An internationally accepted procedure on measurement of air kerma rate and calibration of radiation measuring instrument for protection level, and its uncertainty report, was understood to be important and needed to be realized because of accurate measurement demand and its traceability. According to its fundamental duty and function, PTKMR-BATAN as SSDL-JAKARTA has responsibility in the field of safety and radiation metrology. One of the duties is to maintain traceability of secondary standards to international system and gives services on calibration for radiation measuring instruments. Calibration of radiation measuring instruments can be done by comparing the reading of calibrated instruments to standard reading (tip to tip and substitution methods) or using the standard radiation source. This paper presented guidance of measurement of air kerma rate and calibration of radiation measuring instrument with substitution method based on *The Measurement Good Practice Guide* No.49/2003.*

Keywords: Air Kerma rate, calibration, radiation measuring instrument

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan prosedur yang dapat diterima secara internasional tentang pengukuran laju kerma udara dan kalibrasi alat ukur radiasi tingkat proteksi, dan pelaporan ketidakpastiannya, telah disadari kepentingannya, lebih dari dua dekade yang lalu. Tepatnya pada tahun 1981 Komite Pengukuran Internasional (*The Comité International des Poids et Mesures* = CIPM) telah menyetujui garis besar rekomendasi laboratorium standar nasional, tentang suatu pedoman yang dapat dipakai di semua tingkatan metrologi, dan ISO

diminta untuk mengembangkannya. Sebagai tindaklanjut dari masalah di atas, dibentuklah Kelompok Kerja (ISO/TAG4/WG3), yang hasil kerjanya adalah *ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* yang dipublikasikan pada tahun 1993 [1].

Suatu kelompok kerja dari UKAS (*United Kingdom Accreditation*) juga menghasilkan publikasi NAMAS B0825 (1990), yang berjudul: *The Expression of Uncertainty in Radiological Measurement* [2], untuk memberikan solusi atas perlunya pedoman tentang pelaporan hasil pengukuran meskipun tidak mengandung anjuran khusus untuk pengukuran radiologik.

Pada tahun 1997, UKAS mempublikasikan M3003, *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement* [3]. Ini konsisten dengan *ISO Guide* dan memuat contoh-contoh aplikasi teori untuk beberapa bidang pengukuran tetapi tidak termasuk pengukuran radiologik.

Seperti telah kita ketahui bersama bahwa mayoritas keberadaan SSDL (*Secondary Standard Dosimetry Laboratory*) di dunia, ditetapkan untuk melakukan pekerjaan dengan radiasi foton (sinar-X dan gamma). PTKMR-BATAN (Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi), sebagai SSDL-Jakarta, memiliki tugas pokok dan fungsi (tupoksi) di bidang keselamatan dan metrologi radiasi. Untuk merealisasikan tupoksi tersebut, PTKMR melakukan:

- penelitian dan pengembangan di bidang dosimetri untuk proteksi, diagnostic dan terapi
- kegiatan audit mutu dosis yang diselenggarakan oleh IAEA/WHO untuk dosimetri proteksi dan radioterapi
- kegiatan interkomparasi nasional: pengukuran output pesawat radioterapi dan dosimetri proteksi menggunakan TLD serta interkomparasi dosis ekuivalen perorangan, Hp(10) menggunakan TLD dan Dosimeter film
- layanan kalibrasi alat ukur radiasi tingkat terapi dan proteksi
- layanan pelatihan kalibrasi alat ukur radiasi tingkat proteksi dan terapi serta pengukuran output sumber radiasi terapi.

Sumber radiasi foton dan sinar X semakin lama banyak dipakai di bidang industri, penelitian, pengembangan tenaga nuklir serta biologi dan kedokteran nuklir. SSDL di suatu negara perlu menyediakan sumber sumber sinar gamma dan pesawat sinar X untuk kegiatan regulernya, memenuhi persyaratan minimum untuk mengkalibrasi alat ukur gamma dan sinar-X

Sudah menjadi ketentuan bahwa pengukuran yang dilakukan untuk tujuan proteksi radiasi harus akurat. Hal ini bertujuan untuk menjamin bahwa paparan radiasi yang diterima oleh pekerja radiasi harus dalam rentang kesesuaian dengan regulasinya. Pengukuran yang akurat dapat dicapai dengan penggunaan alat yang terkalibrasi dan sesuai karakteristiknya.

Tujuan kalibrasi adalah menentukan respon alat pada suatu medan acuan di bawah kondisi paparan standar, untuk menjamin bahwa alat bekerja dengan benar, dan tertelusur ke system internasional.

Makalah ini menyajikan pedoman pengukuran laju kerma udara dan kalibrasi alat

ukur radiasi tingkat proteksi (dose-rate meter) serta penilaian ketidakpastiannya berdasarkan *The Measurement Practice Guide No. 49/2003* [11] karena pada umumnya, bacaan alat ukur radiasi disajikan dalam satuan laju kerma udara (mikro grey/hour) atau laju paparan (mili rontgen/hour), atau laju dosis ekuivalen (mili sievert/hour).

Pedoman ini tidak mengharuskan user untuk meletakkan semua sumber ketidakpastian ke dalam anggaran ketidakpastian kalibrasi alat ukur radiasi tetapi hanya menganjurkan kepada user, yang mana yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi tersebut. Makalah ini dimaksudkan sebagai petunjuk bagaimana melakukan pengukuran yang baik. Nilai-nilai yang digunakan di dalam contoh adalah untuk tujuan ilustrasi saja, dan setiap laboratorium boleh menentukan nilai yang digunakan untuk kondisi laboratoriumnya.

2. DASAR TEORI

Menurut Peraturan Kepala BAPETEN No. 1/2006, alat ukur radiasi (AUR) adalah alat yang menunjukkan laju pajanan (*exposure*), dosis serap, kerma udara, dosis ekuivalen dalam medan radiasi untuk keperluan proteksi [4]. Dose rate-meter, surveymeter, *pocket* dosimeter merupakan bagian dari alat ukur radiasi.

2.1 Pengukuran Laju Kerma Udara

Besaran fisika Kerma udara, K [5, 6,7,8] menurut definisi adalah jumlah energi kinetik awal semua partikel pengion bermuatan yang dibebaskan oleh partikel tak bermuatan (dEtr) pada suatu bahan dengan masa dm, satuannya: Gy atau μGy .

$$K = dE_{tr}/dm \dots\dots\dots(1)$$

Namun secara operasional, pengukuran Kerma udara, K pada suatu titik acuan di udara untuk kualitas berkas acuan, Q₀ (misalnya berkas ¹³⁷Cs) mengikuti rumusan berikut:

$$K = (M_{Q_0} - M_o) \times N_{k,Q_0} \dots\dots\dots(2)$$

M_{Q₀} : Bacaan dosimeter di bawah kondisi acuan yang digunakan pada laboratorium Standar.

M_o : Bacaan dosimeter dalam keadaan tidak ada berkas radiasi.

N_{k,Q₀} : Koefisien kalibrasi dosimeter kerma udara yang diperoleh di laboratorium Standar.

Koefisien kalibrasi mengacu ke kondisi acuan yang digunakan pada laboratorium

tersebut dan ini merupakan perbandingan dari nilai benar konvensional dari besaran yang diukur terhadap nilai yang ditunjukkan.

Kondisi acuan adalah kondisi pada satu set nilai acuan/standar ($P_0 = 101,3 \text{ Pa}$ / $T = 20^\circ\text{C}$ dan $H = 50\%$), dimana koefisien kalibrasi tersebut berlaku/sah tanpa koreksi lagi.

Besaran yang mempengaruhi pengukuran kerma udara adalah :

- yang timbul dari alam yang berbeda: tekanan dan temperatur
- yang timbul dari dosimeter: kebocoran, *warm-up*
- yang timbul dari medan radiasi: kualitas berkas, laju dosis, ukuran lapangan, keberadaan radiasi hamburan.

Besaran yang mempengaruhi didefinisikan sebagai besaran yang bukan pokok pengukuran tetapi mempengaruhi hasil pengukuran. Besaran yang mempengaruhi mempunyai efek yang berbeda pada tipe dosimeter yang berbeda. Contoh respon dosimeter dengan detektor semikonduktor biasanya tidak dipengaruhi oleh perubahan tekanan sedangkan kamar ionisasi dipengaruhi tekanan.

Selama pengukuran, usahakan besaran yang mempengaruhi dijaga/dikontrol. Jika kondisi pengukuran tidak sesuai dengan kondisi acuan yang digunakan di laboratorium standar maka perlu dilakukan koreksi.

Pengukuran laju kerma udara dilakukan dengan menggunakan alat ukur radiasi standar sekunder. Menurut referensi [11], pengukuran Kerma udara pada sumbu berkas ^{137}Cs atau ^{60}Co mengikuti persamaan berikut:

$$K = \frac{(M_s - M_B) \times C_s \times F_{nl} \times F_r \times F_{dd} \times F_{mu} \times F_{room} \times F_{scim} \times F_{rate} \times F_T \times F_P \times F_H \times F_{Ti}}{\dots\dots\dots(3)}$$

- M_s : bacaan alat standar
- M_B : bacaan *background* alat standar
- C_s : koefisien kalibrasi alat standar
- F_{nl} : koreksi ketidaklinieran skala alat (dari fabrikasi)
- F_r : faktor koreksi rentang alat (dari fabrikasi)
- F_{dd} : faktor koreksi kebergantungan arah alat (dari sertifikat/fabrikasi)
- F_{mu} : faktor koreksi ketidakseragaman medan
- F_{room} : koreksi hamburan udara di ruangan
- F_{scim} : koreksi hamburan dari penyangga alat
- F_{rate} : faktor koreksi laju
- F_T : faktor koreksi temperatur

- F_P : faktor koreksi tekanan
- F_H : faktor koreksi kelembaban
- F_{Ti} : koreksi untuk *timer*

Faktor-faktor koreksi tersebut secara normal adalah satu untuk kondisi operasi standar/ideal.

2.2 Kalibrasi AUR dalam istilah Kerma

Kalibrasi *dose-rate meter* dilakukan dengan pengukuran responnya terhadap medan radiasi yang dikalibrasi menggunakan alat ukur radiasi standar sekunder.

Faktor kalibrasi alat, C_K , dalam istilah kerma, diturunkan menggunakan hubungan antara kerma, K (atau laju kerma) pada titik kalibrasi dan bacaan alat:

$$C_K = \frac{K}{(M - M_B)(f_{nu} \cdot f_{room} \cdot f_{scim} \cdot f_{rate} \cdot f_T \cdot f_P \cdot f_H)} \dots\dots(4)$$

- M : Bacaan *dose-rate meter*
- M_B : Bacaan *background dose-rate meter*

Faktor $f_{nu} \cdot f_{room} \cdot f_{scim} \cdot f_{rate} \cdot f_T \cdot f_P \cdot f_H$ sama dengan faktor-faktor yang telah diuraikan sebelumnya.

2.3 Kalibrasi AUR dalam Istilah Dosis Ekuivalen, H

Dosis ekuivalen (laju dosis ekuivalen) diberikan dengan persamaan:

$$D = h \times K \dots\dots\dots(5)$$

Koefisien h , untuk mengkonversikan kerma ke besaran dosis ekuivalen yang dikehendaki, dievaluasi dari data radiobiologi dan dipublikasikan oleh [4], [5]. Faktor kalibrasi dalam istilah besaran dosis ekuivalen = $C_K \times h$.

3. TATA KERJA

Pengukuran laju kerma udara dilakukan pada berkas ^{137}Cs tingkat proteksi (aktivitas 74 MBq) menggunakan alat standar sekunder yang tertelusur secara langsung ke sistem internasional melalui IAEA (misalnya menggunakan detektor kamar pengion volume 600cc yang dirangkai dengan dosimeter Farmer) pada titik acuan, pada SDD (*Source to Detector Distance*) tertentu. Ambil 10 data pengukuran, catat pada formulir data. Catat temperatur pengukuran (T), tekanan udara (P) dan kelembaban udara (H). Catat pengukuran *background*. Kemudian data tersebut dievaluasi

menggunakan persamaan (3), sehingga diperoleh nilai kerma udara, K.

Kalibrasi AUR dilakukan pada SDD yang sama, sesuai dengan instruksi kerja yang telah disebutkan di muka. Diambil masing-masing 10 data pengukuran, M dan M_B. Selanjutnya hasil pengukurannya dievaluasi menggunakan persamaan (4), sehingga diperoleh faktor kalibrasi dalam istilah kerma udara, C_K. Jika faktor kalibrasi dalam istilah dosis ekuivalen, C_H maka dikalikan dengan faktor h.

Suatu nilai hasil pengukuran, Y, tidaklah lengkap tanpa adanya pernyataan ketidakpastiannya karena rentang nilai benar yang diperkirakan, terletak pada tingkat kepercayaan yang diberikan. Nilai yang diukur (besaran output) ditentukan sebagai fungsi f(xi) dari parameter input x.

Ketidakpastian dari suatu pengukuran adalah gabungan dari ketidakpastian δy_i , yang muncul dari semua besaran input, δx_i . ISO Guide in the expression of uncertainty in Measurement, 1993 [1] menggambarkan prosedur untuk perlakuan dan pernyataan

ketidakpastian yang dapat diterima secara internasional.

Setiap xi mempunyai ketidakpastian δx_i , yaitu parameter yang mengkarakterkan sebaran nilai xi. Jika xi terletak dalam rentang yang dispesifikasikan, dengan probabilitas sama, dikatakan bahwa xi memiliki distribusi rectangular dan ketidakpastiannya dinyatakan dalam istilah rentang semi (semi-range). Yang lainnya adalah distribusi normal (Gaussian).

Ketidakpastian dinyatakan dalam nilai (angka) dengan tingkat kepercayaan dan tipe distribusi tertentu. Setiap ketidakpastian dinyatakan sebagai ketidakpastian standar, u(xi), yang diturunkan dengan membagi δx_i , dengan suatu angka yang bergantung pada distribusi probabilitas dari δx_i . Ketidakpastian standar sama dengan satu standar deviasi dan merupakan besaran kunci dalam ketidakpastian kombinasi.

Beberapa tipe distribusi, parameter, pembagi dan tingkat kepercayaan, disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Tipe Distribusi dan Tingkat Kepercayaan Ketidakpastian

Distribusi	Parameter	Tingkat Kepercayaan	Pembagi
Normal	1 deviasi standar	67,7 %	1
Normal	2 deviasi standar	95,5 %	2
Normal	3 deviasi standar	99,7 %	3
Rectangular	Semi-range	100 %	$\sqrt{3}$
Triangular	Semi-range	100%	$\sqrt{6}$

Setiap $u(x_i)$ memberi kontribusi pada ketidakpastian standar, $u_i(y)$ pada besaran output. Hal ini dinyatakan sebagai:

$$u_i(y) = c_i \cdot u(x_i) \dots\dots\dots(6)$$

c_i adalah koefisien sensitivitas yang merupakan turunan parsialnya.

$$c_i = \left| \frac{\partial y}{\partial x_i} \right| \dots\dots\dots(7)$$

3.1 Ketidakpastian Tipe A

Klasifikasi komponen ketidakpastian secara tradisional terdiri atas random dan non- random (kadang disebut sistematis). Menurut definisi, ketidakpastian tipe A dapat dievaluasi dengan teknik statistik dan ketidakpastian tipe B dievaluasi dengan cara lain.

Komponen ketidakpastian tipe A adalah suatu ukuran riptabilitas dari suatu hasil di bawah kondisi konstan dan dapat diasumsikan mempunyai distribusi normal, ditentukan dengan sederet pengukuran (y_i). Deviasi Standar σ , diperoleh dari sederet pengukuran:

$$s(\sigma) = \left[\frac{\sum (y_i - y_m)^2}{(n-1)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots(8)$$

y_m adalah nilai y rata-rata

Deviasi standar dari rata-rata, u adalah:

$$u = \frac{s(\sigma)}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots(9)$$

3.2 Ketidakpastian Tipe B

Semua ketidakpastian yang bukan tipe A dan tidak dapat ditentukan dengan sederet

pengukuran berulang adalah ketidakpastian tipe B. Ketidakpastian ini tetap konstan selama pengukuran. Ketidakpastian tipe B muncul dari berbagai sumber dan distribusi probabilitasnya bervariasi. Nilai-nilai komponen tipe B sudah tersedia dan dinyatakan oleh badan eksternal seperti ketidakpastian untuk standar acuan diberikan pada sertifikat, dinyatakan oleh badan akreditasi. Ketidakpastian beberapa besaran input yang digunakan diperoleh pada dokumen yang telah dipublikasikan.

Jika nilai ketidakpastian tidak diketahui, dapat diadopsi dan bilamana mungkin ditentukan dengan pengukuran sendiri. Jika distribusi probabilitas tidak diketahui, harus dicari informasi lebih jauh, misalnya dari pabrikan.

Sering diasumsikan distribusi *rectangular* dengan pembagi $\sqrt{3}$ atau distribusi normal, dengan pembaginya adalah satu.

3.3 Ketidakpastian Gabungan

Pilihan k= 2 untuk faktor cakupan, memberikan ketidakpastian bentangan untuk tingkat kepercayaan 95%, mengasumsikan bahwa ketidakpastian tipe A didasarkan pada suatu observasi yang besar sehingga distribusi probabilitas cenderung normal. Pengukuran kadang-kadang terbatas, kurang dari 10 pengamatan, sehingga pilihan k= 2 akan memberikan ketidakpastian lebih rendah karena probabilitas mengikuti distribusi t.

Tabel 2 Nilai k untuk Tingkat Kepercayaan 95%

v_{eff}	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
k	4,30	3,18	2,78	2,57	2045	2,36	2,31	2,26	2,23	2,18
v_{eff}	14	16	18	20	25	30	35	40	50	~
k	2,14	2,12	2,10	2,09	2,06	2,04	2,03	2,02	2,01	1,96

Rumus **Welch-Satterthwaite** digunakan untuk menurunkan angka efektif derajat kebebasan untuk anggaran ketidakpastian khusus:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \dots\dots\dots(10)$$

v_i : angka derajat kebebasan untuk komponen ketidakpastian ke-i. Untuk sederet n pengukuran, $v_i = n-1$.

3.4 Anggaran Ketidakpastian

Contoh anggaran ketidakpastian untuk pengukuran laju kerma udara dari suatu berkas yang dihasilkan oleh sumber ¹³⁷Cs pada posisi acuan, disajikan pada Tabel 3 sedangkan untuk kalibrasi alat ukur radiasi tingkat proteksi disajikan pada Tabel 4.

Sepuluh bacaan telah dibuat untuk pengukuran berkas dan *background*. Ketidakpastian untuk bacaan tersebut diasumsikan mempunyai distribusi normal. Jumlah derajat kebebasan dihitung menggunakan rumus **Welch-Satterthwaite**.

Rumusan diferensial parsial untuk menurunkan koefisien sensitivitas, c_i disajikan pada Tabel 3. Ketidakpastian standar, $u_i(y)$ dinyatakan sebagai persentase besaran hasil dan dihitung pula nilai untuk koefisien sensitivitas relatif

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada Tabel 3 disajikan Anggaran Ketidakpastian Pengukuran Laju Kerma berkas ¹³⁷Cs pada suatu posisi acuan. Ketidakpastian bentangan Laju kerma udara ¹³⁷Cs didasarkan pada suatu ketidakpastian standar gabungan dikalikan dengan faktor cakupan k= 2, dengan tingkat kepercayaan 95%.

Nilai yang digunakan untuk besaran dan ketidakpastiannya hanya untuk penggambaran /ilustrasi saja.

$$u(y) = \frac{\partial x_i}{pembagi} x \frac{c_i}{y} \dots\dots\dots(11)$$

Tabel 3 Anggaran Ketidakpastian Pengukuran Laju Kerma pada Posisi Acuan Berkas ¹³⁷Cs [10]

Besaran	Nilai	ketidakp ∂x_i	Distr.	Pembagi	$(\delta f/\delta x)/y$	c_i/y	$u_i(y)$ %	v_{eff}
Bacaan rerata alat sekunder, M_s	28,3 nC	0,2	N	1	$(M_s - M_B)_1^-$	100/28	0,71	9
Bacaan rerata backgroun, M_B	0,3 nC	0,1	N	1	$(M_s - M_B)_1^-$	100/28	0,36	9
Fakt. Kalib. Standar Sekunder, C_s	1.000 □ Gy/nC	0,018 □ Gy/nC	N	2	1/ C_s	100	0,90	~
Fakt. Ketidaklinieran, F_{nl}	1	0,002	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{nl}	100	0,12	~
Fakt. Koreksi rentang, F_r	1	0,001	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_r	100	0,06	~
Ketertgantungan arah, F_{dd}	1	0,002	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{dd}	100	0,12	~
Ketdksreragaman berkas, F_{nu}	1,016	0,004	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{nu}	100	0,23	~
Hamburan ruang, F_{room}	0,981	0,002	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{nu}	100	0,12	~
Hamburan penyangga, F_{sm}	0,99	0,002	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{room}	100	0,12	~
Pengaruh laju, F_{rate}	1	<0,001	Rect.	$\sqrt{3}$	1/ F_{scim}	100	0,06	~
Temperatur, T	19°C	0,5	Rect.	$\sqrt{3}$	1/(T+273)	100/293	0,10	~
Tekanan, P	1003 mbar	1 mbar	Rect.	$\sqrt{3}$	1/P	100/1003	0,06	~
Kelembaban, H	50%	5	Rect.	$\sqrt{3}$	1/100	1	<0,01	~
Jarak: Posisi pusat efektif Jarak stand dari sumber	2 m	2mm 2mm	Rect.	$\sqrt{3}$	2/s 2/s	200/2000 200/2000	0,12 0,12	~ ~
Timer, t	1200 s	0,2s	Rect.	$\sqrt{3}$	1/t	100/600	0,01	
Laju kerma udara, K	83,4 □ Gy/h		N			u(K)	1,27	85
Ketidakpastian bentangan, U	2,1 □ Gy/h		N			U	2,6	85

4.1 Komponen Ketidakpastian untuk Pengukuran Kerma Udara

- a. Bacaan Alat Standar Sekunder, M_s
Alat standar biasanya mempunyai *display* digital. Ketidakpastian dari bacaan rata-rata adalah deviasi standar rata-rata dari sederet nilai pengukuran dan ini merupakan ketidakpastian tipe A dengan distribusi normal.
- b. Bacaan Alat Standar Sekunder terhadap Background
Bacaan pengukuran dikoreksi terhadap *background* dan pengaruh kebocoran arus, dengan mengurangi bacaan tersebut. Ketidakpastian *background* adalah deviasi standar dari rata-rata sederet pengukuran

background, merupakan ketidakpastian tipe A dengan distribusi normal.

- c. Faktor Kalibrasi Alat Standar
Ketidakpastian faktor kalibrasi diperoleh dari sertifikat kalibrasi yang disajikan oleh laboratorium Standar, dinyatakan pada tingkat kepercayaan 95%. dan merupakan distribusi normal.
- d. Koreksi Ketidaklinieran
Faktor koreksi ketidaklinieran bergantung pada alat dan nilainya dari data fabrikasi atau sertifikat kalibrasi
- e. Faktor Koreksi Rentang Alat, F_r

Faktor koreksi rentang alati bergantung pada alat dan nilainya dari data fabrikasi atau sertifikat kalibrasi

f. Kebergantungan Arah *Ionization Chamber*, F_{dd}

Faktor koreksi ini bergantung pada alat dan nilainya diperoleh dari data fabrikasi atau sertifikat kalibrasi

g. Ketidakeragaman Medan, F_{nu}

Karena *ionization chamber* merata-ratakan kerma udara di atas penampang lintang berkas, koreksi dipakai untuk memberikan kerma pada suatu titik pada berkas sumber. Profil intensitas medan radiasi melalui area ini bergantung pada kolimator sumber, jarak antara sumber dan *ionization chamber*, dan radius *ionization chamber*. Profil tersebut diukur pada suatu keadaan menggunakan *probe* kecil. Koreksi ini kira-kira 2 % untuk *ionization chamber* volume besar yang digunakan pada jarak sumber dekat. Ketidakpastian diasumsikan mempunyai distribusi *rectangular*

h. Hamburan dari sekitarnya, F_{room}

Pengaruh radiasi yang dihamburkan udara dan ruangan untuk alat sekunder bergantung pada respon alat. Komponen ini harus diukur dan dikurangkan, menghasilkan komponen langsung. Koreksi ini biasanya kecil. Komponen hamburan relatif konstan dan oleh sebab itu pengaruhnya bertambah dengan jarak. Pengaruh hamburan pada respon alat yang dikalibrasi di medan tersebut dapat sama untuk standar sekunder

i. Hamburan dari penyangga alat, F_{scim}

Koreksi ini umumnya sekitar 1-2 %.

j. Faktor Koreksi Laju, F_{rate}

Faktor koreksi laju bergantung pada alat dan laju kerma. Faktor dan ketidakpastiannya diperoleh menggunakan data fabrikasi. Untuk *ionization chamber* tipikal ketidakpastian akibat efek rekombinasi umumnya kurang dari 0,1 %, tetapi ada efek lain yang berkontribusi ke faktor ini seperti kinerja setiap analog ke konverter digital.

k. Temperatur Sekitar, F_T

Ketika mengukur laju kerma, dengan *ionization chamber* terbuka, koreksi harus dilakukan untuk pengaruh tekanan dan temperatur pada densitas udara. Faktor koreksi untuk temperatur, F_T adalah $(T+273)/293$ dimana T adalah temperatur *ionization chamber* dalam derajat celsius. Variasi

temperatur mungkin mempengaruhi kalibrasi elektronik alat.

l. Tekanan sekitar, F_P

Faktor koreksi tekanan, F_P adalah $1013,3/P$, satuan tekanan dalam mbar. 1 mbar = 100 Pa, 1 atm = 101,3 kPa.

m. Faktor Koreksi Kelembaban, F_H

Nilai faktor koreksi kelembaban untuk rentang kelembaban relatif dari 20 %-70 % kecil. Tipikal ketidakpastian kelembaban relatif untuk *ionization chamber* sekitar 0,05 %.

n. *Timer*, F_{Ti}

Timer yang digunakan untuk mengatur periode integrasi dosis harus dikalibrasi terhadap standar waktu nasional *United Kingdom*. Normalnya, ketidakpastiannya diabaikan. Ketidakpastian lain yang muncul adalah akibat resolusi bacaan *timer*.

o. Kondisi sekitar

Faktor koreksi untuk pengaruh suhu, tekanan dan kelembaban sekitarnya dapat diaplikasikan jika monitor berkas *ionization chamber* tidak terbungkus (*unsealed*). Ketidakpastian yang tergabung dengan faktor koreksi untuk kondisi sekitar disajikan dimuka.

Catatan: Jika monitor berkas dikalibrasi menggunakan *ionization chamber* standar terbuka, koreksi tekanan dan kelembaban untuk kedua alat akan dibatalkan. Tetapi dua *chamber* mungkin berbeda temperatur, jika yang satu diletakkan di udara bebas sedangkan lainnya di dalam suatu mesin.

p. Posisi

Ketidakpastian Posisi Terdiri Atas:

- ketidakpastian karena posisi dari pusat efektif terhadap stand penunjang alat
- ketidakpastian karena posisi stand terhadap sumber radiasi. Keduanya mempunyai distribusi *rectangular*. Untuk contoh, jika alat yg sedang diuji disangga pada posisi sama dengan alat sekunder, sumber kedua ketidakpastian dibatalkan. Korelasinya relatif kecil dan biasanya diabaikan pada ketidakpastian keseluruhannya.

4.2 Komponen Ketidakpastian Kalibrasi AUR (Dose-Rate Meter) Portabel

a. Bacaan alat, M

Ketidakpastian yang diacu adalah resolusi alat.

b. Analog Display: Fluktuasi Statistik

Pada laju cacah tinggi, bacaan meter dari *dose-rate meter* akan stabil, dan dapat dirata-ratakan dengan akurat. Rentang bacaan dan ketidakpastiannya dapat diperkirakan dengan penglihatan visual dengan keakuratan yang dapat diperbandingkan untuk resolusi dan parallax.

Pada laju cacah rendah, bacaan dari *dose-rate meter* berfluktuasi secara signifikan, dan perlu diambil bacaan yang cukup untuk memperoleh nilai rata-rata atau median dengan akurasi yang dikehendaki.

c. Display Analog: *Parallax*

Jika jarum penunjuk display tidak dekat dengan skala, meter skala log dari alat mungkin terbaca sampai 5% lebih tinggi pada skala akhir dan 5% lebih rendah pada skala bawah ketika terlihat oleh kamera televisi.

d. Tampilan Analog: Resolusi Skala Alat

Resolusi skala alat dapat diperkirakan dengan pengamatan. Untuk tampilan analog linier, ketidakpastian bacaan sekitar 2% jika dekat 90 % FSD dan sekitar 4% pada separuh skala.

Untuk analog skala logaritma ketidakpastian pengamatan kurang baik ($\pm 10\%$) dan bahkan sampai ($\pm 20\%$).

e. Tampilan Digital

Untuk sebagian besar tampilan peralatan elektronik, bacaan untuk presisi yang dipilihnya biasanya dibulatkan ke bawah. Sebagai contoh, bacaan 30 akan diartikan bahwa nilainya terletak antara 30 dan 31 dengan probabilitas sama. Ketidakpastiannya separuh dari resolusi dan mempunyai distribusi *rectangular* [1]. Hasilnya: $30,5 \pm 0,5$.

Catatan: Pada beberapa alat, digit terakhir yang ditampilkan bukan digit berarti.

4.3 Pengaruh Lain

a. Bacaan Background

Bacaan dikoreksi terhadap *background* dan pengaruh arus bocor, dengan mengurangi bacaan yang dilakukan dengan ketiadaan sumber radiasi.

b. Ketidakeragaman Medan, f_{nu}

Ketidakpastiannya sekitar $\pm 2\%$ untuk alat dengan *ionization chamber* volume besar yang dikalibrasi pada jarak sumber dekat. Ketidakeragaman ini akan lebih kecil untuk detektor tabung Geiger Muller dan detektor zat padat.

c. Hamburan dari Penyangga Alat, f_{scim}

Ketidakpastiannya biasanya kurang dari $\pm 2\%$

d. Pengaruh *deadtime*/ laju, f_{rate}

Pengaruh laju akan timbul dari meter yang mempunyai *deadtime* (untuk GM) atau dari fenomena saturasi (*ionization chamber*). Kompensasinya mungkin disediakan secara elektronik (meskipun koreksi tidak selalu sempurna). Oleh karena itu koreksi laju tidak dilakukan secara rutin.

e. Temperatur, Tekanan dan Kelembaban Sekitar, f_T, f_P, f_H

Jika monitor berkas adalah *ionization chamber* terbuka dan alat yang dikalibrasi juga *ionization chamber* terbuka, maka tidak diperlukan koreksi tekanan. Tetapi koreksi perbedaan temperatur harus dilakukan. Koreksi temperatur dan tekanan harus diaplikasikan untuk monitor berkas dan kalibrasi tabung GM atau detektor zat padat. Jika monitor berkas bukan *ionization chamber* terbuka dan alat yang dikalibrasi *ionization chamber* terbuka harus dikoreksi untuk kondisi sekitar. Alat yang berdasarkan GM tidak perlu koreksi.

Contoh anggaran ketidakpastian untuk kalibrasi AUR (*dose-rate meter*) dalam suatu berkas yang dihasilkan sumber ^{137}Cs pada posisi titik acuan disajikan pada Tabel 4.

Untuk contoh yang disajikan di bawah ini, sertifikat kalibrasi dapat dinyatakan:

Faktor kalibrasi untuk ^{137}Cs pada laju dosis ekuivalen ambien 30mSv/h adalah:

$$C_H = 1,03 \pm 8\%$$

Koefisien konversi Kerma ke dosis ekuivalen ambien yang digunakan adalah 1,20 Sv/Gy [3, 4]. Ketidakpastian yang dilaporkan berdasarkan pada ketidakpastian standar dikalikan dengan faktor cakupan $k = 2$, dengan tingkat kepercayaan 95 %.

Tabel 4 Anggaran Ketidakpastian untuk Kalibrasi AUR Tingkat Proteksi (*Dose-Rate Meter*) Menggunakan Berkas ¹³⁷Cs [10]

Besaran	Nilai	U	Distr	Pembagi	$\delta f/\delta x/y$	c_i/y	$u_i(y), \%$	v_{eff}
Laju dosis ekuivalen ambien pada 3460 mm, H	30 μ Sv/h	0,9 μ Sv/h	N	2	1/H	100/30	1,50	~
Bacaan rerata monitor, M	31 μ Sv/h	0,9 μ Sv/h		1	$(M_s - M_B)^{-1}$	100/30	3,0	9
Ketidakpastian Parallax,	---	2 %		$\sqrt{3}$	$M/(M - M_B)$	31/30	1,2	~
Bacaan rerata backgroun, M _B	1,0 μ Sv/h	0,3 μ Sv/h	N	2	$(M_s - M_B)^{-1}$	100/30	0,5	19
Ketidakpastian Parallax,	---	2 %		$\sqrt{3}$	$M_B/(M - M_B)$	1/30	<0,01	~
Ketdkseragaman berkas, F _{nu}	1,016	0,004	Rect.	$\sqrt{3}$	1/F _{nu}	100/1,01	0,23	~
Hamburan ruang, F _{room}	0,981	0,005	Rect.	$\sqrt{3}$	1/F _{room}	100/0,97	0,30	~
Hamburan penyangga, F _{sm}	0,99	0,002	Rect.	$\sqrt{3}$	1/F _{scim}	100/0,99	0,12	~
Jarak: Posisi pusat efektif Jarak stand dari sumber	2 m	2mm 3mm	Rect.	$\sqrt{3}$	2/s 2/s	200/3460 200/3460	0,07 0,10	~ ~
Faktor kalibrasi, C _H	1,030		N			$u(C_H)$	3,62	19,1
Ketidakpastian bentangan (k=2), U	0,078		N			U	7,6	19

Derajat kebebasan efektif dihitung menggunakan rumus Welch-Satterthwaite

4.4 Anggaran Ketidakpastian untuk Kalibrasi AUR (*Dose-Rate Meter*)

Anggaran yang disajikan pada Tabel 4 mempunyai ketidakpastian besar karena bacaan monitor. Berdasarkan 10 pengamatan untuk berkas dan 20 untuk *background*, $u_s(y) = 3\%$, $u_B(y) = 0,5\%$, ketidakpastian standar gabungan: $u(y) = 3,62\%$, Angka efektif derajat kebebasan adalah:

$$v_{eff} = 3,62^4 / \{ (3^4/9) + (0,5^4/19) \} = 171 / \{ 9,0 + 0,03 \} = 19,1$$

Dari Tabel 2 faktor cakupan untuk derajat kebebasan 19 adalah 2,09. Ketidakpastian bentangannya adalah $U = 10,3\%$, untuk tingkat kepercayaan 95%.

AUR, salah satunya adalah *The Measurement Good Practice Guide No. 49* tahun 2003 [10]

- Pedoman tersebut berisi tentang pengukuran kerma udara, kalibrasi AUR tingkat proteksi dan penilaian ketidakpastiannya.
- Anggaran ketidakpastian untuk pengukuran kerma udara dan kalibrasi AUR tingkat proteksi, dianjurkan seperti yang disajikan pada Tabel 3 dan 4, dan ini bisa ditambah atau dikurangi, sesuai dengan kondisi pengukuran dan kemampuan di laboratorium tersebut.

5. KESIMPULAN

- Pedoman atau prosedur yang dapat diterima secara internasional untuk pengukuran kerma udara dan kalibrasi

DAFTAR PUSTAKA

- BIPM. IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, and OIML, (1993), *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, International Organisation for Standardization*, Genewa.

- Switzerland, 1 ed., Corrected and reprinted 1995 as BSI PD 6461: Part 3: 1995 Vocabulary of Metrology: Part 3: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.
- NAMAS Publication B0825, (1990), *The Expression of Uncertainty in Radiological Measurement*, edition I,.
- UKAS Publication M3003, (1997), *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement*, Edition I
- Peraturan Kepala BAPETEN No.1/2006 tentang Kalibrasi Alat Ukur Radiasi dan Keluaran Sumber Radiasi Terapi dan Standardisasi Radionuklida.
- International Atomic Energy Agency, (2007), *Technical Report Series No. 457, Dosimetry in Diagnostic Radiology: an International Code of Practice*, IAEA, Vienna
- , (2000), *Calibration of Radiation Protection Monitoring Instruments*, Safety Series No. 16, IAEA, Vienna
- ISO-4037: Part 1: 1996, X and Gamma Reference radiation for calibrating dosimeters and doseratemeters and for determining their response as a function of photon energy, Part 1: radiation characteristics and production methods.
- ISO-4037: Part 2: 1997, X and Gamma Reference radiation for calibrating dosimeters and doseratemeters and for determining their response as a function of photon energy, Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV.
- NPL Measurement Good Practice Guide No. 14: 1999, *The Examination, Testing and Calibration of Portable Radiation Protection Instrumens*.
- Lewis, V, Woods, Mj, Burges, P, Green, S, Simpson, J, And Wardle, J, (2003), *Measurement Good Practice Guide No. 49, The Assessment of Uncertainty in Radiological Calibration and Testing*, NPL