

## JAMINAN MUTU PENGUKURAN PESAWAT SINAR-X/ YXLON-MG325 UNTUK KALIBRASI ALAT UKUR RADIASI

Nazaroh, Assef Firmando Firmansyah, Gatot Wurdianto, dan Nurman Rajagukguk

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi, BATAN

email: nazaroh\_s@batan.go.id

email: firnando3154@gmail.com

### ABSTRAK

JAMINAN MUTU PENGUKURAN PESAWAT SINAR- X/YXLON-MG325 UNTUK KALIBRASI ALAT UKUR RADIASI. Jaminan mutu pengukuran adalah semua kegiatan pengukuran yang direncanakan dan sistematis, yang dibutuhkan untuk memberikan kepercayaan yang cukup bahwa suatu produk/jasa akan memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan. Tujuan jaminan mutu pengukuran adalah untuk memastikan agar hasil pengukuran memadai (traceable dan accurate) oleh karena itu seluruh proses pengukuran, komponen dan faktor pengaruh yang relevan harus diperhatikan, dipantau dan dikendalikan. Pesawat Sinar-X/MG325 adalah pesawat sinar-X yang memiliki potensial bipolar dengan daya 4,5 kW dan tegangan tabung maksimum 325 kV, sehingga mempunyai energi serta laju dosis cukup tinggi untuk berbagai keperluan seperti radiografi, radioskopi, scanning tomografi dan kalibrasi/uji. Untuk menjamin mutu pengukuran pesawat sinar-X/YXLON-MG325, telah dilakukan pengukuran homogenitas berkas menggunakan detektor Ionization Chamber (IC) 0,016 cm<sup>3</sup> yang dirangkai dengan electrometer PTW Unidose dan berkas homogen pada rentang  $r = \pm 8,75$  cm dari pusat berkas. Di samping itu, dilakukan penentuan linieritas pesawat menggunakan detector IC 2575C /#576 volume 600 cc yang dirangkai dengan electrometer PTW Unidose, dan diperoleh hasil linier, dengan koefisien korelasi,  $r = 1$ , dan selanjutnya dilakukan penentuan First dan Second HVL pada rentang tegangan tabung (60-200) kV, menggunakan detector IC volume 600 cc yang dirangkai dengan electrometer Keithley, dan diperoleh hasil, First HVL  $\rightarrow HVL(1) = 0,0274*(kV) - 1,5435$ ,  $r = 0,996$ , Second HVL  $\rightarrow HVL(2) = 0,056*(kV) - 3,1375$ ,  $r = 0,996$ . Pada makalah ini disajikan pengukuran output pesawat Sinar-X/YXLON-MG325 pada  $N(80)$ ,  $I = 20$ mA,  $FOC = 5,5$  mm pada  $SDD = 200$  cm, dalam satuan: a. Laju kerma udara,  $K_a$ , diperoleh  $(335,1 \pm 3,9\%) \square \square$  Gy/menit, b. Laju dosis ekivalen perorangan,  $H_p(10)$  diperoleh  $(630 \pm 4\%) \square \square$  Sv/menit.

Kata kunci: jaminan mutu, pesawat Sinar-X/YXLON-MG325, kalibrasi/uji

### ABSTRACT

QUALITY ASSURANCE OF MEASUREMENT OF X-RAY SYSTEM/ YXLON-MG325 FOR CALIBRATION OF RADIATION MEASURING INSTRUMENT. Quality assurance of measurements is all of the planned activities and systematic measurements, which is needed to provide adequate confidence that a product / service will meet the quality requirements specified. The objective of measurement quality assurance is to ensure that results of measurement was adequate (traceable and accurate), so that the entire measurement process, components and relevant factors that influence should be considered, monitored and controlled. X-ray /YXLON- MG325 is an X-ray that has a bipolar potential with power 4.5 kW and a maximum tube voltage of 325 kV so as to have the energy and the dose rate that is high enough for various purposes such as radiography, radioscopy, scanning tomography and for calibration / test. To ensure the quality measurements on the X-ray / YXLON-MG325, it has been carried out beam homogeneity measurement using an Ionization Chamber detector (IC) 0.016 cm<sup>3</sup> coupled with Unidose PTW electrometer and the beam was homogen, in the range of  $\pm 8.75$  cm. Besides that, the linearity determination was done using an IC detector 2575C / # 576, volume 600 cc coupled with Unidose PTW electrometer, and the result was linear, with correlation coefficient,  $r$  was 1. Determination of the first and second HVL in the energy range of (60-200) kV, using an IC detector volume 600 cc coupled with a Keithley electrometer, and the result was: First HVL,  $Y = 0.0274x - 1.5435$ ,  $r = 0.996$ , Second HVL,  $Y = 0.056x - 3.1375$ ,  $r = 0.996$ . In this paper was presented output measurement of X-ray/YXLON-MG325 at  $N(80)$ ,  $I = 20$ mA,  $FOC = 5.5$  mm, in term of air Kerma rate,  $K_a$ , was  $(335.1 \pm 3.9\%) \mu$ Gy/minutes, and in term of personal dose equivalent,  $H_p(10)$  was  $(630 \pm 4\%) \mu$ Sv/minutes

Keywords: quality assurance, the X-ray/YXLON-MG325, calibration/irradiation.

### PENDAHULUAN

Penggunaan pesawat sinar-X secara terus menerus untuk keperluan kalibrasi alat ukur radiasi (AUR) atau pengujian suatu bahan dapat menurunkan performa kinerja pesawat tersebut. Untuk

memastikan bahwa pesawat tersebut dalam kondisi stabil atau masih dalam rentang toleransi yang diizinkan maka perlu jaminan mutu/langkah-langkah yang harus dilakukan agar dapat menjamin mutu hasil pengukurannya.

Pesawat Sinar-X/MG325 adalah suatu sistem pesawat sinar-X yang memiliki potensial bipolar dengan daya 4,5 kW dan tegangan maksimum 320 kV, oleh karena itu mempunyai energi serta laju dosis yang cukup tinggi dan bervariasi untuk berbagai keperluan, diantaranya untuk radiografi, radioskopi, untuk *scanning* tomografi dan juga digunakan di bidang dosimetri (untuk kalibrasi/uji). Pesawat ini dioperasikan menggunakan *control system* pada unit kontrol MGC41 [1].

Pada makalah ini disajikan jaminan mutu pengukuran pada pesawat sinar-X/YXLON MG325 untuk kalibrasi alat ukur radiasi (AUR). Untuk menjamin mutu pengukuran pada pesawat Sinar-X/YXLON-MG325, harus dilakukan langkah-langkah berikut :

- a. Alat standar harus terkalibrasi/tertelusur
- b. Pengecekan stabilitas alat standar
- c. Pemeliharaan pesawat sinar-X
- d. Pengukuran homogenitas berkas
- e. Pengujian kelinieran pesawat
- f. Penentuan HVL dan Second HVL
- g. Pengukuran output

Langkah awal untuk menjamin mutu pengukuran adalah melakukan kalibrasi alat standar yang digunakan untuk pengukuran agar tertelusur ke satuan internasional (SI). Di samping harus dikalibrasi, alat standar harus dilakukan pengecekan stabilitas dalam rentang waktu kalibrasi. Hal ini untuk mengetahui adanya penyimpangan pengukuran, apabila alat standar mengalami kerusakan karena terjatuh, terbentur atau karena faktor lainnya.

Sesuai dengan petunjuk operasional Pesawat sinar-X, pesawat sinar-X harus digunakan dan dirawat sesuai buku petunjuk operasionalnya agar keluarannya stabil sesuai dengan spesifikasinya.

Pengukuran homogenitas berkas pesawat sinar-X dimaksudkan untuk mengetahui seberapa lebar lapangan radiasi yang homogen, yang dibentuk oleh berkas sinar-X pada jarak tertentu.

Pengujian kelinieritas pesawat dimaksudkan untuk mengetahui apakah pesawat stabil dalam memberikan penyinaran singkat atau penyinaran yang lebih panjang (lama) sesuai dengan spesifikasi yang diberikan.

Penentuan *First* dan *second* HVL pada pesawat sinar-X/YXLON-325 dimaksudkan untuk mendapatkan informasi, berapa tebal filter/layer yang diperlukan untuk membuat *output* pesawat tersebut menjadi separuhnya atau seperempatnya pada kondisi tegangan tabung tertentu.

Tujuan jaminan mutu pada pelaksanaan kalibrasi/uji adalah untuk memastikan kesesuaian *Standard Operating Procedure* (SOP) ini dengan Panduan Induk [2], memastikan SOP ini dapat dilaksanakan (operasional), memeriksa kesesuaian rumusan SOP ini dengan pelaksanaannya, dan memastikan dengan perkembangan standar/peraturan

perundang-undangan, kebutuhan terkini dalam kegiatan litbang/layanan.

*Standard Operational Procedure* (SOP) adalah serangkaian instruksi tertulis yang dibakukan mengenai berbagai proses penyelenggaraan aktivitas organisasi, bagaimana dan kapan harus dilaksanakan, dimana dan oleh siapa dilakukan.

SOP Teknis adalah prosedur standar yang sangat rinci dari kegiatan yang dilakukan oleh satu orang aparatur atau pelaksana dengan satu peran atau jabatan.

Berdasarkan SNI-ISO/IEC-17025:2008 [3] "*General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*" chapter 5.9 on *assuring the Quality of Test and Calibration Results*" requires : *The laboratory shall have quality control procedures for monitoring the validity of test and calibration undertaken, the resulting data shall be recorded in such away that trends are detectable and where practicable, statistical techniques shall be applied to the reviewing of the results. This monitoring shall be planned and reviewed and may include, but not limited to:*

- a. *Regular use of certified reference material*
- b. *Participation in inter-laboratory comparison*
- c. *Replicate tests or calibration using the same /different methods*
- d. *Retesting/recalibrating of retained items*
- e. *Correlation of results for different characteristics of an item.*

## TATA KERJA

Jaminan mutu adalah semua kegiatan yang direncanakan dan sistematis yang dibutuhkan untuk memberikan kepercayaan yang cukup bahwa suatu produk/jasa akan memenuhi persyaratan mutu yang ditetapkan [4].

Jaminan mutu pengukuran adalah proses untuk memastikan hasil pengukuran yang memadai, yang meliputi:

- Penggunaan prinsip desain pengukuran yang baik sehingga seluruh proses pengukuran, komponen dan faktor pengaruh yang relevan dapat ditandai dipantau dan dikendalikan.
- Karakterisasi pengukuran, yang meliputi ketidakpastian proses pengukuran, termasuk variasi statistik, kontribusi dari semua faktor yang diketahui, atau faktor yang dicurigai dapat mempengaruhi, ketidakpastian tipe B dan ketidakpastian tipe A selama proses pengukuran.
- Secara kontinu memantau kinerja dan melakukan kontrol statistik proses pengukuran dengan teknik pengendalian proses statistik yang *proven*, meliputi pengecekan alat standar.

Alat standar yang akan digunakan untuk pengukuran harus terkalibrasi/tertelusur ke sistem satuan internasional (SI) agar hasil pengukurannya diakui dan akurat (dalam rentang toleransi yang

diizinkan). Rentang waktu kalibrasi alat standar di setiap laboratorium berbeda-beda, sesuai dengan kebijakan di setiap instansi.

Definisi kalibrasi dapat kita peroleh dari berbagai referensi. Menurut LEWIS, *et.al*, dalam *The Measurement Good Practice Guide No. 49, The Assesment of Uncertainty in Radiological Calibration an Testing*, 2003 [5], *Calibration is Procedure to establish a quantitative relation between the response of an instrument and the quantity to be measured*. (Kalibrasi adalah Prosedur untuk menetapkan hubungan kuantitatif antara respon instrumen dan besaran yang akan diukur).

Tujuan kalibrasi adalah untuk menentukan nilai faktor kalibrasi alat ukur radiasi (AUR)/dosimeter dan menentukan dosis serap agar tertelusur ke standar nasional/internasional [6].

Nilai hasil pengukuran, tidak lengkap tanpa pernyataan ketidakpastian,  $U$  yang dievaluasi. Ketidakpastian ini menunjukkan bahwa rentang nilai benar, diperkirakan terletak di antara tingkat kepercayaan yang diberikan. Nilai ukur ditentukan sebagai fungsi  $f(x_i)$ , dari parameter input,  $x_i$  yang harus diketahui, diukur atau diperkirakan.

Ketidakpastian pengukuran adalah kombinasi dari ketidakpastian yang timbul dari besaran input. Tidak ada metode yang secara mendasar "benar" tentang ketidakpastian kombinasi, tetapi prosedur yang dapat diterima secara internasional adalah *ISO/KAN Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* [7].

Peralatan yang diperlukan untuk melaksanakan jaminan mutu pengukuran pesawat Sinar-X/YXLON MG325 adalah :

- Pesawat Sinar-X YXLON/MG325 (Gambar 1)
- Calibrated IC 600 cc Farmer #135 + electrometer Keithley 6487 (Gambar 2)
- Calibrated IC 600 cc/2575C#576 + Electrometer PTW Unidose (Gambar 3)
- IC : 0,016 cc + electrometer PTW Unidose (Gambar 3)
- Monitor chamber
- Meteran, hygrometer, thermometer, barometer (Gambar 4)
- Filter Cu

Komponen utama Pesawat Sinar-X/YXLON-MG325 terdiri dari :

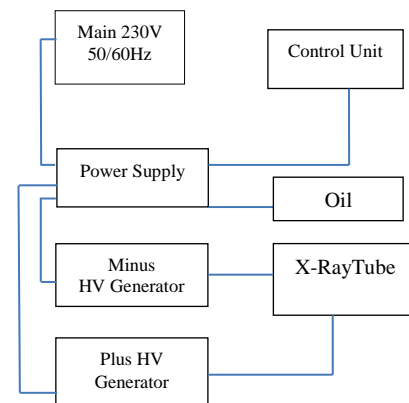
- Tabung sinar-X model Y.TU 320-D03, tipe 9421 12 32203/ dengan Serial Number S/N : 60-2594, 320 kV
- Power Supply Model MGP41 (4,5 kW).
- High Voltage Generator model MGG 42(-) dan Model MGG 43 (+)
- Oil Cooler Model OL4502
- Control Unit/ Model MGC41

Spesifikasi teknis Pesawat Sinar X YXLON MG325:

- Daya maksimum : 4500 W

- Tegangan tinggi : 15-320 kV, *increment* 0,2 kV/step, *accuracy*  $\pm 1\%$
- Arus tabung : 0-22,5 mA, *increment* 0.05 mA/step, *accuracy* 2 %
- Sumber tegangan : 230 V AC, 50/60 Hz
- *Exposure time* : 1 detik – 99 menit.
- Kelengkapan : *control unit*
- Filter *inheren* " 3 mmBe + 3 mm Al+ 0,5 mm Cu.
- Pada *control unit* MGC41 terdapat tombol-tombol kV, mA, foc, *exposure time*, dan *rotary switch*, *pre-warning lamp*, *flashing warning lamp* (yellow dan red), *stand-by lamp*, *X-ray on*, *X-rayoff* dan *main-switch*.
- Tabung X-ray YXLON MG325 terbuat dari bahan *metal-ceramic*, dengan dimensi tabung: 624 x 374x 394 mm, dan berat tabung : 80 kg. *Country of Origin* : Switzerland-Germany.

Diagram balok pesawat sinar-X/YXLON-MG325 disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Diagram balok rangkaian pesawat sinar-X/YXLON



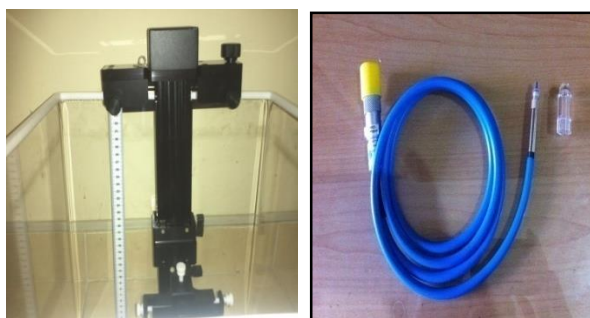
**Gambar 2.** Calibrated IC 600 cc Farmer#135 dan electrometer Keithley 6487



**Gambar 3.** Calibrated IC 600 cc 2575C#576 dan electrometer PTW unidose



Gambar 4. Alat ukur suhu, tekanan dan kelembaban



Gambar 5. Alat pengatur posisi dan detektor 0,016 cc



Gambar 6. Control unit pesawat sinar-X/YXLON-MG325/Model MGC41

## Prosedur operasi

Pengaturan kV, mA, fokus dan *exposure time* dapat dilakukan dengan langkah berikut:

1. Menekan "control" bersamaan dengan tombol parameter yang diinginkan, contoh : apabila parameter yang dimasukkan lebih tinggi dari rentang alat, maka nilai tertinggi yang tertampil. Sebaliknya jika parameter yang dimasukkan lebih rendah dari rentang alat, maka rentang yang paling rendah yang tertampil.
2. Untuk pengaturan mA, *focus* dan *exposure time* dapat dilakukan sama seperti langkah di atas.

Untuk mengoperasikan pesawat sinar-X, dapat dilakukan langkah yaitu *key switch* diputar ke posisi ON, lampu hijau menyala. Pastikan parameter sinar-X sudah di-setting, kemudian tombol ON ditekan, maka lampu *pre-warning* akan menyala. Setelah lampu *pre-warning* mati, lampu *flashing* menyala, sinar-X akan *expose* sesuai dengan *setting* dan Sinar-

X akan OFF secara otomatis sesuai *setting* waktu. Apabila *setting* waktu *infinite*, tekan tombol OFF untuk *shut-down*. Minimal *cooling down* 3 menit untuk *exposure* berikutnya.

Khusus untuk mengubah *focal spot, high voltage* harus pada kondisi OFF. Dengan menekan tombol hitam, Sinar-X siap dioperasikan. Lampu *Pre-warning* akan menyala. Setelah lampu *pre-warning* mati, lampu *flashing* menyala, Sinar-X akan *expose* sesuai dengan *setting* yang telah diatur. Unit kontrol panel MGC41 disajikan pada Gambar 6.

## Pemanasan sinar-X

Kabel *power* pesawat sinar-X dihubungkan dengan PLN. Kunci kontrol diputar dari posisi 0 ke posisi ~, maka *display* akan menyala. Pilih 0 atau 1.0 berarti tidak dilakukan pemanasan, dan 1 berarti dilakukan pemanasan. Masukkan jumlah hari dari terakhir pesawat dimatikan sampai hari pesawat akan dinyalakan. Tekan F1 untuk memilih tegangan yang akan dinyalakan. Pilih tegangan tertinggi 320 kV. Putar kunci ke posisi ~. Putar kunci dari posisi ~ ke posisi √. Tekan tombol warna hitam, Pesawat Sinar-X mulai pemanasan.

## Pengoperasian pesawat sinar-X/YXLON-MG325

Tegangan pesawat sinar-X (kV) diatur dengan memutar *switch* pada kontrol unit/MGC41 (Gambar 6), kekiri/kekanan sesuai yang dikehendaki, lalu tekan kV lagi. Kuat arus (mA), diatur dengan menekan tombol mA, kemudian *switch* diputar kekiri/kekanan sesuai yang dikehendaki. Pemilihan Foc, hanya ada 2 pilihan, yaitu 3 mm atau 5,5 mm. Pengaturan waktu penyinaran dengan menekan tombol *expose time*, lalu diatur waktunya, kemudian tekan *expose time* lagi. Untuk menyalakan *shutter*, dengan memutar kunci ke kanan, atur lamanya *shutter* terbuka dengan menekan F1 pada panel *shutter* lalu tekan *enter*, masukkan waktu yang diinginkan dan tekan *enter* lagi. Tekan tombol I warna hitam, jika ingin mematikan dengan segera. Sewaktu penyinaran dilakukan, ada indikator lampu, lampu kuning menyala sejenak, berarti persiapan penyinaran dan bila lampu merah menyala maka penyinaran sedang berlangsung. Untuk mematikan, putar kunci ke kiri secara perlahan.

Sebelum digunakan untuk pengukuran, semua peralatan yang akan digunakan untuk pengukuran harus terkalibrasi, baik peralatan utama maupun peralatan pendukung. Tujuannya agar hasil pengukuran tertelusur ke sistem internasional melalui sistem nasional. Alat utama yang digunakan untuk pengukuran output pesawat sinar-X adalah IC 600 cc/2575C/#576 yang dikalibrasi setiap 5 tahun sekali di *Secondary Standard Dosimetry Laboratory* (SSDL)-IAEA. Selama antar waktu 5 tahun dilakukan cek stabilitas agar diketahui dalam rentang tersebut tidak ada perubahan yang berarti. Cek

stabilitas alat dilakukan sebelum melakukan pengukuran, tegangan kerja detektor -250V, sumber pengecek 90Sr. Pada Tabel 1, disajikan data cek stabilitas detektor IC 600 cc 2575C/#576 dari waktu ke waktu. Kondisi suhu ruangan yang diperbolehkan dalam penggunaan pesawat sinar-X adalah sampai dengan 40°C, kelembaban (*humidity*) maksimum : 90% pada suhu 40°C, tekanan udara 700 – 1100 Pa.

### Pengukuran homogenitas berkas/lapangan radiasi

Pesawat sinar-X dipanaskan sesuai dengan petunjuk pengoperasian pesawat sinar-X. Pada pengujian homogenitas berkas/lapangan radiasi pesawat sinar-X ini, tegangan tinggi dipasang pada 160 kV, kuat arus 20 mA, dan *Foc* 5,5 mm. Untuk pengukuran homogenitas berkas/lapangan radiasi digunakan detektor 3D-chamber tipe 31016, volume 0,016 cm<sup>3</sup>, yang terbuat dari elektrode aluminium, dengan *long-term stability* :  $\leq 1\%$ /tahun. Tegangan chamber : 400 V. Dapat digunakan untuk pengukuran di air, udara dan *phantom* padat. Dirangkai dengan elektrometer PTW unidose. Detektor diletakkan pada SDD 200 cm pada posisi 0, di muka pesawat sinar-X dengan bantuan laser dan teleskop. Pengambilan data dilakukan pada titik 0 (central);  $\pm 2,5$ ;  $\pm 5$ ;  $\pm 7,5$ ;  $\pm 10$ ;  $\pm 12,5$  dan  $\pm 15$  cm, pada arah vertikal, pada  $V = 160$  kV,  $I = 20$  mA,  $Foc = 5,5$  mm. Hasil pengukuran homogenitas berkas/lapangan radiasi pesawat sinar-X/MG325 disajikan pada Gambar 7.

### Pengujian Kelinieritasan Pesawat Sinar-X

Untuk mengetahui kelinieritasan pesawat sinar-X YXLON /MG325 dilakukan pengukuran pada berbagai variasi waktu pengukuran. Pada pengukuran kelinieritasan ini pesawat di-*setting* pada N(80), dengan *added filter* 2, 028 mmCu, kuat arus 20 mA dan FOC : 5,5mm dan HVL 0,59 mmCu, Detektor yang digunakan untuk pengukuran ini adalah *calibrated ionization chamber* volume 600 cc/NE 2571/576, dengan cap A, faktor kalibrasi  $N_k$  :  $(43,25 \pm 0,52)$   $\mu\text{Gy/nC}$ . Hasil pengujian kelinieritasan disajikan pada Gambar 8.

### Pengukuran Half Value Layer (HVL)

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 60 kV (yang setara dengan energi 48 keV), digunakan *added filter* 0,69 mmCu, kuat arus 5 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada pengukuran HVL ini digunakan detektor *Ionization Chamber* (IC) 600 cc *Farmer* #135 yang dirangkai dengan elektrometer Keithley 6487. Pada pengukuran ini digunakan layer Cu mulai dari 0 sampai dengan 0,6 mmCu, dengan penambahan 0,025 mmCu pada setiap pengukurannya dan diperoleh *first HVL* : 0,24 mmCu dan *second HVL* : 0,506 mmCu. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 9.

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 80 kV (yang setara dengan energi 65 keV), digunakan *added filter* 2,028 mmCu, kuat arus 5 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada penentuan HVL ini digunakan alat yang sama dengan penentuan HVL pada tegangan tabung 60kV. Pada penentuan HVL ini digunakan layer Cu mulai dari 0 sampai dengan 1,5 mmCu, dengan penambahan 0,05 mmCu pada setiap pengukuran dan diperoleh *first HVL*: 0,59 mmCu dan *second HVL* : 1,23 mmCu. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 10.

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 100 kV (yang setara dengan energi 83 keV), digunakan *added filter* 5,152 mmCu, kuat arus 5 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada penentuan HVL ini digunakan alat yang sama dengan penentuan HVL pada tegangan tabung 80kV. Pada pengukuran ini digunakan layer Cu mulai dari 0 sampai dengan 2,821mmCu, dengan penambahan 0,1 mmCu pada setiap pengukuran. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 11.

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 120 kV (yang setara dengan energi 100 keV), digunakan *added filter* 5mmCu+1mmSn, kuat arus 10 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada penentuan HVL ini digunakan alat yang sama dengan penentuan HVL pada tegangan tabung 100kV. Pada penentuan HVL ini digunakan layer Cu mulai dari 0 sampai dengan 3,99mmCu, dengan penambahan 0,19 mmCu, pada setiap pengukuran. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 12.

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 150 kV (yang setara dengan energi 118 keV), digunakan *added filter* 1mmCu+2mmSn, kuat arus 10 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada penentuan HVL ini digunakan alat yang sama dengan penentuan HVL pada tegangan tabung 100 kV. Pada penentuan HVL ini digunakan layer Cu mulai dari (0 sampai dengan 5,75) mmCu, dengan penambahan 0,25 mmCu pada setiap pengukuran. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 13.

Pengukuran HVL pada tegangan tabung 200 kV (yang setara dengan energi 164 keV), digunakan *added filter* 2 mmCu + 3 mmSn, 1 mmPb. Kuat arus 12 mA, dan FOC 5,5 mm. Pada penentuan HVL ini digunakan alat yang sama dengan penentuan HVL pada tegangan tabung 150 kV. Pada penentuan HVL ini digunakan layer Cu mulai dari 0-9,5mmCu, dengan penambahan 0,5 mmCu pada setiap pengukuran. Hasil pengukuran disajikan pada Gambar 14.

Hasil penentuan *first* dan *second HVL* pada rentang energi (60-200) kV, hasilnya disajikan pada Gambar 15.

### Pengukuran output

Pada makalah ini disajikan contoh pengukuran output/keluaran pesawat sinar-X YXLON/MG325 pada N(80) dengan *added filter* 2,028 mmCu, kuat arus 20 mA, FOC : 5,5mm, dengan dan tanpa HVL

0,59 mmCu (Tabel 2). Detektor yang digunakan untuk pengukuran output adalah *calibrated ionization chamber* volume 600 cc/NE 2571/576, dengan cap A, faktor kalibrasi  $N_k : (43,25 \pm 0,52) \square \text{Gy/nC}$ . Pengukuran output atau laju kerma udara,  $K_a$ , dilaksanakan pada 7 April 2016. Hasil pengukuran laju kerma udara,  $K_a$  menggunakan persamaan (1):

$$K_a [\mu\text{Gy} / \text{menit}] = M \times K_{PT} \times N_k \quad (1)$$

$N_k$  : faktor kalibrasi ( $\square \text{Gy/nC}$ )

$M$  : bacaan alat standar (nC/menit)

$K_{PT}$  : faktor koreksi (tekanan dan suhu)

$$K_{PT} = \left[ \frac{273,15 + T}{273,15 + T_o} \right] \left[ \frac{P_o}{P} \right] \quad (2)$$

$T$  : Suhu udara saat pengukuran

$T_o$  : suhu udara acuan ( $20^\circ\text{C}$ )

$P$  : Tekanan udara saat pengukuran

$P_o$  : Tekanan udara acuan (1013,25 mBar)

$$H_p(10) [\square \text{Sv/menit}] = h * K_a \quad (3)$$

$H_p(10)$  : Laju dosis ekuivalen perorangan [ $\mu\text{Sv/menit}$ ]

$h$  : Factor konversi [ $\text{Gy/Sv}$ ], bergantung energi,  $E$ , dan arah sudut datang radiasi.

Pada Tabel 2 disajikan hasil pengukuran *output* tanpa HVL dan dengan HVL.

### Kalibrasi Alat Ukur Radiasi

Untuk melakukan kalibrasi AUR, Alat ukur standar (detektor IC 600 cc) diletakkan pada SDD 200 cm, dihubungkan dengan elektrometer PTW Unidose. PTW Unidose di *ON*-kan dan tegangan kerja detektor dinaikkan sesuai SOP, biarkan beberapa menit agar elektrometer stabil dan siap melakukan pengukuran. Pengambilan data dilakukan sebanyak 5X, untuk mendapatkan hasil rata-rata pengukuran. Gunakan persamaan (1) untuk menghitung laju dosis ekuivalen ambien,  $H^*(10)$  dan gunakan persamaan (1) dan (2) untuk mendapatkan laju dosis ekuivalen perorangan,  $H_p(10)$ .

Alat standar dipindahkan dan diganti dengan AUR yang akan dikalibrasi. Letakkan AUR pada posisi yang sama dengan alat standar, kemudian disinari. Catat data dan pengambilan data dilakukan sebanyak 5X, untuk mendapatkan hasil rata-rata pengukuran. Rasio antara bacaan alat standar dengan bacaanalat yang dikalibrasi adalah faktor kalibrasi (FK). Faktor kalibrasi ini harus dikalikan untuk mendapatkan hasil pengukuran yang benar/tertelusur. Bstd ; Bacaan standar, BAUR : Bacaan AUR yang dikalibrasi. Setelah selesai kalibrasi/penyinaran, AUR dan alat standar disimpan ditempat penyimpanan.

$$FK = \frac{B_{std}}{B_{AUR}} \quad (4)$$

### Penentuan Ketidakpastian Pengukuran

Pada Tabel 3, tersedia penentuan ketidakpastian pengukuran *output* pesawat sinar-X/YXLON-MG325. Sumber ketidakpastian meliputi: ketidakpastian tegangan tabung ( $u_{KV}$ ), arus tabung ( $u_{arus}$ ), faktor kalibrasi alat standar ( $u_{Nk}$ ), stabilitas alat standar ( $u_{stb}$ ), bacaan alat standar, ( $u_A$ ), resolusi alat standar ( $u_{res}$ ), ketidakpastian kalibrasi suhu ( $u_{kal-suhu}$ ), resolusi suhu ( $u_{res-suhu}$ ), ketidakpastian barometer ( $u_{kal-bar}$ ), ketidakpastian resolusi barometer ( $u_{res-bar}$ ), ketidakpastian kalibrasi meteran dan resolusi meteran ( $u_{kal-meter}$ ) dan  $u_{res-m}$ , ketidakpastian homogenitas berkas ( $u_{hom}$ ), dan ketidakpastian faktor konversi ( $u_{rkon}$ ).

Ketidakpastian gabungan diperoleh dengan menggunakan persamaan  $u_c = \sqrt{\sum (c_i u_i)^2}$ , dan ketidakpastian bentangan diperoleh dengan persamaan,  $u_{exp} = k \cdot u_c$ ,  $k$  : faktor cakupan, pada *Confidence Level 95%*.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

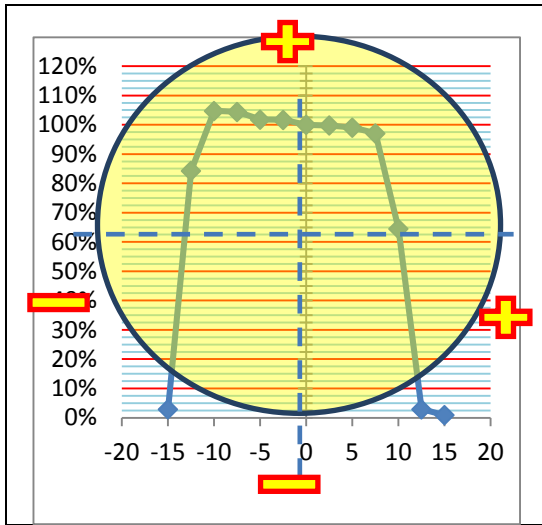
Pada Tabel 1. disajikan data cek stabilitas detektor IC 600 cc 2575C/#576 dari tahun 2013-2016. Stabilitas detektor dari waktu ke waktu diberikan toleransi  $\pm 1\%$ . Apabila perbedaan antara bacaan referensi dan hasil cek stabilitas detektor memiliki deviasi (perbedaan) dalam rentang  $\pm 1\%$  maka detektor dianggap stabil, tetapi apabila deviasi cek stabilitas  $> \pm 1\%$  perlu dicari penyebabnya, apakah kondisi pengukuran belum sesuai dengan standar pengukuran atau mungkin alat sudah mulai *aging* atau ada kerusakan.

**Tabel 1.** Data cek stabilitas detector IC 600 cc 2575C/#576 dari tahun 2013-2016.

No.	Tanggal	Data (nC)	Bias (%)
1	3 Jan. 2013	1,559	0
2	29 Sep. 2014	1,480	0,247
3	10 Apr. 2015	1,465	-0,742
4	10 Apr. 2015	1,461	-0,996
5	19 Feb. 016	1.442	-0,260

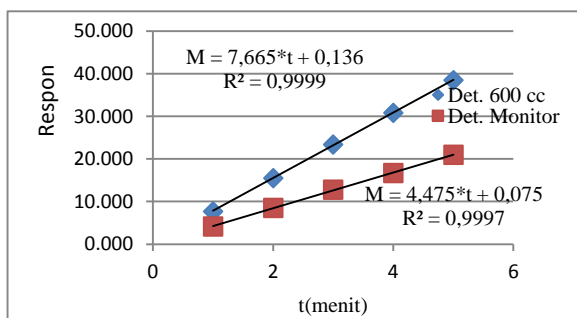
Luas lapangan radiasi/homogenitas berkas pesawat sinar-X/YXLON MG325 pada pengamatan ini, yang dilakukan pada SDD 200 cm, diperoleh  $r$  (jari-jari) 8,75 cm atau  $D$  (diameter) = 17,5 cm (Gambar 7) pada arah vertikal. Pada arah horizontal belum dilakukan pengukuran, namun asumsinya akan mendapatkan hasil yang relatif sama, sehingga akan diperoleh luasan lapangan radiasi ( $\Pi r^2$ ). Artinya bahwa pada luasan/diameter tersebut berkas radiasi homogen sehingga apabila menyinari sampel/alat

yang akan dikalibrasi tidak boleh melebihi lapangan tersebut agar hasilnya akurat. Luas lapangan radiasi ini akan semakin besar bila *Source Detector Distance* (SDD) diperbesar, sebaliknya lapangan radiasi akan lebih sempit apabila SDD semakin dekat. Pengaturan SDD ini bergantung kebutuhan/sesuai SOP.

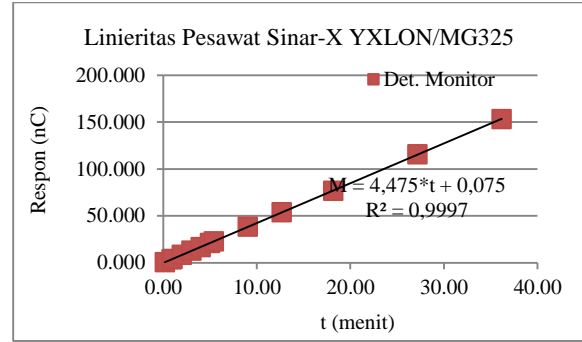


Gambar 7. Homogenitas berkas

Pada pengujian kelinieritasan pesawat Sinar-X dilakukan penyinaran pada beberapa variasi waktu pengukuran, mulai dari penyinaran selama 1 menit hingga 5 menit (Gambar 8a.) dan 1-40 menit (Gambar 8b). Dari berbagai variasi waktu penyinaran ini, ternyata kondisi penyinaran pesawat sinar-X tersebut stabil terbukti dari hasil pembacaannya, M (nC) linier terhadap waktu penyinaran, sebanding dengan persamaan  $M(nC) = 7,665 * t$  (menit) + 0,136. Dari spesifikasi alat ini, mampu melakukan penyinaran hingga 99 menit. Pada pengamatan kelinieritasan alat ini, penulis menganggap sudah mewakili, karena sudah 40% dari kemampuan alat.

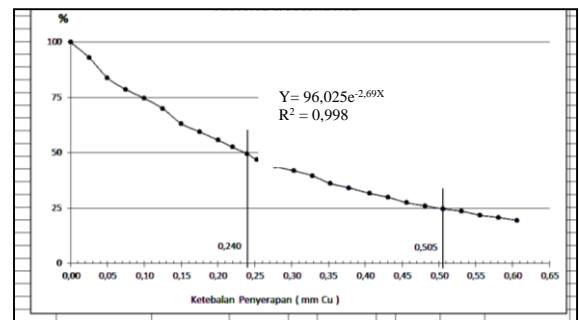


Gambar 8a. Linieritas pesawat sinar-X YXLON /MG325 (1-5 menit)

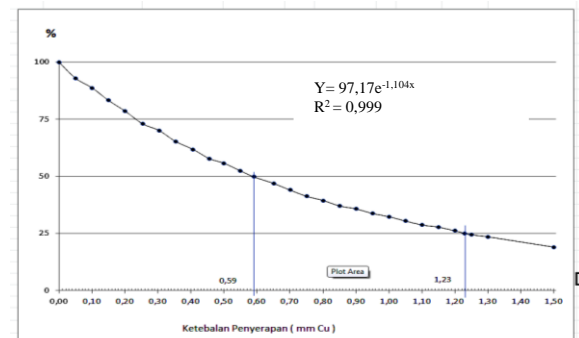


Gambar 8b. Linieritas Pesawat Sinar-X YXLON /MG325 (1- 40 menit)

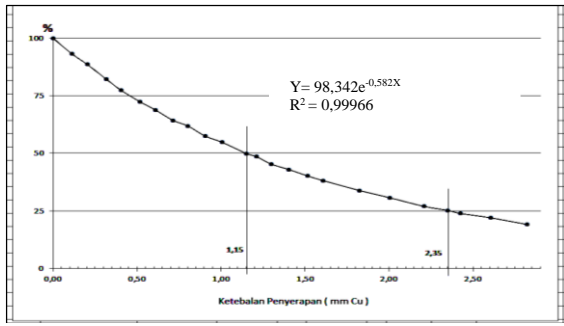
Pada penentuan *First* dan *Second HVL* pada energi (60-200) kV, diperoleh hasil pada Gambar 9 sampai dengan Gambar 14. Tujuan penentuan *First* dan *Second HVL* ini dapat dimanfaatkan untuk mendapatkan nilai *output* separuh dan seperempat dari *output* yang diinginkan, yang dapat dimanfaatkan untuk kalibrasi/penyinaran AUR atau sampel sesuai dengan kapasitasnya. Pada Gambar 15 disajikan *first* dan *second HVL* pada rentang (60-200) kV.



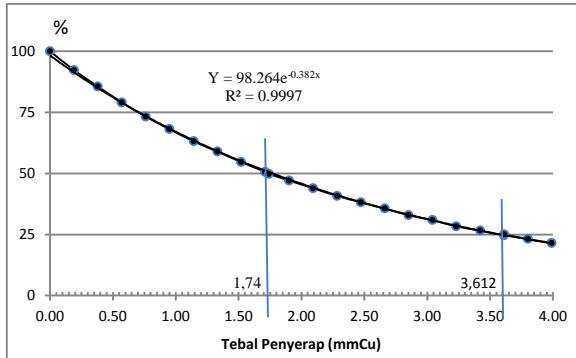
Gambar 9. Penentuan *first* dan *second HVL* pada tegangan tabung 60 kV



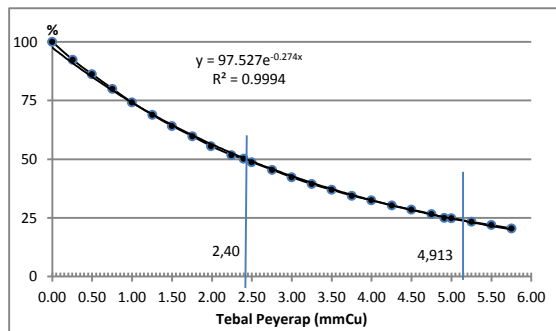
Gambar 10. Penentuan *first* dan *second HVL* pada tegangan tabung 80 kV



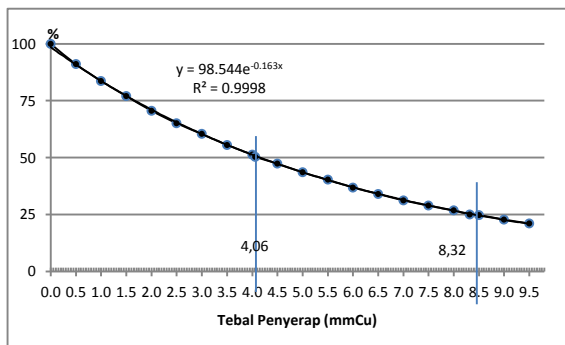
Gambar 11. Penentuan *first* dan *second* HVL pada tegangan tabung 100 kV



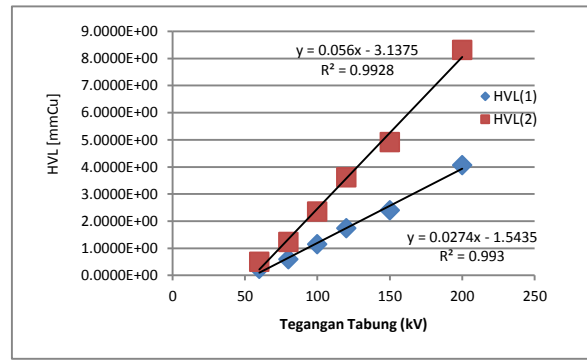
Gambar 12. Penentuan *first* dan *second* HVL pada tegangan tabung 120 kV



Gambar 13. Penentuan *first* dan *second* HVL pada tegangan tabung 150 kV



Gambar 14. Penentuan *first* dan *second* HVL pada tegangan tabung 200 kV



Gambar 15. Kurva *first* dan *second* HVL pada rentang tegangan tabung (60-200) kV

Dengan menggunakan persamaan pada Gambar 15, kita dapat menentukan *first* dan *second* HVL Pesawat Sinar-X/YXLON-MG325 dalam rentang tegangan tabung (60-200) kV. Pengukuran *first* dan *second* HVL pada rentang ini, diperoleh hasil mengikuti persamaan berikut :

First HVL  $\rightarrow Y = 0,0274x - 1,5435, R^2 = 0,993$

Second HVL  $\rightarrow Y = 0,056x - 3,1375, R^2 = 0,993$

Tabel 2. Hasil pengukuran *output* Pesawat Sinar-X/ YXLON-MG325 pada kV (80), dengan *added filter* 2,028 mmCu, I: 20 mA, FOC : 5,5mm (tanpa dan dengan HVL)

P	T	H	Kpt	M*(nC)	M <sub>HVL</sub> *(nC)
1005	19,74	57	1,00852	7,716	3,863
1005	19,74	57	1,00852	7,727	3,929
1005	19,74	57	1,00852	7,724	3,865
1005	19,74	57	1,00852	7,850	3,864
1005	19,74	57	1,00852	7,722	3,878
			Rerata =	7,748	
			u <sub>A</sub> (%)	0,33	

Pada Tabel 2 disajikan hasil pengukuran *output* pesawat sinar-X/YXLON-MG325, dengan dan tanpa HVL pada tegangan tabung 80 kV, dengan *added filter* 2,028 mmCu, kuat arus 20 mA, FOC : 5,5 mm, tanpa HVL. Diperoleh rata-rata M\* = (7,748 ± 0,33%) nC/menit. Untuk menghitung *output* pesawat sinar-X pada 80 kV, digunakan N<sub>k</sub> = (43,25 ± 0,52) μGy/nC [Lampiran 1], sehingga diperoleh laju kerma udara, K<sub>a</sub> = (335,1 ± 3,9%) μGy/menit dan laju dosis ekivalen perorangan, Hp(10) = (630 ± 4%) μSv/menit karena faktor konversi pada 80 kV adalah 1,88 Sv/Gy [10], sedangkan untuk Hp(3) = (556,3 ± 4%) μSv/menit, karena faktor konversi pada 80 kV adalah 1,66 Sv/Gy [Lampiran 2].

Dengan menggunakan HVL, *output* pesawat sinar- X dapat diturunkan menjadi separuhnya. Diperoleh rata-rata M<sub>HVL</sub>\* = (3,878 ± 0,33%) nC/menit. Untuk menghitung *output* pesawat sinar-X pada tegangan tabung 80kV, digunakan N<sub>k</sub> = (43,25 ± 0,52) μGy/nC [Lampiran 1], sehingga diperoleh laju kerma udara, K<sub>a</sub> (167,7 ± 3,9%)



$\mu\text{Gy}/\text{menit}$ , dengan *Cofidence Level* 95%. Hasil pengukuran *output* pesawat sinar X dalam satuan laju kerma udara ini siap digunakan untuk kalibrasi AUR seperti *surveymeter* yang memiliki satuan [ $\mu\text{Gy}/\text{menit}$ ] atau [ $\text{mGy}/\text{jam}$ ], sedangkan untuk satuan laju dosis ekivalen ambien,  $H^*(10)$  [ $\text{mSv}/\text{jam}$ ], dikalikan faktor konversi,  $h$  [ $\text{Sv}/\text{Gy}$ ].

Untuk kalibrasi/penyinaran dosimeter saku atau *TLD-Badge*, digunakan *output* dalam satuan laju dosis ekivalen perorangan,  $H_p(10)$ , perhitungannya menggunakan persamaan (1,2 dan 3). Diperoleh  $H_p(10) = (315,3 \pm 4\%) \mu\text{Sv}/\text{menit}$ .

Untuk menghitung laju dosis ekivalen perorangan pada lensa mata,  $H_p(3)$  digunakan faktor konversi 1,66 Sv/Gy [lampiran 2] sehingga laju dosis,  $H_p(3)$  adalah :  $(278,4 \pm 4\%) \mu\text{Sv}/\text{menit}$ .

## KESIMPULAN

Pada setiap awal kalibrasi/uji perlu dilakukan jaminan mutu pengukuran untuk memastikan agar hasil pengukuran memadai.

Untuk menjamin pengukuran yang memadai pada pesawat sinar-X/YXLON325 diperlukan tahapan sebagai berikut;

- Alat standar harus terkalibrasi/tertelusur
- Pengecekan stabilitas alat standar
- Pemeliharaan pesawat sinar-X secara berkala
- Pengukuran homogenitas berkas
- Pengujian kelinieran pesawat
- Penentuan HVL dan Second HVL
- Pengukuran output
- Pada pengecekan stabilitas alat standar ini diperoleh hasil, dalam toleransi  $\pm 1\%$ .
- Pada pengecekan linieritas pesawat ini diperoleh hasil linier, dengan koefisien korelasi,  $r=1$  ( $R^2 = 0,9999$ ).
- Pengukuran *first* dan *second* HVL pada rentang energi (60-200) kV, diperoleh hasil mengikuti persamaan berikut :
  - *First* HVL  $\rightarrow Y = 0,0274x - 1,5435$ ,  $r = 0,996$

▪ *Second* HVL  $\rightarrow Y = 0,056x - 3,1375$ ,  $r = 0,996$

- *Output* pesawat Sinar-X/YXLON-MG325 pada tegangan tabung 80 kV,  $I = 20$  mA,  $\text{FOC} = 5,5$  mm, dalam satuan
- Laju kerma udara,  $K_a = (335,1 \pm 3,9\%) \mu\text{Gy}/\text{menit}$ .
- Laju dosis ekivalen perorangan,  $H_p(10) = (630 \pm 4,1\%) \mu\text{Sv}/\text{menit}$ .

## DAFTAR PUSTAKA

1. YXLON. Products, Y.MG325/452 *Universal Bipolar Constant Potential X-Ray System*, Switzerland.
2. Panduan Induk PTKMR-BATAN, PI 001.001/KN 09 06/KMR
3. SNI-ISO/IEC-17025:2008, "General Requirements For The Competence Of Testing And Calibration Laboratories"
4. Perka BATAN No. 12 Tahun 2013 tentang *Pedoman Penyusunan dan Pengendalian Standar Operasional Prosedur*.
5. Lewis, V., Woods, M., Burgess, P., Green S., Simpson, J, Wardle J., *Measurement Good Practice Guide No. 49, The Assesment of Uncertainty in Radiological Calibration an Testing*, 2003.
6. Prosedur Pelaksanaan Pengujian/Kalibrasi : SOP 020.002/OT 01.01/KMR
7. KAN-G-06, *KAN Guide on Measurement Assurance*, 2006.
8. KAN-Guide on the Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement, 2006.
9. KAN requirement on Implementation of ISO/IEC 17025 for Calibration Laboratory, 2008.
10. IAEA-Safety Standard, *Assessment of occupational Exposure Due to External Sources of Radiation*, Safety Guide No. RS-G-1.3, Vienna, 2000.

**Tabel 3.**Perhitungan Ketidakpastian Pengukuran Pada pengukuran *output* pesawat Sinar-X/YXLON-MG325

No.	Sumber ketidakpastian	Tipe	k	$u_i$ (%)	$c_i$	$c_i u_i$	$v_{eff}$	$ c_i u_i ^2$	$ c_i u_i ^4$	$ c_i u_i ^4/v_{eff}$	
1	$u_{HV} =$	B	2	1.00	1	0.50	100	0.25	0.06	6.3E-04	
2	$u_i =$	B	2	2.00	1	1.00	100	1.00	1.00	1.0E-02	
3	$u_{NK}$	B	2	0.60	1	0.60	100	0.36	0.13	1.3E-03	
4	$u_{stb}$	B	1	1.00	1	1.00	100	1.00	1.00	1.0E-02	
5	$u_{A(std)}$	A	1	0.33	1	0.33	30	0.11	0.01	4.0E-04	
6	$u_{Res (std)}$	A	1.73	0.01	1	0.01	100	0.00	0.00	3.2E-11	
7	$u_{resol-suhu}$	A	1.73	0.29	1	0.29	100	0.08	0.01	6.9E-05	
8	$u_{kal-suhu}$	B	2	0.50	1	0.25	100	0.06	0.00	3.9E-05	
9	$u_{Resol-bar}$	A	1.73	0.01	1	0.01	100	0.00	0.00	1.1E-11	
10	$u_{kalib-bar}$	B	2	0.50	1	0.25	100	0.06	0.00	3.9E-05	
11	$u_{hom}$	B	1	0.90	1	0.90	100	0.81	0.66	6.6E-03	
12	$u_{kon}$	B	1	0.50	1	0.50	100	0.25	0.06	6.3E-04	
13	$u_{kal-meter}$	B	2	0.50	1	0.50	100	0.25	0.06	6.3E-04	
14	$u_{resol-meter}$	B	1.73	0.00	1	0.00	100	0.00	0.00	6.3E-20	
Ketidakpastian gabungan, $u_c$ (%)			=						2.06	3.00	3.0E-02
Derajat kebebasan efektif, $v_{eff}$			=					99.086			
Faktor cakupan, k			=					2			
Ketidakpastian bentangan, $u_{exp}$			=					4.1			

\*) Nilai nominal ketidakpastian dapat berubah bergantung pada sertifikat kalibrasi dan pengukuran.

**Lampiran 1. Koefisien kalibrasi dalam satuan Kerma udara**

**International Atomic Energy Agency**

**Calibration certificate No. IDN/2012/6**

The following instruments from **SSDL Jakarta, Center for Technology of Radiation Safety and Metrology (PTKMR), National Nuclear Energy Agency (BATAN) Jakarta, Indonesia** have been calibrated at the IAEA Dosimetry Laboratory:

	Ionization chamber	Electrometer
Model/type:	NE-2575	
Serial number:	#576	
Manufacturer:	N.E. Technology / Thermo	
Calibration period:	from 2012-Aug-03	to 2012-Aug-30

**Calibration coefficients in terms of air kerma**

The calibrations have been performed following the procedure given in Appendix 3B "Radiation Protection Ionization Chamber Calibration Procedures" at the IAEA Dosimetry Laboratory. The IAEA reference standard chamber LS-01 (#114) used to calibrate the instruments had been calibrated at the PTB in December 2011 for ISO 4037 X ray beam qualities (narrow-spectrum series).

No.	Radiation quality X ray beam	Chamber $N_K$ [ $\mu\text{Gy/nC}$ ]	Chamber + electrometer $N_K$ [ $\mu\text{Gy}/\text{scale unit}$ ]	$\dot{K}_{air}$
				[ $\mu\text{Gy}/\text{min}$ ]
N40	40 kV, HVL = 2.72 mm Al	44.03 $\pm$ 0.53	-	196
N60	60 kV, HVL = 0.24 mm Cu	43.35 $\pm$ 0.52	-	190
N80	80 kV, HVL = 0.59 mm Cu	43.25 $\pm$ 0.52	-	196
N100	100 kV, HVL = 1.13 mm Cu	42.64 $\pm$ 0.51	-	176
N120	120 kV, HVL = 1.75 mm Cu	42.53 $\pm$ 0.51	-	196
N150	150 kV, HVL = 2.42 mm Cu	42.77 $\pm$ 0.51	-	191
N200	200 kV, HVL = 3.92 mm Cu	43.82 $\pm$ 0.53	-	193
N250	250 kV, HVL = 5.18 mm Cu	45.34 $\pm$ 0.54	-	196
N300	300 kV, HVL = 6.20 mm Cu	46.20 $\pm$ 0.55	-	195

Uncertainties in the calibration coefficients correspond to a coverage factor,  $k = 2$ . The calibration coefficients are established at the reference conditions  $T = 20.0$  °C,  $P = 101.325$  kPa and R.H. = 50.0 %.

Settings during the calibration (see Appendix for details):

Electrometer settings at calibration:  
 Scale unit:  
 Polarizing Voltage:  
 Polarizing Voltage for chamber calibration (alone): +250 V (applied to the collector)

Date of issue: 2012-11-08

A. Meghifene  
 Ahmed Meghifene  
 Head, Dosimetry and Medical  
 Radiation Physics Section

1/2 pages

DOLF.1106 rev 5

Lampiran 2. Koefisien Konversi untuk kualitas radiasi, R dan variasi sudut datang

Table 3. Conversion coefficients  $h_{p,R}(3;R,\alpha)_{\text{Sv}}$  for different radiation qualities R and angles of incidence  $\alpha$  in  $\text{Sv Gy}^{-1}$ .

Radiation quality R	$h_{p,R}(3;R,\alpha)_{\text{Sv}}$													
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°	
L-10	0.158	0.148	0.121	0.078	0.032	0.0037	0.000050	0	0	0	0	0	0	
L-20	0.74	0.73	0.71	0.66	0.57	0.40	0.124	0.00233	0.0000173	0.00000003	0	0	0	
L-30	1.12	1.11	1.09	1.06	0.98	0.82	0.46	0.119	0.0292	0.0088	0.0035	0.00184	0.00114	
L-35	1.22	1.21	1.19	1.16	1.09	0.93	0.58	0.197	0.060	0.0231	0.0114	0.0075	0.0063	
L-55	1.55	1.55	1.53	1.49	1.43	1.29	0.96	0.51	0.264	0.154	0.106	0.084	0.078	
L-70	1.65	1.65	1.63	1.60	1.53	1.40	1.10	0.65	0.37	0.235	0.171	0.142	0.132	
L-100	1.62	1.62	1.61	1.59	1.54	1.44	1.17	0.74	0.45	0.31	0.231	0.196	0.185	
L-125	1.55	1.55	1.54	1.53	1.49	1.41	1.17	0.76	0.48	0.33	0.250	0.214	0.203	
L-170	1.45	1.45	1.45	1.44	1.42	1.36	1.15	0.78	0.50	0.35	0.273	0.234	0.222	
L-210	1.39	1.39	1.39	1.39	1.38	1.33	1.14	0.79	0.52	0.37	0.292	0.252	0.239	
L-240	1.36	1.36	1.36	1.36	1.35	1.31	1.14	0.80	0.54	0.39	0.31	0.265	0.253	
N-7.5 <sup>a</sup>	0.0164	0.0143	0.0092	0.0036	0.00051	0.0000041	0	0	0	0	0	0	0	
N-10	0.129	0.121	0.097	0.061	0.0237	0.00245	0.0000241	0	0	0	0	0	0	
N-15	0.42	0.41	0.38	0.32	0.244	0.147	0.036	0	0	0	0	0	0	
N-20	0.67	0.66	0.63	0.58	0.50	0.35	0.102	0.00125	0.0000086	0.00000003	0	0	0	
N-25	0.88	0.87	0.85	0.80	0.72	0.54	0.212	0.0223	0.0033	0.00063	0.000142	0.0000171	0.00000001	
N-30	1.04	1.03	1.01	0.97	0.89	0.72	0.37	0.078	0.0174	0.0048	0.00177	0.00084	0.00047	
N-40	1.28	1.27	1.25	1.22	1.15	1.00	0.65	0.252	0.089	0.039	0.02	0.0150	0.0135	
N-60	1.54	1.53	1.51	1.48	1.41	1.27	0.95	0.50	0.256	0.149	0.10	0.081	0.075	
N-80	1.66	1.65	1.64	1.60	1.54	1.42	1.12	0.67	0.39	0.252	0.19	0.155	0.146	
N-100	1.63	1.63	1.62	1.59	1.54	1.44	1.17	0.73	0.45	0.299	0.23	0.191	0.181	
N-120	1.58	1.58	1.57	1.55	1.51	1.42	1.17	0.75	0.47	0.32	0.24	0.208	0.197	
N-150	1.52	1.52	1.51	1.50	1.47	1.40	1.16	0.76	0.49	0.33	0.26	0.219	0.208	
N-200	1.42	1.42	1.42	1.42	1.40	1.34	1.15	0.78	0.51	0.36	0.28	0.242	0.231	
N-250	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.31	1.14	0.80	0.54	0.39	0.31	0.264	0.252	
N-300	1.32	1.33	1.33	1.33	1.32	1.29	1.13	0.81	0.56	0.41	0.33	0.283	0.271	
N-350	1.29	1.30	1.30	1.30	1.30	1.27	1.13	0.82	0.58	0.43	0.34	0.30	0.289	
N-400	1.27	1.27	1.27	1.28	1.28	1.26	1.12	0.83	0.60	0.45	0.36	0.32	0.31	
W-30 <sup>a</sup>	0.96	0.95	0.93	0.89	0.81	0.63	0.292	0.052	0.0108	0.00286	0.00100	0.00045	0.000240	
W-40 <sup>a</sup>	1.16	1.15	1.14	1.10	1.02	0.86	0.51	0.163	0.051	0.0204	0.0105	0.0070	0.0061	
W-60	1.48	1.47	1.45	1.42	1.35	1.21	0.88	0.44	0.213	0.119	0.080	0.063	0.058	
W-80	1.60	1.59	1.57	1.54	1.47	1.34	1.03	0.58	0.32	0.197	0.141	0.116	0.108	
W-110	1.63	1.63	1.62	1.59	1.54	1.43	1.15	0.72	0.43	0.287	0.216	0.182	0.172	
W-150	1.55	1.55	1.54	1.53	1.49	1.41	1.16	0.75	0.47	0.32	0.245	0.209	0.198	
W-200	1.47	1.47	1.47	1.46	1.43	1.37	1.15	0.77	0.50	0.35	0.269	0.231	0.219	
W-250	1.41	1.41	1.41	1.40	1.39	1.34	1.14	0.79	0.52	0.37	0.289	0.249	0.237	
W-300	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.31	1.14	0.80	0.54	0.39	0.31	0.265	0.253	

Continued