

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**Ketidakpastian Pengukuran Detektor Bilik Ionisasi dan  
Detektor *Solid State* Pada Kualitas Radiasi RQR  
Berdasarkan TRS No. 457**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana sains**

Oleh :

**HARA I SIMARMATA**

**0706196582**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI S1 FISIKA**

**PEMINATAN FISIKA MEDIS DAN BIOFISIKA**

**DEPOK**

**JUNI 2010**

## LEMBAR PENGESAHAN

Nama Mahasiswa : Hara I Simarmata  
NPM : 0706196582  
Program Studi : S1 Ekstensi Fisika, Peminatan Fisika Medis dan Biofisika  
Judul Skripsi : Ketidakpastian Pengukuran Detektor Bilik Ionisasi dan  
Detektor Solid State Pada Kualitas Radiasi RQR  
Berdasarkan TRS No. 457

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi S1 Fisika Peminatan Fisika Medis dan Biofisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

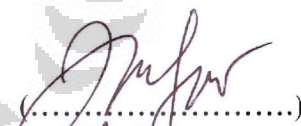
### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Dwi Seno Kuncoro, M.Si

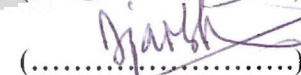
Pembimbing II : Heru Prasetyo, M.Si

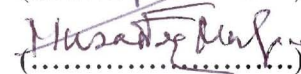
Penguji I : Prof. Dr. Djarwani S. Soedjoko

Penguji II : Dr. Musaddiq

  
(.....)

  
(.....)

  
(.....)

  
(.....)

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 2 Juli 2010

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadirat Tuhan YME yang telah memberikan rahmat dan karunia Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul "**Ketidakpastian Pengukuran Detektor Bilik Ionisasi dan Detektor *Solid State* Pada Kualitas Radiasi RQR Berdasarkan TRS No. 457**".

Penyusunan skripsi ini disusun dengan tujuan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh Gelar Sarjana Sains.

Dalam menyusun tugas akhir ini penulis banyak menemukan hambatan. Namun berkat bantuan dan dorongan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan makalah ini. Untuk itu atas segala bantuan dan dorongannya, tak lupa penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. ***Alm. Kedua Orang Tuaku Tercinta*** dengan segala kekurangan yang kita miliki dan dengan doa yang terus-menerus dipersembahkan kepada anakmu ini, sehingga walaupun mereka sudah tiada, mereka adalah semangatku yang tiada padam dalam mengejar cita-citaku. "Salam rindu buat mama dan papa tercinta...Salam damai di tempatmu yang indah sekarang..." .
2. ***Keluarga Abangku Tercinta***, semua kasih sayang dan perhatiannya, dimana beliau sebagai pengganti orang tuaku sekarang.
3. ***Keluarga Kakakku Tercinta***, semua kasih sayang dan perhatiannya sehingga menjadikan tempatku bertukar pikiran.
4. ***Aprida Mardelina Sihombing***, kamu yang membuat aku jadi semangat, yang banyak membantu sehingga aku yakin dan mampu menyelesaikan studiku di fisika ini serta banyak memberikan inspirasi, harapan, dan mimpi.
5. ***Dwi Seno Kuncoro, M.Si*** sebagai pembimbing yang telah memberikan ilmunya sejak penulis mengenal fisika medis.

6. **Heru Prasetio, M.Si** sebagai pembimbing yang telah menyediakan banyak waktu, sabar dalam membimbing penulis, memotivasi, serta memberikan ilmu, ide dan inspirasi dalam mengenal fisika medis.
7. **Prof. Dr. Djarwani S. Soedjoko** sebagai penguji I telah memberikan waktu dan masukan-masukan untuk perbaikan skripsi ini.
8. **Dr. Musaddiq** sebagai penguji II, yang telah memberikan banyak ilmu baru, masukan-masukan dan revisi.
9. **Bu Tuti dan** rekan-rekan di Lab. SSDL BATAN Mampang, khususnya **Ainur Rahmi, Koko** yang banyak membantu dalam pengambilan data dan konsultasi dan juga sebagai teman seperjuangan di fisika medis.
10. Seluruh dosen Departemen Fisika UI atas segala ilmunya yang diberikan selama penulis menjadi mahasiswa Departemen Fisika UI.
11. Teman-teman satu angkatan ekstensi fisika medis 2007 **Fransiska D, Andreas N dan Faisal Q.**
12. Semua staf departemen fisika, khususnya Mas Rizki yang sudah banyak membantu segala informasi, dukungan, dan kemudahan.
13. Juga semua pihak yang belum disebutkan di sini atas dukungan dan doa kepada penulis selama penyelesaian tugas akhir ini. Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari sempurna karena keterbatasan pengetahuan saya, maka diharapkan kritik dan saran konstruktif demi perbaikan penulisan hasil penelitian ini. Penulis berharap skripsi ini dapat diaplikasikan dan bermanfaat bagi perkembangan ilmu di masa mendatang. Terimakasih.

Jakarta, 28 Juni 2010

Hara I Simarmata

Nama Mahasiswa : Hara I Simarmata  
Program Studi : S1 Ekstensi Fisika, Peminatan Fisika Medis dan Biofisika  
Judul Skripsi : Ketidakpastian Pengukuran Detektor Bilik Ionisasi dan Detektor *Solid State* Pada Kualitas Radiasi RQR Berdasarkan TRS No. 457

### ABSTRAK

Telah dilakukan ketidakpastian pengukuran pada detektor bilik ionisasi dan detektor Solid State. Metode yang dilakukan adalah dengan melakukan pengukuran HVL (Half Value Layer) dan pengukuran kalibrasi detektor pada berkas radiasi RQR, dimana melalui pengukuran dan hasil perhitungan diperoleh hasil ketidakpastian detektor farmer pada masing-masing tegangan **50 kV** yaitu sebesar **7.40%**, **60 kV** sebesar **7.39%**, **70 kV** sebesar **7.52%**, **80 kV** sebesar **7.32%**, **90 kV** sebesar **7.89%** dan **100 kV** sebesar **7.40%** dan ketidakpastian detektor unfors pada masing-masing tegangan **50 kV** yaitu sebesar **12.26%**, **60 kV** sebesar **12.26%**, **70 kV** sebesar **12.31%**, **80 kV** sebesar **12.22%**, **90 kV** sebesar **12.54%** dan **100 kV** sebesar **12.24%**.

*Kata kunci :*

*Sinar x, HVL (Half Value Layer), detektor farmer, detektor unfors, kalibrasi.*

Name : Hara I Simarmata  
Concentration : S1 Ekstensi Fisika, Peminatan Fisika Medis dan Biofisika  
Title : Measurement of Uncertainty Ionization Chamber  
Detector and Solid State Detector on Radiation Quality

RQR based on TRS No.457

### ABSTRACT

The author had been do improbability measurement on ionization chamber detector and solid state detector. The method is measuring HVL (Half Value Layer) and detector calibration of radiation RQR on X-Ray instrument, which is through this measurement and result calculation get improbability results of farmer detector on every voltage is **50 kV is 7.40%, 60 kV is 7.39%, 70 kV is 7.52%, 80 kV is 7.32%, 90 kV is 7.89% and 100 kV is 7.40%** and improbability unfors detector on every voltage is **50 kV is 12.26%, 60 kV is 12.26%, 70 kV is 12.31%, 80 kV is 12.22%, 90 kV is 12.54% and 100 kV is 12.24%** .

*Keyword: X-Ray, HVL (Half Value Layer), Farmer Detector, Unfors Detector, Calibration.*

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	iii
<b>ABSTRAK</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan Penelitian .....	2
1.3 Pembatasan Masalah .....	2
1.4 Metodologi Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	2
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Ketidakpastian Pengukuran .....	4
2.2 Sumber-Sumber Ketidakpastian Pengukuran .....	5
2.3 Estimasi Ketidakpastian Baku .....	5
2.3.1 Ketidakpastian Baku Tipe A .....	5
2.3.2 Ketidakpastian Baku Tipe B .....	6
2.4 Kesalahan Hasil Uji .....	7
2.5 Hal-Hal Yang Perlu Diperhatikan Dalam Estimasi Ketidakpastian Pengukuran .....	9
2.6 Kualitas Berkas Radiasi Sinar X .....	11
2.7 Produksi Sinar X .....	12

### **BAB III. METODOLOGI PENELITIAN**

3.1 Instrumen Penelitian .....	15
3.2 Set-Up Pengukuran HVL Pesawat Sinar X .....	16
3.3 Penentuan HVL dengan Added Filter .....	17
3.4 Melakukan Verifikasi HVL .....	19
3.4.1 Prosedur Memverifikasi HVL Menggunakan Farmer .....	19
3.4.2 Prosedur Memverifikasi HVL Menggunakan Unfors .....	20
3.5 Memperoleh Faktor Koreksi ( $K_p$ ) .....	20
3.6 Menghitung Ketidakpastian Pengukuran .....	22

### **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Pengukuran HVL.....	24
4.2 Pengukuran Deviasi dari Nilai Koreksi ( $N_k$ ).....	26
4.3 Evaluasi Ketidakpastian.....	26
4.3.1 Detektor Farmer .....	26
4.3.2 Detektor Unfors.....	30

### **BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan .....	34
5.2 Saran .....	34

### **DAFTAR ACUAN**

### **LAMPIRAN**



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Kesalahan Sistematis .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Akurasi dan Presisi .....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Tabung Sinar X .....	12
<b>Gambar 2.4</b>	Spektrum Sinar X .....	13
<b>Gambar 3.1</b>	Bagan Kerangka Proses Ketidakpastian Pengukuran .....	14
<b>Gambar 3.2</b>	Detektor Unfors .....	15
<b>Gambar 3.3</b>	Elektrometer Farmer .....	15
<b>Gambar 3.4</b>	Skema Set-Up Peralatan Untuk Mencari Besar Added Filter Pesawat Sinar X.....	16
<b>Gambar 3.5</b>	Tabung Pesawat Sinar X .....	16
<b>Gambar 3.6</b>	Filter Aluminium .....	17
<b>Gambar 3.7</b>	Contoh Kurva Untuk Memperoleh $F_{HVL}$ .....	18
<b>Gambar 4.1</b>	Grafik kV dan HVL .....	26

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Kualitas Radiasi .....	11
<b>Tabel 2.2</b>	Karakteristik HVL pada Kualitas Radiasi RQR.....	11
<b>Tabel 4.1</b>	Nilai HVL pada Tegangan (kV).....	25
<b>Tabel 4.2</b>	Deviasi Nilai Koreksi Tiap Tegangan (kV) Pada Detektor Famer.....	27
<b>Tabel 4.3</b>	Ketidakpastian Detektor Farmer .....	30
<b>Tabel 4.4</b>	Deviasi Nilai Koreksi Tiap Tegangan (kV) Pada Detektor Unfors .....	31
<b>Tabel 4.5</b>	Ketidakpastian Detektor Unfors .....	33

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Di dunia yang berkembang saat ini, sangat dituntut untuk bertindak hati-hati dalam menjaga mutu jasa atau layanan yang menyangkut hal keselamatan lingkungan dan kesehatan pada manusia. Salah satu faktor yang sangat penting dalam rantai produksi untuk menjaga mutu layanan tersebut adalah kebenaran pengukuran tiap komponen yang membentuk produk jasa dan layanan tersebut. Dalam pelaksanaannya ada beberapa hal teknis yang sering dijumpai dan menjadi hambatan atau hal yang tidak bisa diterima seperti misalnya terjadinya perbedaan hasil terhadap suatu peralatan yang sama. Kebenaran pengukuran dimaksudkan untuk menghasilkan kualitas hasil uji menjadi baik sehingga produk jasa atau layanan tersebut dapat dipertanggungjawabkan.

Salah satu indikator kualitas hasil uji yang baik adalah akurasi dan presisi yang dapat dikuantisasi (diukur secara kuantitatif) dengan suatu besaran yang disebut "Uncertainty" (ketidakpastian), dimana di dalamnya sudah diperhitungkan semua jenis kesalahan yang bisa timbul dalam pengukuran tersebut. Dengan konsep ini maka nilai kuantitas yang diukur (nilai benar) dapat diperkirakan rentang hasilnya di dalam batas-batas interval nilai tertentu yang diketahui, dapat dinyatakan dalam bentuk  $X = Y \pm U$ . Hasil = perkiraan dari nilai benar  $\pm$  suatu interval (rentang) di mana nilai kuantitas yang diukur (nilai benar) diperkirakan berada.

Dengan adanya ketidakpastian pengukuran, diharapkan dapat dimanfaatkan dalam penentuan hasil ukur peralatan sehingga mendekati nilai yang benar dan untuk mendapatkan pengukuran yang bagus, ketidakpastian yang didapat harus seoptimal mungkin bergantung dari kebutuhan bagi pengguna.

Maka dalam penelitian ini akan dicari ketidakpastian pengukuran berkas radiasi sinar-X pada beberapa energi dengan karakteristik kualitas radiasi yang telah distandarkan oleh *Technical Report Series* No. 457. Kualitas radiasi sinar-X cenderung menunjukkan

kemampuan penetrasi dari berkas radiasi sinar-X tersebut, maka dalam menentukan kualitas suatu radiasi sinar-X biasanya dinyatakan dalam HVL. Penggunaan HVL tersebut dikarenakan kemampuan penetrasi radiasi sinar-X akan berbeda untuk setiap energi.

## **1.2 Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari ketidakpastian pengukuran pada proses kalibrasi detektor pada berkas radiasi RQR pesawat sinar-X, sehingga didapat hasil ketidakpastian pengukuran untuk tiap-tiap energi yang terdapat pada *Technical Report Series* No. 457 untuk kualitas radiasi seri RQR.

## **1.3 Pembatasan Masalah**

Menentukan nilai HVL dilakukan terlebih dahulu untuk tiap-tiap energi (40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150 kV) yang kemudian menentukan nilai faktor kalibrasi untuk tiap-tiap energi (50, 60, 70, 80, 90, 100 kV) menggunakan detektor farmer, kemudian menentukan nilai ketidakpastian pengukuran dari tiap-tiap energi tersebut.

## **1.4 Metodologi Penelitian**

Metodologi penelitian terdiri dari dua tahap, tahap pertama adalah uji kualitas berkas sinar-X melalui penentuan nilai HVL untuk energi yang berbeda-beda, tahap kedua adalah penentuan nilai faktor kalibrasi dengan menggunakan detektor farmer dan detektor unforce untuk energi yang berbeda-beda.

## **1.5 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan tugas akhir ini dibagi menjadi 5 bab pokok pembahasan yang meliputi :

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang penelitian, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai teori-teori penunjang penelitian, antara lain mengenai alat-alat yang digunakan dan teori dasar dari permasalahan yang dibahas.

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan peralatan, metode untuk kalibrasi, selain itu cara kerja peralatan yang digunakan dalam pengukuran dan pengambilan data.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan diperoleh data hasil uji HVL dan nilai faktor kalibrasi detector yang digunakan dengan tujuan mendapatkan hasil ketidakpastian pengukuran dari detector tersebut pada tiap-tiap energy.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini, penulis akan memberikan beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini, serta saran lebih lanjut untuk aplikasi dari penelitian ini.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Ketidakpastian Pengukuran

*Ketidakpastian pengukuran* adalah parameter yang terkait dengan hasil pengukuran, yang mengkarakterisasikan penyebaran nilai-nilai yang mewakili nilai yang diukur atau interval (kisaran) nilai di dalam mana nilai kuantitas yang diukur itu terletak, yang artinya di dalam mana "nilai benar" diperkirakan berada.

Tujuan pengukuran adalah menentukan nilai dari kualitas yang diukur. Hasil pengukuran adalah nilai perkiraan (estimasi) dari kuantitas yang diukur. Hasil pengukuran baru dianggap lengkap apabila disertai dengan ketidakpastian pengukuran tersebut. Nilai perkiraan dapat berbeda dari nilai benar atau menyimpang. Hasil pengukuran yang bervariasi mencerminkan penyimpangan (error) yang juga bervariasi, hal tersebut bisa terjadi karena disebabkan oleh faktor kinerja alat, metode pengukuran, personil, kondisi lingkungan dsb.

Ketidakpastian terdiri atas beberapa komponen:

- Beberapa komponen dapat dievaluasi dengan metode statistik dari distribusi statistik hasil-hasil pengukuran berulang (repetitive measurement) yang dinyatakan dalam bentuk nilai "standard deviation" (simpangan baku), SD *Komponen ini disebut type A, pada umumnya berasal dari efek acak (random effect) yaitu efek yang dapat menimbulkan kesalahan acak.*
- Beberapa komponen yang lain dapat dievaluasi pula dengan "standard deviation" (simpangan baku) berdasarkan asumsi probabilitas distribusi yang berdasarkan pengalaman atau informasi yang tersedia. *Komponen ini disebut type B. Pada umumnya type B bisa berasal dari efek acak dan sistematis (random and systematic effect), dimana efek sistematis yaitu efek yang menimbulkan kesalahan sistematis atau bias.*

## 2.2 Sumber-Sumber Ketidakpastian

Setiap faktor dalam tahap pengukuran dapat menjadi sumber timbulnya ketidakpastian, faktor-faktor tersebut antara lain:

- Ketidaklengkapan spesifikasi dari kuantitas yang diukur
- Ketidaktepatan penerapan metode atau prosedur pengukuran yang digunakan di laboratorium
- Kondisi lingkungan pengukuran
- Efek personal
- Efek peralatan ukur
- Asumsi-asumsi yang digunakan dalam metode dan dalam pengukurannya sendiri

Dengan demikian nilai ketidakpastian harus memperhitungkan semua efek dari faktor-faktor di atas yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran. Dengan kata lain ketidakpastian pengukuran memiliki banyak komponen yang secara bersama-sama memberikan kontribusi kepada ketidakpastian total.

## 2.3 Estimasi Ketidakpastian Baku (TYPE A DAN TYPE B)

### 2.3.1 Ketidakpastian Baku Type A

- Dasar evaluasi tipe A adalah metode statistik untuk menganalisis satu seri hasil pengukuran berulang yaitu dengan melalui SD
- Evaluasi ini adalah evaluasi ketidakpastian yang berasal dari efek acak dan berdasarkan asumsi distribusi normal
- Maka dari  $n$  pengukuran yang dilakukan terhadap sejumlah contoh-contoh yang identik di bawah kondisi yang sama akan diperoleh hasil yang berbeda-beda ( $X_i$ ) yang mempunyai nilai rata-rata *mean value*

- Apabila dalam pengukuran berulang di atas mencakup sekaligus beberapa efek komponen ketidakpastian, maka ketidakpastian baku = RSD (relative standard deviation) dan bukan SD.
- Apabila untuk kepentingan tertentu dilakukan m pengukuran, ketidakpastian baku yang disumbangkan kepada ketidakpastian baku kombinasi ialah :
- Adalah tidak praktis untuk menentukan ketidakpastian baku tipe A pada setiap kali pengukuran contoh. Apabila pengukuran sudah bersifat rutin, sistem pengukuran dan prosedur tidak mengalami perubahan, maka nilai  $\mu$  yang sudah diperoleh (sebelumnya) dapat digunakan. Namun dalam hal demikian nilai  $\mu$  tersebut hanya perlu diverifikasi secara berkala.

### 2.3.2 Ketidakpastian Baku Tipe B

Tipe B adalah ketidakpastian yang bersal dari efek acak dan sistematis. Evaluasi tipe B mengandalkan kepada nilai “quoted uncertainty” yang diperoleh dari sumber informasi seperti :

- a. Sertifikat kalibrasi
- b. Spesifikasi pabrik tentang alat, bahan dari : katalog, handbook
- c. Data pengalaman sebelumnya

Di sini ketidakpastian baku tipe B didapatkan dari nilai SD yang dihitung dari nilai quoted uncertainty yaitu dengan membaginya dengan faktor pencakupan k. Nilai k bergantung kepada asumsi distribusi probabilitas ketidakpastian tersebut.

**Nilai ketidakpastian baku =  $\mu$**

- Apabila nilai faktor pencangkupan dicantumkan (diketahui)

$$\mu = \frac{\text{Quoted Uncertainty}}{\text{Faktor Pencakupan}} \quad (2.1)$$

Faktor Pencakupan



Di sini Quoted Uncertainty dinyatakan sebagai Faktor Pencakupan x Standard Deviation

▪ **Untuk distribusi normal**

$$\mu = \frac{\text{Quoted Uncertainty}}{2} \quad (2.2)$$

Apabila Quoted Uncertainty dinyatakan pada tingkat kepercayaan (confidence level) = 95%

▪ **Untuk distribusi segitiga (rectangular distribution)**

$$\mu = \frac{\text{Quoted Uncertainty}}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

Apabila kita yakin bahwa kesalahan yang lebih besar lebih mungkin terjadi

▪ **Untuk distribusi segi tiga (triangular distribution)**

$$\mu = \frac{\text{Quoted Uncertainty}}{\sqrt{6}} \quad (2.4)$$

Apabila kita yakin bahwa kesalahan yang lebih kecil lebih mungkin terjadi

## 2.4 Kesalahan Hasil Uji

Kesalahan hasil uji pada prinsipnya memiliki 2 (dua) golongan :

### 1. Kesalahan bersifat acak (random error)

Ditimbulkan oleh efek yang bersifat tidak tentu (acak); kesalahan ini tidak dapat dihindarkan. Dalam pengukuran atas satu benda uji yang dilakukan berulang-ulang, hasil-hasil yang diperoleh cenderung memiliki distribusi normal (gaussian distribution), dengan nilai rata-rata yang berada pada sentralnya. Sumber kesalahan acak antara lain: “noise” dari instrumen atau peralatan ukur, dari lingkungan, dan sebagainya.

## 2. Kesalahan bersifat sistematis (systematic error)

Kesalahan sistematis ditimbulkan oleh faktor-faktor tertentu sehingga menghasilkan kesalahan yang praktis konstan, yang disebut "bias". Kesalahan sistematis antara lain berasal dari peralatan atau instrumen, personil metode uji, standar yang dipakai, dan sebagainya. Dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Kesalahan sistematis

Kesalahan acak yang kecil akan memberikan hasil uji berpresisi tinggi, sedang bias yang kecil berarti hasil uji yang lebih akurat atau tinggi akurasi. Akurasi dan presisi merupakan 2 (dua) indikator untuk mengukur mutu hasil uji.

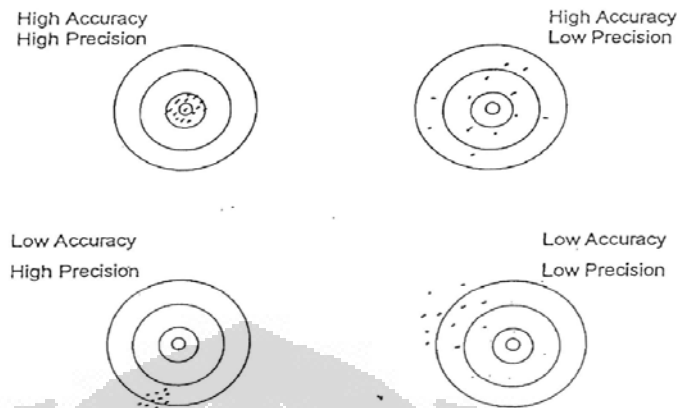
### ➤ Akurasi

- Menggambarkan systematic error (kesalahan sistematis)
- Adalah kedekatan hasil analisis rata-rata dengan nilai sebenarnya

### ➤ Presisi

- Menggambarkan random error (kesalahan acak)
- Adalah variabilitas hasil-hasil analisis yang bersangkutan

Pada gambar 2.2 dibawah ini menunjukkan perbedaan mendasar antara akurasi dan presisi (ketelitian).



Gambar 2.2 Akurasi dan presisi

Akurasi menunjukkan kedekatan pengukuran terhadap nilai sebenarnya. Akurasi mengukur kesesuaian antara hasil dan nilai sebenarnya. Presisi menunjukkan kesesuaian antara beberapa hasil pengukuran yang diukur dengan cara yang sama. Nilai presisi biasanya dinyatakan dalam bentuk nilai RSD (relative standard deviation).

$$\text{Nilai rata-rata} = (X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_{10}) = X_{\text{rata-rata}}$$

$$\text{Standar deviasi (S)} = \quad (2.5)$$

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} |x_i - \bar{x}|^2}{(10 - 1)}}$$

$$\text{RSD} = (S/X_{\text{rata-rata}}) \times 100\% \quad (2.6)$$

### 2.5 Hal-Hal Yang Perlu Diperhatikan Dalam Estimasi Ketidakpastian Pengukuran.

Hal yang harus diperhatikan dalam mengestimasi ketidakpastian pengukuran adalah sebagai berikut:

1. Kuantitas yang diukur harus memiliki spesifikasi yang jelas, metode pengukurannya juga harus jelas

2. Ketidakpastian yang berasal dari setiap sumber ketidakpastian diestimasi secara individual untuk mengetahui "komponen ketidakpastian".
3. Masing-masing komponen itu berkontribusi kepada ketidakpastian pengukuran total
4. Apabila ketidakpastian dinyatakan dalam bentuk standard deviation (SD), besaran ini disebut ketidakpastian baku (standard uncertainty),  $\mu$
5. Untuk menjumlahkan atau mengkombinasikan (menggabung) efek-efek dari semua komponen di atas:
  - a. Perlu diidentifikasi mana komponen yang independen dan mana yang saling berkorelasi. Hal ini untuk menentukan cara atau aturan untuk mengkombinasikan semua efek tersebut.
  - b. Seringkali dimungkinkan untuk melakukan evaluasi efek kombinasi dari beberapa komponen secara sekaligus. Di sini tidak diperlukan lagi evaluasi individual dari komponen-komponen tersebut, serta untuk mengetahui ada/tidaknya korelasi antar komponen yang terkait.
  - c. Untuk hasil pengukuran = y, nilai ketidakpastian dinyatakan sebagai ketidakpastian baku gabungan,  $\mu_c(y)$ .

$$\mu_G = \sqrt{\mu^2 a + \mu^2 b + \dots} \quad (2.7)$$

- d.  $\mu_c(y)$  ialah estimasi SD dimana efek semua komponen ketidakpastian di atas sudah digabungkan dan dihitung.
6. Umumnya ketidakpastian pengukuran harus dinyatakan dengan expanded uncertainty atau ketidakpastian yang diperluas, U. Nilai U memberikan suatu interval (rentang) di dalam mana nilai kuantitas yang diukur (nilai benar) diperkirakan berada, pada tingkat kepercayaan tertentu.

$$U = k \cdot \mu_c(y) \quad (2.8)$$

dimana:

k = factor pencakupan (coverage factor)

Nilai k bergantung kepada tingkat kepercayaan yang diambil. Pada tingkat kepercayaan sekitar 95% nilai k=2 dan pada tingkat kepercayaan sekitar 68.7% nilai k=1. Yang umum digunakan : k=2 tingkat kepercayaan 95%.

7. Pelaporan hasil dan ketidakpastian, dinyatakan dalam bentuk :

$$Y \pm U$$

dimana nilai k dan tingkat kepercayaan yang dipilih harus dicantumkan.

## 2.6 Kualitas Berkas Radiasi Sinar X

Pengujian kualitas berkas sinar-X dilakukan untuk memperoleh kesesuaian nilai tebal paro (HVL). Kualitas radiasi digunakan dalam mengkalibrasi radiologi diagnostic dengan menggunakan acuan Technical Reports Series (TRS) No. 457 ,seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kualitas radiasi

Radiation quality	Radiation origin	Material of an additional filter	Application
RQR	Radiation beam emerging from X ray assembly	No phantom	General radiography, fluoroscopy and dental applications (measurements free in air)
RQA	Radiation beam with an added filter	Aluminium	Measurements behind the patient (on the image intensifier)
RQT	Radiation beam with an added filter	Copper	CT applications (measurements free in air)
RQR-M	Radiation beam emerging from X ray assembly	No phantom	Mammography applications (measurements free in air)
RQA-M	Radiation beam with an added filter	Aluminium	Mammography studies

Dalam mendapatkan kualitas radiasi, maka standar kualitas radiasi yang digunakan adalah RQR. Kualitas radiasi ini merupakan peristiwa pada berkas radiasi yang ada pada pasien di dalam radiografi umum, fluoroskopi dll yang dapat diwujudkan

melalui tabung sinar x. Kualitas radiasi seri RQR memiliki karakteristik HVL (Half Value Layer) yang berbeda dengan kualitas radiasi lainnya, dapat dilihat pada tabel 2.2.

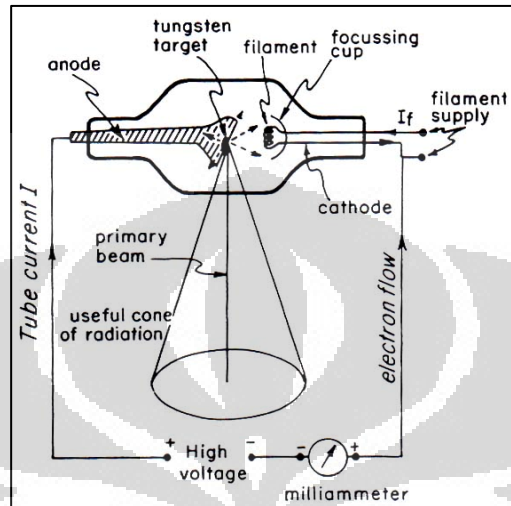
Tabel 2.2 Karakteristik HVL pada kualitas radiasi RQR

Radiation quality	X ray tube voltage (kV)	First HVL (mm Al)	Homogeneity coefficient ( <i>h</i> )
RQR 2	40	1.42	0.81
RQR 3	50	1.78	0.76
RQR 4	60	2.19	0.74
<b>RQR 5*</b>	<b>70</b>	<b>2.58</b>	<b>0.71</b>
RQR 6	80	3.01	0.69
RQR 7	90	3.48	0.68
RQR 8	100	3.97	0.68
RQR 9	120	5.00	0.68
RQR 10	150	6.57	0.72

## 2.7 Produksi Sinar-X

Sinar X dihasilkan ketika elektron energi tinggi berinteraksi dengan materi dan mengubah energi kinetiknya menjadi radiasi elektromagnetik. Perubahan energi kinetik menjadi radiasi elektromagnetik menghasilkan sinar-X. Tabung sinar X terdiri dari sekumpulan katoda dan anoda yang ditempatkan di dalam tabung kaca (*glass envelope*) yang telah divakumkan.

Tegangan tinggi diberikan di antara dua elektroda (katoda dan anoda). Katoda merupakan muatan negatif dan sumber elektron, tersusun dari filament Tungsten yang berbentuk lilitan ditempatkan pada cekungan pemfokus (*focusing cup*), sedangkan anoda merupakan muatan positif dan target dari elektron. Dalam tabung sinar-X ada tahapan yang terjadi untuk menghasilkan sinar-X yaitu, ketika filament dipanaskan sampai membara elektron dihasilkan pada katoda, elektron keluar dari permukaan tungsten dan dipercepat menuju ke anoda dengan tegangan tinggi (lihat Gambar. 2.3).

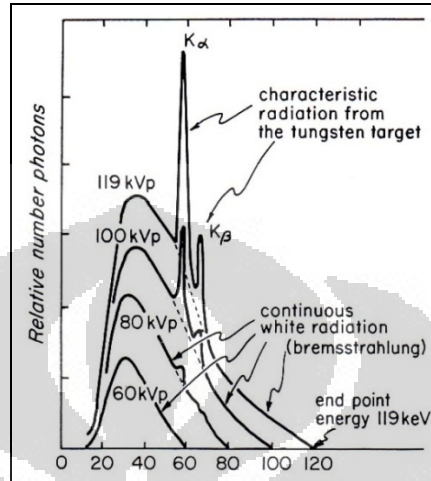


Gambar 2.3 Tabung Sinar-X

Elektron dipercepat karena adanya beda potensial listrik/ tegangan antara dua elektroda ini sampai menghasilkan energi kinetik. Elektron dengan kecepatan tinggi berinteraksi dengan atom target melalui 3 cara :

- 99% interaksi yang terjadi dengan kulit terluar elektron dapat menghasilkan panas seperti cahaya tampak dan radiasi infra merah.
- 1% interaksi menghasilkan sinar-X, sekitar 20% sampai 30% terjadi pada kulit terdalam elektron untuk menghasilkan karakteristik sinar-X.
- 70% - 80% dari 1% energi elektron yang diubah menjadi keluaran sinar-X menjadi *Bremstrahlung* oleh interaksi dengan inti dari atom target mengikuti gaya coulomb antara elektron dan inti positif menyebabkan elektron berubah arah, dipercepat menuju inti. Percepatan elektron menghasilkan radiasi elektromagnetik. Interaksi lemah, ketika elektron

menjauh dari inti, memungkinkan untuk menghasilkan sinar-X energi rendah.



Gambar 2.4 Spektrum sinar X

Semua berkas sinar-X untuk diagnostik terdiri dari rentang energi yang panjang. Data energi sinar-X digambarkan dengan menggunakan spektrum energi sinar-X. Sinar-X dengan energi tinggi menghasilkan kontras yang rendah dan dosis yang rendah sedangkan sinar-X dengan energi rendah akan menghasilkan kontras yang lebih tinggi dengan dosis yang tinggi (lihat Gambar 2.4).

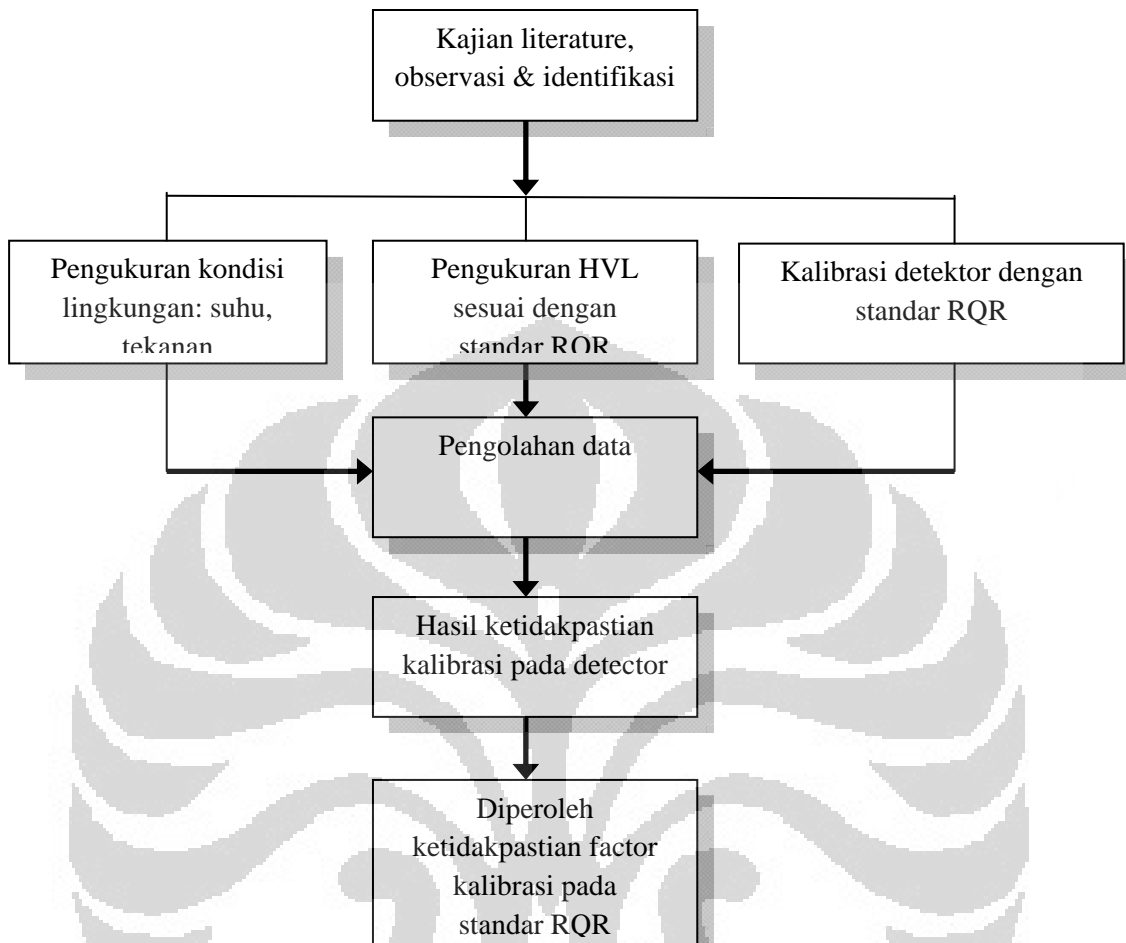


## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Pada bab ini akan dibahas tentang cara pengumpulan data dan prosedur kerja penelitian. Kegiatan penelitian menggunakan alat ukur dan metode yang digunakan tertelusur langsung ke IAEA.

Secara garis besar penggunaan instrument dan tata cara pengumpulan data dikelompokkan sesuai dengan hasil identifikasi faktor kesalahan yang menjadi sumber ketidakpastian pengukuran, yaitu : 1. Proses menset-up alat ukur menggunakan pesawat sinar x, 2. Proses pengukuran HVL pada pesawat sinar x dengan bantuan filter agar sesuai dengan standar RQR dan 3. Proses pengukuran kalibrasi detektor pada berkas RQR.



Gambar 3.1 Bagan kerangka proses ketidakpastian pengukuran

Proses ketidakpastian pengukuran terdiri dari proses pengukuran dengan prosedur yang cukup kompleks. Tahapan dari tiap kegiatan yang menjadi rangkaian proses tersebut harus dilakukan secara berurutan sehingga ketidakpastiannya merupakan perhitungan kesalahan sistemik. Untuk memudahkan pemahaman dan urutan proses penelitian, berikut ini dilukiskan dalam kerangka berfikir dibawah ini (lihat gambar 3.1).

### 3.1 Instrumen Penelitian

Pada penelitian ini dibutuhkan peralatan yang mendukung pada saat pengukuran HVL dan kalibrasi yaitu 1. Ionization chamber : ionization chamber yang digunakan adalah yang bisa dioperasikan dengan range radiasi yang dibutuhkan, leakage current harus dibawah  $10^{-14}$  A, koefisien kalibrasi yang konsisten, harus memiliki stabilitas yang tinggi dan terbuat dari material yang dapat mengurangi respon terhadap temperature, kelembaban, dan tekanan, 2. Elektrometer Farmer : digunakan untuk mengukur muatan atau arus yang dihasilkan selama penyinaran, 3. Termometer : digunakan untuk mengukur temperature ruangan selama pengukuran, 4. Barometer : digunakan untuk mengukur tekanan relative udara di ruangan pengukuran, 4. Filter : digunakan sebagai absorber dalam menentukan HVL, 5. Pesawat sinar-x dan apparatusnya



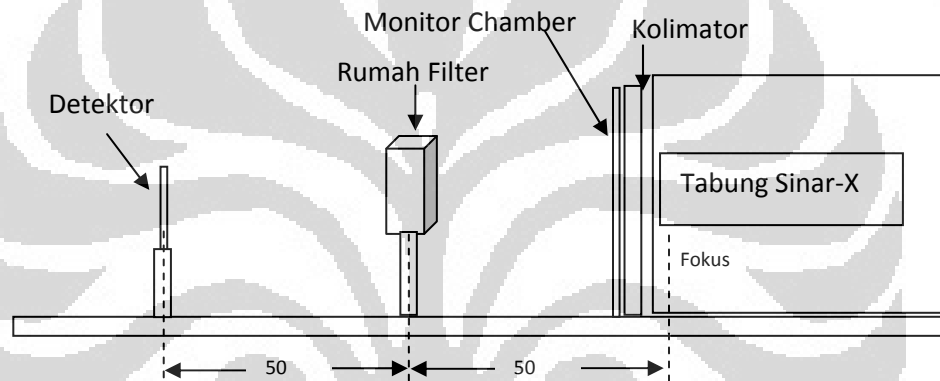
Gambar 3.2 Detektor Unfors



Gambar 3.3 Elektrometer Farmer 2570/1

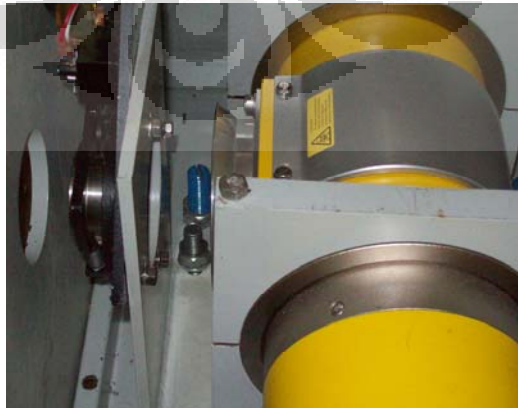
### 3.2 Set-Up Pengukuran HVL Pesawat Sinar-X

Pada Gambar 3.4 memperlihatkan set-up eksperimental untuk pengukuran HVL di SSDL yang harus diikuti. Prosedur yang digunakan untuk menentukan HVL harus mengikuti rekomendasi yang diberikan oleh *International Commission On Radiation units And Measurement (ICRU)* dan *International Atomic Energy Agency (IAEA)*. Hal ini dilakukan agar hasil pengukuran memenuhi standar internasional yang telah disepakati untuk mengurangi efek negatif dari pemanfaatan radiasi sinar-x.



Gambar 3.4 Skema *set-up* peralatan untuk mencari besar *added filter* pesawat sinar-x

Skema set-up pengukuran HVL dimulai dengan pesawat sinar-x. Pesawat sinar-x yang digunakan adalah Y.TU 320-D03, pesawat ini berdedikasi untuk keperluan kalibrasi, dapat dilihat pada gambar 3.5 dibawah ini.



Gambar 3.5 Tabung Pesawat Sinar-X, Y.TU 320-D03

Pada penelitian ini menggunakan juga filter yaitu aluminium (lihat Gambar 3.6) digunakan dalam menyerap radiasi. Monitor chamber harus diposisikan pada posisi dimana pembacaannya tidak bergantung pada ketebalan dan posisi absorber,. Ini dilakukan untuk mencegah perbedaan yang disebabkan oleh variasi keluaran tabung sinar-x.



Gambar 3.6 Filter aluminium

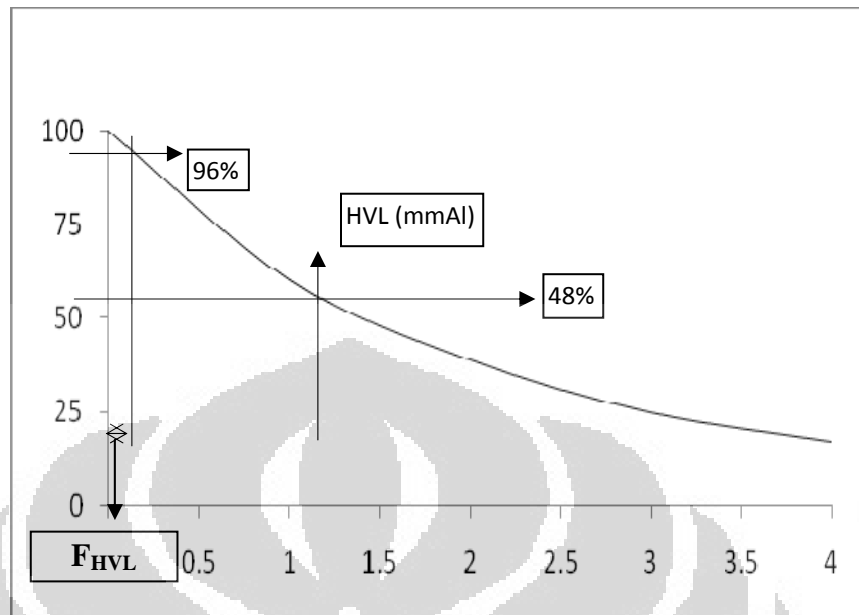
Ionization chamber harus ditempatkan pada posisi yang tetap untuk mengetahui nilai HVL yang dibutuhkan. Pada umumnya, posisi tersebut adalah posisi kalibrasi pada SSDL. Pada penelitian ini jarak detector ke pesawat sinar-x adalah 100 cm. Untuk pengukuran HVL detektor yang digunakan adalah detektor menggunakan *ionization chamber* karena mempunyai respon ketergantungan energinya kecil atau energy yang dapat diminimalisir.

### 3.3 Penentuan HVL dengan Added Filter

Dalam menentukan filter tambahan yang dibutuhkan dalam memperoleh nilai HVL pada rentang kualitas radiasi RQR memiliki prosedur adalah sebagai berikut :

- a) Apparatus pesawat sinar-x untuk pengukuran sudah terpasang lengkap.

- b) Mencatat suhu dan kelembaban ruang saat akan melakukan pengukuran. Pencatatan dilakukan tiga kali untuk melihat perubahannya, yaitu pagi saat awal melakukan pengukuran, siang, dan sore ketika pengukuran terakhir.
- c) Mengukur nilai *background*, yaitu melakukan exposure tanpa adanya filter dan shutter dalam keadaan tertutup. Pengukuran dilakukan sepuluh kali.
- d) Memplot kurva atenuasi untuk tegangan yang diukur, yaitu ketebalan filter aluminium mmAl terhadap persen atenuasi kuantitas yang terukur. Kurva ini diperoleh dari pengukuran 0 mmAl sebagai kuantitas awal tanpa filter, dan selanjutnya dengan menambahkan filter aluminium kelipatan 1 mmAl pada posisi  $F_{HVL}$  hingga diperoleh kuantitas terukur menjadi kurang dari 20% kuantitas semula. Untuk masing-masing kelipatan mmAl dilakukan 10 kali exposure.
- e) Memotong kurva sebesar mmAl untuk memperoleh added filter. Pemotongan dilakukan mendekati HVL kualitas radiasi yang diukur. Hal ini dilakukan selain untuk mempermudah pembacaan kurva, akan tetapi juga bertujuan untuk mempercepat pencapaian
- f) Setelah dipotong, maka dicari  $F_{HVL}$  nya. Kemudian menggambar kurva untuk memperoleh tambahan  $F_{HVL}$  mencapai kuantitas 100 % dari titik HVL. (lihat pada gambar 3.7)



Gambar 3.7 Contoh kurva untuk memperoleh  $F_{HVL}$

- g) Memplot kurva atenuasi kembali untuk memperoleh HVL sesuai TRS no. 457. Kurva dilakukan dengan memasang added filter yang telah diperoleh pada poin e dan  $F_{HVL}$  pada poin f. Pengukuran dilakukan seperti nomor 1 dan kurva seperti poin f. Maka akan diperoleh nilai HVL, apakah sudah berada pada posisi 50% atau belum, dengan toleransi  $\pm 2\%$ .
- h) Apabila nilai filter HVL yang diperoleh tidak mendekati 50% kualitas radiasi, maka harus dicari besar  $F_{HVL}$  yang dibutuhkan seperti pada gambar 3.2.
- i) Melakukan kembali langkah poin f dan g. Apabila HVL belum juga mendekati 50%, maka dilanjutkan kembali seperti langkah poin h. Begitu seterusnya hingga diperoleh persentase HVL mendekati 50% kualitas radiasi dengan toleransi  $\pm 2\%$ .
- j) Setelah memperoleh HVL sesuai TRS no. 457, maka dilanjutkan untuk masing-masing kV RQR lainnya.
- k)

### 3.4 Melakukan Verifikasi HVL

#### 3.4.1 Prosedur Menverifikasi HVL Menggunakan *Farmer*

Dalam memverifikasi HVL yang menggunakan *Farmer* 2571 membutuhkan tahap pengerjaan sebagai berikut :

- a) Apparatus verifikasi HVL terpasang lengkap
- b) Mencatat suhu dan kelembaban ruang pengukuran selama verifikasi berlangsung sebanyak tiga kali, yaitu ketika awal verifikasi, siang, dan sore saat verifikasi terakhir.
- c) Memasang *added filter* diposisinya, *added filter* disini adalah gabungan *added filter* dan  $F_{HVL}$  yang telah diperoleh dari pengukuran HVL. Kemudian melakukan paparan yang merupakan nilai paparan 100 %.
- d) Memasang filter aluminium sebesar nilai HVL RQR pada tabel 3.7 pada posisi  $F_{HVL}$  dan tetap membiarkan *added filter* pada posisi sebelumnya. Kemudian melakukan paparan untuk melihat apakah dihasilkan kuantitas 50% dari kuantitas sebelumnya.
- e) Jika belum, maka tambahkan atau kurangi *added filter* hingga kuantitas ketika  $F_{HVL}$  dipasangkan adalah 50 % dari kuantitas awalnya.
- f) Jika sudah mencapai 50 %, maka dilakukan kembali pembuatan kurva HVL untuk mendapatkan nilai  $HVL_2$  agar diperoleh koefisien homogenitas
- g) Melakukan hal yang sama untuk kualitas radiasi RQR berikutnya.

#### 3.4.2 Prosedur Memverifikasi HVL Menggunakan *Unfors*

Selain memverifikasi HVL menggunakan *Farmer*, dilakukan pula verifikasi menggunakan *Unfors* adalah untuk melihat perbandingan antara HVL referensi pada TRS no. 457 dengan HVL hasil verifikasi menggunakan *Unfors*. Untuk memperoleh HVL verifikasi, digunakan *added filter* yang



dihasilkan dari verifikasi HVL menggunakan farmer 2571. Setelah dipasangkan added filter, kemudian diberikan paparan sesuai kualitas radiasi RQR sehingga unfors akan mengukur HVL dari masing-masing tegangan kerja tabung sinar-x.

### 3.5 Memperoleh Faktor Koreksi ( $K_Q$ )

Dalam menentukan faktor koreksi dan faktor kalibrasi detektor digunakan prosedur kalibrasi dosimeter. Kali ini detektor yang digunakan ialah detektor bilik ionisasi Farmer NE 2571 sebagai detektor standar dan detektor Unfors sebagai detektor pembanding untuk mencari nilai korelasi terhadap perbedaan temperature dan tekanan, digunakan nilai faktor koreksi tekanan dan temperatur,  $K_{TP}$ . Untuk detektor semikonduktor,  $K_{TP} = 1$  sebagai nilai faktor koreksi.

$$k_{TP} = \frac{(273.2 + T) P_0}{(273.2 + T_0) P} \quad (3.1)$$

$P_0$  : referensi tekanan udara = 101.3 kPa

$T_0$  : referensi temperatur udara = 20°C

$P$  : tekanan terukur dalam ruang

$T$  : temperatur terukur dalam ruang

Penyinaran dilakukan 3 tahap, tahap yang pertama penyinaran diarahkan ke detektor Unfors selama 1 menit. Yang bertujuan untuk mencari lama waktu penyinaran yang dibutuhkan untuk mendapatkan dosis tertentu, dalam penelitian ini besar dosisnya 10 mGy. Setelah didapatkan waktu yang

dibutuhkan yang merupakan nilai rata-rata dari lima kali penyinaran, dilanjutkan dengan tahap yang kedua. Pada tahap ini penyinaran juga diarahkan ke detektor Unfors namun bertujuan untuk membandingkan antara dosis radiasi yang terukur dengan dosis radiasi yang terhitung (mGy). Lalu untuk tahap yang ketiga penyinaran diarahkan ke detektor bilik ionisasi Farmer NE 2571 untuk mendapatkan nilai faktor kalibrasi detektor bilik ionisasi Farmer NE 2571.

Dimana, melalui perhitungan faktor koreksi besarnya koefisien kalibrasi dari instrumen atau peralatan yang dikalibrasi dapat diperoleh persamaan :

$$N_{K,Q}^{user} = N_{K,Q}^{ref} \left( \frac{(Mk_{TP})_Q^{ref}}{(mk_{TP})_Q^{ref}} \right) \left( \frac{(mk_{TP})_Q^{user}}{(Mk_{TP})_Q^{user}} \right) \quad (3.3)$$

$N_{K,Q}^{(ref)}$  : Koefisien kalibrasi standar referensi

$N_{K,Q}^{(user)}$  : Koefisien kalibrasi instrumen yang dikalibrasi

M dan m : nilai yang terukur pada monitor chamber

$K_{TP}$  : faktor koreksi tekanan dan temperatur

### 3.6 Menghitung Ketidakpastian Pengukuran

Dalam menghitung ketidakpastian pengukuran dapat dilakukan terlebih dahulu dalam mencari standard deviasi pada nilai koreksi yang didapat melalui data penelitian dan menambahkan data yang didapat melalui sertifikat ataupun spesifikasi detector yang digunakan dalam hal ini yaitu detector *Farmer* sebagai detector yang terkalibrasi untuk melihat apakah nilai ketidakpastian yang terdapat pada sertifikat pada detector tersebut dapat digunakan sebagai input dalam menentukan nilai ketidakpastian pengukuran.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Data-data yang telah didapat dari kegiatan penelitian akan disajikan secara berurutan seperti langkah mendapatkan hasil ketidakpastian pengukuran yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, kemudian di evaluasi dan di analisa faktor-faktor kesalahannya untuk mendapatkan perkiraan (estimasi) ketidakpastian pengukurannya.

Berikut dibawah ini adalah data-data berdasarkan tahap kegiatan proses kalibrasi detector *Farmer*.

#### 4.1 Pengukuran HVL

Data pengukuran langsung dengan menggunakan detector *Farmer* 2571 dan perhitungan HVL untuk pesawat sinar-X dapat dilihat pada lampiran 1 dan nilai HVL hasil pengukuran langsung tertera pada Tabel 4.1, dapat dilihat sebagian besar nilai HVL hasil pengukuran, bahwa semakin besar nilai tegangan tabung sinar-x yang digunakan (kV) semakin besar pula filter yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai HVL tersebut, namun nilai persentase HVL yang didapat bervariasi disebabkan ketika melakukan percobaan dengan proses menambahkan filter (*Added filter*) yang besar nilainya akan sangat berdampak pada hasil persentase HVLnya atau dapat dikatakan nilai persentase HVLnya dapat lebih besar dari 50%.

Tabel 4.1 Nilai HVL pada tegangan (kV)

No	Kualitas Radiasi	Tegangan tabung sinar-x (kV)	Filter Inherent (mmAl)	Persentase HVL (%)	Added Filter (mmAl)	HVL (mmAl)
1	RQR 3	50	2	50	0.61	2.61
2	RQR 4	60	2	49.9	0.79	2.79
3	<b>RQR 5*</b>	<b>70</b>	<b>2</b>	<b>50</b>	<b>0.93</b>	<b>2.93</b>
4	RQR 6	80	3	50	0.1	3.01
5	RQR 7	90	3	50	0.23	3.23
6	RQR 8	100	3	50.05	0.45	3.45
7	RQR 9	120	3	49.87	0.72	3.72
8	RQR 10	150	4	49.75	0.26	4.26

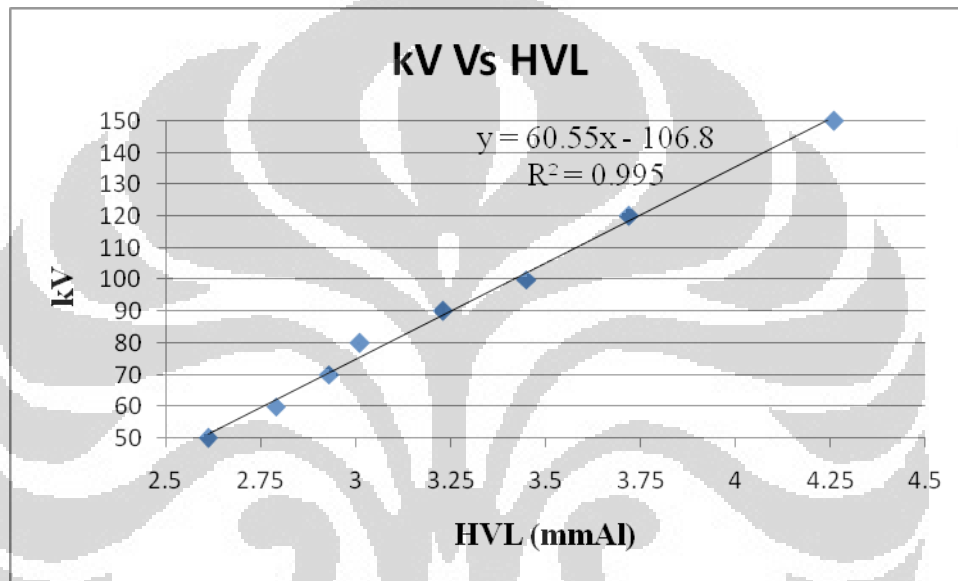
Nilai HVL dari percobaan di atas jika dibandingkan dengan nilai referensi pada **Technical Reports Series No. 457**, “*Dosimetry in Diagnostic Radiology: An International Code of Practice*” IAEA VIENNA, 2007 terdapat perbedaan. Perbedaan tersebut dikarenakan spesifikasi peralatan yang digunakan mungkin berbeda dan juga dapat disebabkan metode percobaan masih terdapat kesalahan pengerjaan (*human error*). Nilai yang di dapat dari percobaan tersebut lebih besar dari nilai HVL yang direferensikan, karena nilai referensi tersebut merupakan nilai HVL minimum untuk pesawat sinar-X. Dari hasil tersebut dapat dikatakan pesawat sinar-X masih layak digunakan dikarenakan masih dalam nilai batas toleransi keberterimaan alat. Pada tahap selanjutnya nilai HVL ini dicari kesesuaiannya dengan nilai koreksi pada alat.

Dari data dalam Tabel 4.1 terlihat perubahan nilai HVL sebanding dengan kV, dapat dilihat Grafik pada gambar 4.1 nilai HVL (mmAl) naik dengan kenaikan nilai kV, namun pada 50 kV nilai HVL yang didapat menurun mungkin diakibatkan oleh penentuan nilai filter yang

digunakan kurang tepat, dengan persamaan garis untuk kVp dan HVL hasil pengukuran adalah :

$$y = 60.55x - 106.8$$

dan nilai koefisien korelasi yang didapat adalah  $R^2 = 0,995$



Gambar 4.1 Grafik antara kV dan HVL

#### 4.2 Pengukuran Deviasi dari Nilai Koreksi (Nk)

Penelitian ini mengukur beberapa parameter untuk mendapatkan data pendukung terutama nilai yang mendukung dalam menentukan nilai ketidakpastian yaitu nilai koreksi alat pada tiap-tiap tegangan panel mulai dari 50 kV hingga 100 kV dengan menggunakan 2 (dua) detector yaitu detector *Farmer* (alat yang dikalibrasi) dan detector *Unfors* (acuan), dapat dilihat pada lampiran 1.

Hasil nilai koreksi pada tiap-tiap tegangan panel tersebut didapat melalui dosis yang diukur (mGy) oleh detector Farmer kemudian dibagi dengan bacaan koreksi (nC), bacaan koreksi didapat melalui factor koreksi suhu dan tekanan (Kt,p) dikalikan dengan bacaan (nC),

### 4.3 Evaluasi Ketidakpastian

#### 4.3.1 Detektor Farmer

Tegangan panel 50 kV:

T : 19,18 derajat celcius

P : 1008 mBar

Set time : 5 menit 6 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

43,061; 42,744; 42,962; 43,011; 42,954 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,947 mGy/nC

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (S) Nk} &= \sqrt{\sum(xi-x)^2 / (n-1)} \\ &= \left( (43,061-42,947)^2 / 4 + (42,744-42,947)^2 / 4 + \dots + (42,954-42,947)^2 / 4 \right) \\ &= 0,1213 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} &= (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\% \\ &= (0,1213/42,947) \times 100\% = \mathbf{0,3\%} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan pada tegangan yang lain dari 60 kV hingga 100 kV dapat dilihat pada lampiran 2. Namun secara keseluruhan hasil perhitungan deviasi yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Deviasi nilai koreksi tiap tegangan (kV) pada detektor farmer

Tegangan panel (kV)	Nilai koreksi (mGy/nC)	Deviasi (%)
50	42.946	0.3
60	42.573	0.4
70	42.346	0.5
80	42.344	0.1
90	42.275	0.4
100	42.445	0.4

Dari data diperoleh bahwa persentase deviasi yang merupakan kontribusi tambahan untuk peralatan yang dikalibrasi adalah berkisar antara 0,1% – 0,5%, hal ini menunjukkan bahwa alat tersebut masih stabil karena masih masuk pada nilai toleransi yaitu sebesar  $\pm 1\%$ .

Dikarenakan informasi yang didapat melalui sertifikat maka Ketidakpastian yang digunakan adalah ketidakpastian tipe B:

a. Detektor farmer :

Faktor kalibrasi udara,  $N_k$  untuk 50 kV = 1% dan 100 kV = 1% pada tingkat kepercayaan 95%,  $k= 2$ . Menunjukkan arti bahwa informasi yang diberikan sertifikat lengkap maka distribusinya adalah distribusi normal.

b. Suhu dan Tekanan : berdsarkan hasil percobaan dan melalui perhitungan menggunakan persamaan dibawah ini, didapat nilai ketidakpastian terhadap parameter ini yaitu:

$$k_{TP} = \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0}$$

Tegangan 50 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_0/T_0) \cdot 1/P$$

$$= (1013/20) \cdot 1/1008$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (-T \cdot P_0/T_0 \cdot P^2)$$

$$= -19.18 \cdot 1013/20 \cdot 1008$$

$$= 0.959$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{1.002 (0.005^2 + 0.959^2)}$$

$$= 0.961$$

Untuk perhitungan pada tegangan yang lain dapat dilihat pada lampiran 2.

Sehingga bila dihitung secara keseluruhan didapat nilai deviasi sebesar :

$$\text{Deviasi (S)} = \sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 / (n-1)}$$

$$= ((0.961-0.960)^2/5 + (0.96-0.960)^2/5 + \dots + (0.964-0.960)^2/5)$$

$$= 0,0039$$

$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)}_{T,P} = (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\%$$

$$= (0,0039/0.96) \times 100\% = 0,4 \%$$

- c. Kualitas radiasi : Dalam mendapatkan ketidakpastian kualitas radiasi, dihitung berdasarkan hasil HVL yang didapat melalui eksperimen dan referensi yang terdapat pada TRS No. 457, yaitu :



Tegangan 50 kv:

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 1.77$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 1.78$$

$$\text{HVL} = (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\%$$

$$= (1.77 - 1.78) / 1.78 * 100\%$$

$$= -0.57 \%$$

Untuk perhitungan pada tegangan yang lain dapat dilihat pada lampiran 2.

- d. Kerma rata-rata : Dalam mendapatkan ketidakpastian kualitas radiasi, dihitung berdasarkan nilai deviasi rata-rata pada perhitungan deviasi nilai koreksi, yaitu :

$$\text{Deviasi rata-rata} = (0.3\% + 0.4\% + 0.5\% + 0.1\% + 0.4\% + 0.4\%) / 6$$

$$= 0.35 \%$$

Bila berdasarkan informasi yang didapat melalui sertifikat kalibrasi detector farmer, maka didapatkanlah nilai ketidakpastian pada parameter-parameter lain yang berpengaruh peralatan, yaitu :

- e. Tegangan operasi x-ray sebesar 2 %
- f. Arus sebesar 2 %
- g. Stabilitas peralatan electrometer 2 %

Maka ketidakpastian gabungan terhadap semua parameter diatas pada tegangan 50 kv didapat hasil :

$$U_{\text{gab}} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2}$$

$$= \sqrt{1^2 + 0.57^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2}$$

$$= 3.69 \%$$

Dan apabila ketidakpastian gabungan tersebut digabungkan kembali dengan nilai deviasi masing-masing tegangan panel didapatkanlah nilai ketidakpastian gabungan relative, yaitu :

**Tegangan 50 kV :**

$$U_{rel} = \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2}$$

$$= \sqrt{0.3^2 + 3.69^2}$$

$$= 3.70 \%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{50} = 2 * 3.70\% =$

**7.4 %**

Namun, untuk perhitungan ketidakpastian pada tegangan yang lain dapat dilihat pada lampiran 2, dan bila secara diringkas hasil ketidakpastian yang didapat secara keseluruhan dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Ketidakpastian Detektor Farmer

(%)	Tegangan panel (kV)					
	50	60	70	80	90	100
<b>Faktor Kalibrasi</b>	1	1	1	1	1	1
Kualitas radiasi	0.57	0.46	0.78	0.33	1.46	0.51
Kerma rata-rata	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Tekanan & Suhu	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Arus	2	2	2	2	2	2
Operasi tegangan x-ray	2	2	2	2	2	2
Stabilitas peralatan elektrometer	2	2	2	2	2	2
Ketidakpatian gabungan relatif standar	3.69	3.67	3.73	3.66	3.93	3.68
Kontribusi tambahan untuk peralatan yang dikalibrasi	0.3	0.4	0.5	0.1	0.4	0.4
Ketidakpastian relatif untuk yang dikalibrasi (k=1)	3.70	3.695	3.760	3.661	3.946	3.70
Ketidakpastian relatif untuk yang dikalibrasi (k=2)	<b>7.40</b>	<b>7.39</b>	<b>7.52</b>	<b>7.32</b>	<b>7.89</b>	<b>7.40</b>

#### 4.3.2 Detektor Unfors

Tegangan panel 50 kV:

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.936; 42.639; 42.822; 42.837; 42.745 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,796 mGy/nC

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (S) Nk} &= \sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)} \\ &= ((42.936-42.796)^2/4 + (42.693-42,796)^2/4+... \\ &\quad +(42.745-42.796)^2/4) \\ &= 0,111 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} &= (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\% \\ &= (0,111/42.796) \times 100\% = \mathbf{0,25\%} \end{aligned}$$

Untuk perhitungan pada tegangan yang lain dari 60 kV hingga 100 kV dapat dilihat pada lampiran 2. Namun secara keseluruhan hasil perhitungan deviasi yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.4 Deviasi nilai koreksi tiap tegangan (kV) pada detektor unfors

Tegangan panel (kV)	Nilai koreksi (mGy/nC)	Deviasi (%)
50	42.946	0.25
60	42.573	0.39
70	42.346	0.24
80	42.344	0.08
90	42.275	0.04
100	42.445	0.1

Dikarenakan informasi yang didapat melalui sertifikat maka Ketidakpastian yang digunakan adalah ketidakpastian tipe B:

a. Detektor unfors :

Faktor kalibrasi udara adalah sebesar 5% pada tingkat kepercayaan 95%,  $k= 2$ .  
Menunjukkan arti bahwa informasi yang diberikan sertifikat lengkap maka distribusinya adalah distribusi normal.

b. Kualitas radiasi : Dalam mendapatkan ketidakpastian kualitas radiasi, dihitung berdasarkan hasil HVL yang didapat melalui eksperimen dan referensi yang terdapat pada TRS No. 457, yaitu :

Tegangan 50 kv:

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 1.77$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 1.78$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (1.77 - 1.78) / 1.78 * 100\% \\ &= -0.57\% \end{aligned}$$

Untuk perhitungan pada tegangan yang lain dapat dilihat pada lampiran 2.

c. Kerma rata-rata : Dalam mendapatkan ketidakpastian kualitas radiasi, dihitung berdasarkan nilai deviasi rata-rata pada perhitungan deviasi nilai koreksi, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Deviasi rata-rata} &= (0.25\% + 0.39\% + 0.24\% + 0.08\% + 0.04\% + 0.1\%) / 6 \\ &= 0.18\% \end{aligned}$$

Bila berdasarkan informasi yang didapat melalui sertifikat kalibrasi detector farmer, maka didapatkanlah nilai ketidakpastian pada parameter-parameter lain yang berpengaruh peralatan, yaitu :

d. Suhu dan Tekanan sebesar 0.4 %

e. Tegangan operasi x-ray sebesar 2 %

- f. Arus sebesar 2 %
- g. Stabilitas peralatan electrometer 2 %

Maka ketidakpastian gabungan terhadap semua parameter diatas pada tegangan 50 kv didapat hasil :

$$\begin{aligned}
 U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\
 &= \sqrt{5^2 + 0.57^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} \\
 &= 6.13 \%
 \end{aligned}$$

Dan apabila ketidakpastian gabungan tersebut digabungkan kembali dengan nilai deviasi masing-masing tegangan panel didapatkanlah nilai ketidakpastian gabungan relative, yaitu :

**Tegangan 50 kV :**

$$\begin{aligned}
 U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi})^2 + (U_{gab})^2} \\
 &= \sqrt{0.25^2 + 6.13^2} \\
 &= 6.13 \%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1
 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{50} = 2 * 6.13\% = 12.26 \%$

Namun, untuk perhitungan ketidakpastian pada tegangan yang lain dapat dilihat pada lampiran 2, dan bila secara diringkas hasil ketidakpastian yang didapat secara keseluruhan dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Ketidakpastian Detektor Unfors

( <b>%</b> )	<b>Tegangan panel (kV)</b>					
	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>70</b>	<b>80</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
<b>Faktor Kalibrasi</b>	5	5	5	5	5	5
<b>Kualitas radiasi</b>	0.57	0.46	0.78	0.33	1.46	0.51
<b>Kerma rata-rata</b>	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
<b>Tekanan &amp; Suhu</b>	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
<b>Arus</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Operasi tegangan x-ray</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Stabilitas peralatan elektrometer</b>	2	2	2	2	2	2
<b>Ketidakpatian gabungan relatif standar</b>	6.13	6.12	6.15	6.11	6.27	6.12
<b>Kontribusi tambahan untuk peralatan yang dikalibrasi</b>	0.25	0.39	0.24	0.08	0.04	0.10
<b>Ketidakpastian relatif untuk yang dikalibrasi (k=1)</b>	6.13	6.128	6.153	6.108	6.271	6.12
<b>Ketidakpastian relatif untuk yang dikalibrasi (k=2)</b>	<b>12.26</b>	<b>12.26</b>	<b>12.31</b>	<b>12.22</b>	<b>12.54</b>	<b>12.24</b>

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini, diperoleh beberapa kesimpulan antara lain :

1. Pada hasil ketidakpastian yang didapat pada detektor farmer dan detektor unfors pada tegangan 50 kV-100 kV, detektor unfors menghasilkan ketidakpastian yang lebih besar yaitu berkisar 12% (12.22%-12.54%) daripada detektor farmer yang berkisar 7 % (7.32%-7.89%).
2. Ketidakpastian detektor unfors yang lebih besar daripada detektor farmer, karena detektor unfors memiliki ketergantungan terhadap energi besar.
3. Pengaruh dari arus, operasi tegangan x-ray dan stabilitas elektrometer masih mungkin dapat dicari ketidakpastiannya, ketidakpastian sebesar 2 % hanya didasarkan pada hasil spesifikasi alat.

#### 5.2 Saran

1. Diharapkan dalam mengevaluasi ketidakpastian, harus terlebih dahulu mengidentifikasi sumber-sumber yang dapat mempengaruhi ketidakpastian, dikarenakan melalui identifikasi tersebut kita mendapatkan informasi yang akurat seperti adanya sertifikat kalibrasi ataupun spesifikasi peralatan sehingga dapat dengan mudah mengevaluasinya, selain melalui pengukuran atau perhitungan.
2. Alat pengontrol seperti pada arus, operasi tegangan x-ray dan stabilitas elektrometer diharapkan tersedia dan digunakan karena ketidakpastian yang didapat hanya berdasarkan spesifikasi alat .



## DAFTAR ACUAN

1. **E.B. Podgorsak**, "*Radiation Oncology Physics: A Handbook of Teachers and Students*", IAEA, Vienna, Austria, 2005.
2. **Technical Report Series No. 457**, "*Dosimetry in Diagnostic Radiology*", IAEA, Vienna, Austria, 2007.
3. **F.M. Khan**, "*The Physics of Radiation Therapy*", William & Wilkins, Baltimore, USA, 1984.
4. **C. Herman**, "*Introduction to Health Physics*", Pergamon Press Inc, Northwestern University, USA, 1983.
5. **Harold E Johns, & John R Cunningham**, "*The Physics of Radiology*," 4<sup>th</sup> ed, Charles C Thomas Publisher, Illionis, 1983.
6. **Instruction Manual**, "*Ionisation Chamber Type 2571*", Nuclear Enterprises Limited, Jerman, 1984.
7. **International Electrotechnical Commission (IEC) 61267**. "*Medical Diagnostic X-Ray Equipment – Radiation conditions for use in the determination of characteristics*," 2<sup>nd</sup> ed, 2005

LAMPIRAN 1.

Hasil Pengukuran dan Verifikasi HVL

kv panel (kv)	kV ukur (kvp)	laju dosis (mGy/s)	dosis (mGy)	waktu	
				(s)	(menit)
50	49.58	0.327	100	305.55	5.09
	49.57	0.327	100	305.66	5.09
	49.65	0.327	100	305.71	5.10
	49.64	0.327	100	306.13	5.10
	49.59	0.327	100	306.06	5.10
<b>rata2</b>	<b>49.60</b>	<b>0.33</b>	<b>100.00</b>	<b>305.82</b>	<b>5.10</b>
60	59.47	0.418	100	239.00	3.98
	59.48	0.419	100	238.76	3.98
	59.34	0.419	100	238.71	3.98
	59.49	0.419	100	238.77	3.98
	59.32	0.418	100	239.00	3.98
<b>rata2</b>	<b>59.42</b>	<b>0.42</b>	<b>100.00</b>	<b>238.85</b>	<b>3.98</b>
70	70.20	0.596	100	167.84	2.80
	70.32	0.595	100	167.97	2.80
	70.03	0.595	100	168.02	2.80
	70.10	0.596	100	167.84	2.80
	70.11	0.596	100	167.88	2.80
	70.18	0.595	100	167.94	2.80
<b>rata2</b>	<b>70.16</b>	<b>0.60</b>	<b>100.00</b>	<b>167.92</b>	<b>2.80</b>
80	80.60	0.703	100	142.19	2.37
	80.49	0.704	100	142.07	2.37
	80.65	0.704	100	142.06	2.37
	80.30	0.704	100	142.12	2.37
	80.56	0.704	100	142.08	2.37
<b>rata2</b>	<b>80.52</b>	<b>0.704</b>	<b>100.00</b>	<b>142.10</b>	<b>2.37</b>
90	90.99	0.842	100	118.73	1.98
	90.83	0.843	100	118.69	1.98
	90.96	0.842	100	118.71	1.98
	90.70	0.842	100	118.82	1.98
	90.94	0.842	100	118.71	1.98
<b>rata2</b>	<b>90.89</b>	<b>0.84</b>	<b>100.00</b>	<b>118.73</b>	<b>1.98</b>
100	101.55	1.022	100	97.86	1.63
	101.48	1.022	100	97.87	1.63
	100.98	1.022	100	97.87	1.63
	100.99	1.021	100	97.95	1.63
	101.03	1.021	100	97.99	1.63
<b>rata2</b>	<b>101.21</b>	<b>1.02</b>	<b>100.00</b>	<b>97.91</b>	<b>1.63</b>

## UNFORS

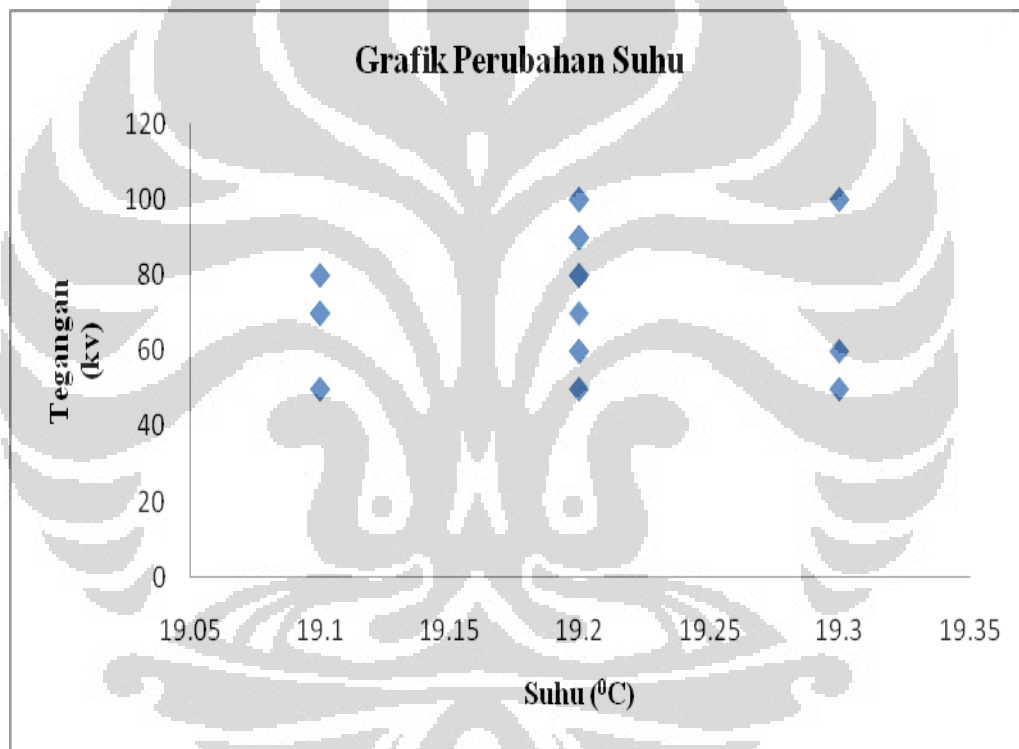
kv panel kv	kV ukur kvp	laju dosis (mGy/s)	waktu (menit)	(s)	Dosis Hit (mGy)	Dosis ukur (mGy)	deviasi	Nk
50	49.53	0.327	5	6	100.081	100.374	0.29%	42.936
	49.51	0.327	5	6	100.211	100.456	0.24%	42.639
	49.51	0.327	5	6	100.211	100.538	0.33%	42.822
	49.51	0.327	5	6	100.211	100.620	0.41%	42.837
	49.51	0.327	5	6	100.211	100.702	0.49%	42.745
	<b>49.51</b>	<b>0.33</b>	<b>5.00</b>	<b>6.00</b>	<b>100.19</b>	<b>100.54</b>	<b>0.351%</b>	<b>42.796</b>
60	59.36	0.419	3	59	100.0454	100.031	-0.01%	42.737
	59.47	0.419	3	59	100.1594	100.067	-0.09%	42.436
	59.47	0.419	3	59	100.1594	100.067	-0.09%	42.800
	59.47	0.419	3	59	100.1594	100.067	-0.09%	42.617
	59.47	0.419	3	59	100.1594	100.067	-0.09%	42.436
	<b>59.44</b>	<b>0.42</b>	<b>3.00</b>	<b>59.00</b>	<b>100.14</b>	<b>100.06</b>	<b>-0.077%</b>	<b>42.605</b>
70	70.12	0.596	2	48	100.0445	<b>99.988</b>	-0.06%	42.334
	70.27	0.595	2	48	99.97495	<b>99.974</b>	0.00%	42.409
	70.20	0.595	2	48	99.94118	<b>100.579</b>	0.63%	42.394
	70.17	0.595	2	48	100.0025	<b>99.985</b>	-0.02%	42.153
	70.07	0.595	2	48	99.92052	<b>99.972</b>	0.05%	42.386
	70.26	0.597	2	48	100.2228	<b>99.972</b>	-0.25%	42.245
	<b>70.18</b>	<b>0.60</b>			<b>100.02</b>	<b>100.08</b>	<b>0.06%</b>	<b>42.317</b>
80	80.63	0.704	2	22	99.96289	99.955	-0.01%	42.347
	80.63	0.704	2	22	100.0318	99.991	-0.04%	42.376
	80.63	0.704	2	22	100.0318	99.991	-0.04%	42.391
	80.63	0.704	2	22	100.0318	99.991	-0.04%	42.301
	80.63	0.704	2	22	100.0318	99.991	-0.04%	42.376
	<b>78.89</b>	<b>0.69</b>	<b>2.00</b>	<b>22.00</b>	<b>100.02</b>	<b>100.00</b>	<b>-0.034%</b>	<b>42.358</b>
90	90.78	0.843	1	59	100.2682	101.088	0.81%	42.208
	90.79	0.842	1	59	100.1623	100.261	0.10%	42.164
	90.79	0.842	1	59	100.1623	100.261	0.10%	42.164
	90.79	0.842	1	59	100.1623	100.261	0.10%	42.164
	90.79	0.842	1	59	100.1623	100.261	0.10%	42.164
	<b>90.79</b>	<b>0.84</b>	<b>1.00</b>	<b>59.00</b>	<b>100.18</b>	<b>100.43</b>	<b>0.241%</b>	<b>42.173</b>

100	101.69	1.021	1	38	100.0296	100.108	0.08%	42.099
	101.24	1.020	1	38	100.0012	101.120	1.11%	42.087
	101.24	1.020	1	38	100.0012	101.120	1.11%	42.101
	101.24	1.020	1	38	100.0012	101.120	1.11%	42.013
	101.24	1.020	1	38	100.0012	101.120	1.11%	42.013
	<b>101.33</b>	<b>1.02</b>	<b>1.00</b>	<b>38.00</b>	<b>100.01</b>	<b>100.92</b>	<b>0.901%</b>	<b>42.062</b>

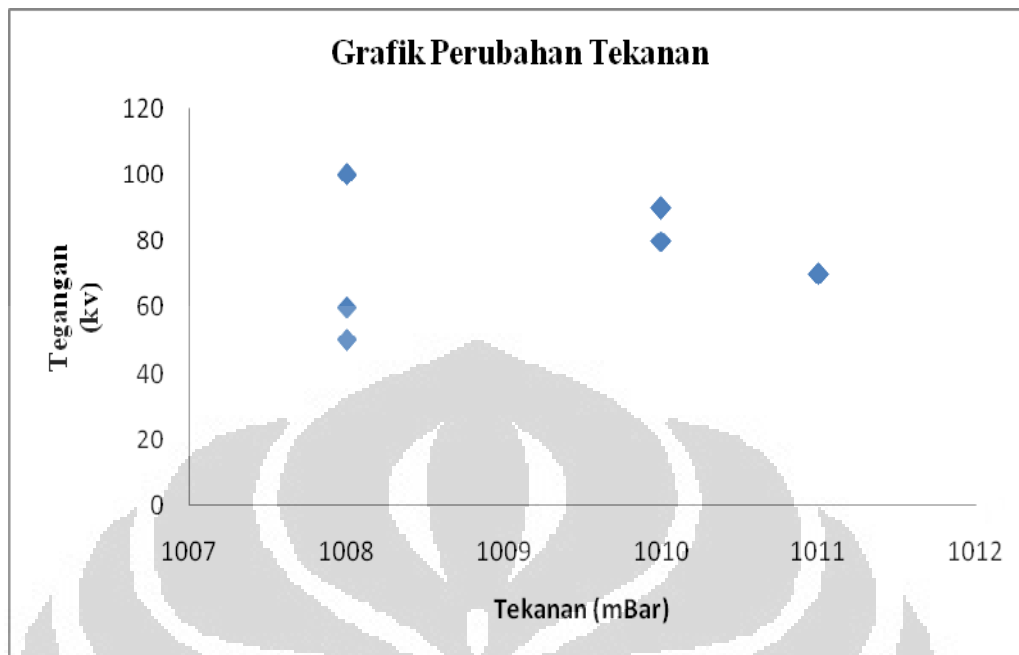
## FARMERS

Suhu (oC)	Tekanan (mBar)	Kp,t	bacaan (nC)	Bacaan Corr (nC)	Nk	Nk farmer UNFORS ref	rel	Dosis Farmer (mGy)	Nk unfors farmer ref
19.3	1008	1.003	2.325	2.331	43.061	43.77	0.984	102.026	1.016
19.2	1008	1.002	2.345	2.350	42.744	43.77	0.977	102.868	1.024
19.2	1008	1.002	2.335	2.340	42.962	43.77	0.982	102.430	1.019
19.1	1008	1.002	2.335	2.339	43.011	43.77	0.983	102.395	1.018
19.1	1008	1.002	2.34	2.344	42.954	43.77	0.981	102.614	1.019
<b>19.180</b>	<b>1008.000</b>	<b>1.002</b>	<b>2.336</b>	<b>2.341</b>	<b>42.946</b>	<b>43.770</b>	<b>0.981</b>	<b>102.466</b>	<b>1.019</b>
19.3	1008	1.003	2.335	2.341	42.730	43.440	0.984	101.692	1.017
19.2	1008	1.002	2.355	2.360	42.397	43.440	0.976	102.528	1.025
19.2	1008	1.002	2.335	2.340	42.760	43.440	0.984	101.657	1.016
19.2	1008	1.002	2.345	2.350	42.578	43.440	0.980	102.093	1.020
19.2	1008	1.002	2.355	2.360	42.397	43.440	0.976	102.528	1.025
<b>19.220</b>	<b>1008.000</b>	<b>1.002</b>	<b>2.345</b>	<b>2.350</b>	<b>42.573</b>	<b>43.440</b>	<b>0.980</b>	<b>102.100</b>	<b>1.020</b>
19.2	1011	0.999	2.365	2.363	42.310	42.930	0.986	101.453	1.015
19.1	1011	0.999	2.360	2.357	42.408	42.930	0.988	101.204	1.012
19.1	1011	0.999	2.360	2.357	42.665	42.930	0.994	101.204	1.006
19.1	1011	0.999	2.375	2.372	42.145	42.930	0.982	101.847	1.019
19.1	1011	0.999	2.360	2.357	42.407	42.930	0.988	101.204	1.012
19.1	1011	0.999	2.375	2.372	42.140	42.930	0.982	101.847	1.019
<b>19.117</b>	<b>1011.000</b>	<b>0.999</b>	<b>2.366</b>	<b>2.363</b>	<b>42.346</b>	<b>42.930</b>	<b>0.986</b>	<b>101.460</b>	<b>1.014</b>
19.2	1010	1.000	2.360	2.361	42.344	42.500	0.996	100.323	1.004
19.2	1010	1.000	2.360	2.361	42.359	42.500	0.997	100.323	1.003
19.1	1010	1.000	2.360	2.360	42.373	42.500	0.997	100.289	1.003
19.1	1010	1.000	2.365	2.365	42.284	42.500	0.995	100.502	1.005
19.2	1010	1.000	2.360	2.361	42.359	42.500	0.997	100.323	1.003
<b>19.160</b>	<b>1010.000</b>	<b>1.000</b>	<b>2.361</b>	<b>2.361</b>	<b>42.344</b>	<b>42.500</b>	<b>0.996</b>	<b>100.352</b>	<b>1.004</b>
19.2	1010	1.000	2.375	2.376	42.553	42.300	1.006	100.486	0.994
19.2	1010	1.000	2.375	2.376	42.205	42.300	0.998	100.486	1.002

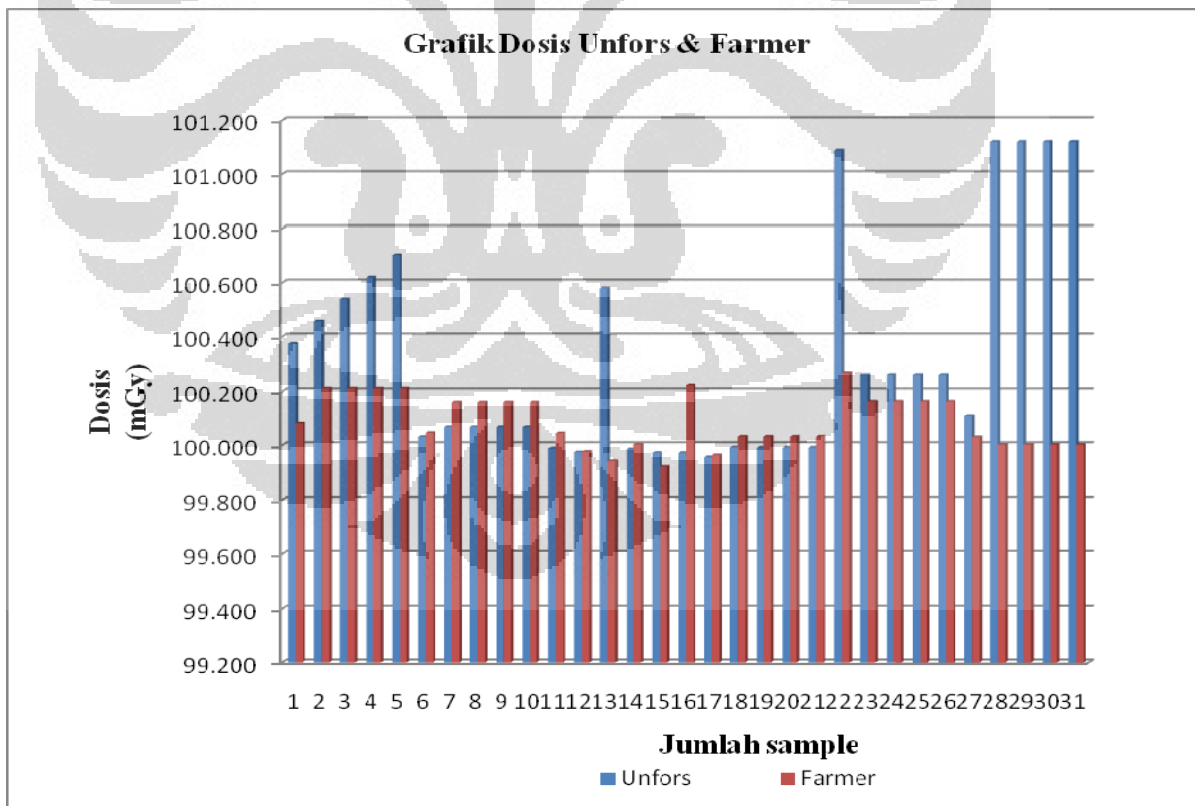
19.2	1010	1.000	2.375	2.376	42.205	42.300	0.998	100.486	1.002
19.2	1010	1.000	2.375	2.376	42.205	42.300	0.998	100.486	1.002
19.2	1010	1.000	2.375	2.376	42.205	42.300	0.998	100.486	1.002
<b>19.200</b>	<b>1010.000</b>	<b>1.000</b>	<b>2.375</b>	<b>2.376</b>	<b>42.275</b>	<b>42.300</b>	<b>0.999</b>	<b>100.486</b>	<b>1.001</b>
19.3	1008	1.003	2.370	2.376	42.132	41.970	1.004	99.724	0.996
19.3	1008	1.003	2.370	2.376	42.558	41.970	1.014	99.724	0.986
19.2	1008	1.002	2.370	2.375	42.572	41.970	1.014	99.690	0.986
19.2	1008	1.002	2.375	2.380	42.483	41.970	1.012	99.900	0.988
19.2	1008	1.002	2.375	2.380	42.483	41.970	1.012	99.900	0.988
<b>19.240</b>	<b>1008.000</b>	<b>1.002</b>	<b>2.372</b>	<b>2.378</b>	<b>42.445</b>	<b>41.970</b>	<b>1.011</b>	<b>99.787</b>	<b>0.989</b>



Grafik perubahan suhu terhadap perubahan tegangan



**Grafik perubahan tekanan terhadap perubahan tegangan**



**Grafik Perbandingan Dosis Unfors dan Farmer**

## LAMPIRAN 2.

### Detektor Farmer

Perhitungan deviasi dari nilai koreksi (Nk) tiap tegangan panel.

#### **Tegangan panel 60 kV:**

T : 19,22 derajat celcius

P : 1008 mBar

Set time : 3 menit 59 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi

(Nk):

42,730; 42,397; 42,760; 43,578; 42,397 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,573 mGy/nC

Deviasi (S) Nk =  $\sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$

$$= ((42,730-42.573)^2/4 + (42,397-42,573)^2/4+...+(42,397-42.573)^2/4)$$

$$= 0,1744$$

Relatif Standar Deviasi (RSD) =  $(S/x_{rata-rata}) \times 100\%$

$$= (0,1744/42.573) \times 100\% = \mathbf{0,4\%}$$

#### **Tegangan panel 70 kV:**

T : 19,12 derajat celcius

P : 1011 mBar

Set time : 2 menit 48 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 6 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi

(Nk):

42,310; 42,408; 42,665; 43,145; 42,407; 42.140 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,346 mGy/nC

Deviasi (S) Nk =  $\sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$

$$= ((42,310-42.346)^2/5 + (42,408-42, 346)^2/5+...+(42,140-42. 346)^2/5)$$

$$= 0,1968$$

Relatif Standar Deviasi (RSD) =  $(S/x_{rata-rata}) \times 100\%$

$$= (0,1968/42.345) \times 100\% = \mathbf{0,5\%}$$

**Tegangan panel 80 kV:**

T : 19,16 derajat celcius

P : 1010 mBar

Set time : 2 menit 22 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi

(Nk):

42,344; 42,359; 42,373; 43,284; 42,359 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,344 mGy/nC

Deviasi (S) Nk =  $\sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$

$$= ((42,344-42.344)^2/4 + (42,359-42,344)^2/4+\dots+(42,359-42.344)^2/4)$$

$$= 0,0351$$

Relatif Standar Deviasi (RSD) =  $(S/x_{rata-rata}) \times 100\%$

$$= (0,0351/42.344) \times 100\% = \mathbf{0,1\%}$$

**Tegangan panel 90 kV:**

T : 19,2 derajat celcius

P : 1010 mBar

Set time : 5 menit 6 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi

(Nk):

42,553; 42,205; 42,205; 42,205; 42,205 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,275 mGy/nC

Deviasi (S) Nk =  $\sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$

$$= ((42,553-42.275)^2/4 + (42,205-42,275)^2/4+\dots+(42,205-42.275)^2/4)$$

$$= 0,1557$$



$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} = (\mathbf{S/x_{rata-rata}}) \times \mathbf{100\%}$$

$$= (0,1557/42.275) \times 100\% = \mathbf{0,4\%}$$

### **Tegangan panel 100 kV:**

T : 19,24derajat celcius

P : 1008 mBar

Set time : 1 menit 38 sekon

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi

(Nk):

42,132; 42,558; 42,572; 43,483; 42, 483 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,445 mGy/nC

$$\text{Deviasi (S) Nk} = \sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$$

$$= ((42,132-42.445)^2/4 + (42,572-42,445)^2/4+...+(42,483-42.445)^2/4)$$

$$= 0,1802$$

$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} = (\mathbf{S/x_{rata-rata}}) \times \mathbf{100\%}$$

$$= (0,1802/42.445) \times 100\% = \mathbf{0,4\%}$$

### Perhitungan ketidakpastian suhu dan tekanan :

Tegangan 60 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_o/T_o) * 1/P$$

$$= (1013/20) * 1/1008$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (- T * P_o / T_o * P^2)$$

$$= -19.22 * 1013 / 20 * 1008$$

$$= 0.96$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{1.002 (0.005^2 + 0.96^2)}$$

$$= 0.96$$

Tegangan 70 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_o/T_o) * 1/P$$

$$= (1013/20) * 1/1011$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (- T * P_o / T_o * P^2)$$

$$= -19.12 * 1013 / 20 * 1011$$

$$= 0.956$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{0.99 (0.005^2 + 0.956^2)}$$

$$= 0.963$$

Tegangan 80 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_o/T_o) * 1/P$$

$$= (1013/20) * 1/1010$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (- T * P_o / T_o * P^2)$$

$$= -19.16 * 1013 / 20 * 1010$$

$$= 0.958$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{1 (0.005^2 + 0.958^2)}$$

$$= 0.953$$

Tegangan 90 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_o/T_o) * 1/P$$

$$= (1013/20) * 1/1010$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (- T * P_o / T_o * P^2)$$

$$= -19.20 * 1013 / 20 * 1010$$

$$= 0.961$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{1 (0.005^2 + 0.961^2)}$$

$$= 0.961$$

Tegangan 100 kV :

$$\partial k / \partial T = (P_o/T_o) * 1/P$$

$$= (1013/20) * 1/1008$$

$$= 0.05$$

$$\partial k / \partial P = (- T * P_o / T_o * P^2)$$

$$= -19.24 * 1013 / 20 * 1008$$

$$= 0.962$$

$$\delta k_{TP} = \sqrt{k_{TP} (\partial k / \partial T)^2 + k_{TP} (\partial k / \partial P)^2}$$

$$= \sqrt{1.002 (0.005^2 + 0.962^2)}$$
$$= 0.964$$

Besar kualitas radiasi pada masing-masing tegangan :

**Tegangan 60 kv:**

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 2.2$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 2.19$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (2.2 - 2.19) / 2.19 * 100\% \\ &= \mathbf{0.46\%} \end{aligned}$$

**Tegangan 70 kv:**

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 2.56$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 2.58$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (2.56 - 2.58) / 2.58 * 100\% \\ &= \mathbf{-0.78\%} \end{aligned}$$

**Tegangan 80 kv:**

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 3$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 3.01$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (3 - 3.01) / 3.01 * 100\% \\ &= \mathbf{-0.33\%} \end{aligned}$$

**Tegangan 90 kv:**

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 3.43$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 3.48$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (3.43 - 3.48) / 3.48 * 100\% \\ &= -1.46\% \end{aligned}$$

**Tegangan 100 kv:**

$$\text{HVL}_{\text{exp}} = 3.95$$

$$\text{HVL}_{\text{ref}} = 3.97$$

$$\begin{aligned} \text{HVL} &= (\text{HVL}_{\text{exp}} - \text{HVL}_{\text{ref}}) / \text{HVL}_{\text{ref}} * 100\% \\ &= (3.95 - 3.97) / 3.97 * 100\% \\ &= -0.51\% \end{aligned}$$

**Perhitungan ketidakpastian pada masing-masing tegangan:**

**Tegangan 60 kV :**

$$\begin{aligned} U_{\text{gab}} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{1^2 + 0.46^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= 3.67\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{\text{rel}} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{\text{gab}})^2} \\ &= \sqrt{0.4^2 + 3.67^2} \\ &= 3.695\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{60} = 2 * 3.695\% = 7.39\%$

### Tegangan 70 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\&= \sqrt{1^2 + 0.78^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2} \\&= \mathbf{3.73 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\&= \sqrt{0.5^2 + 3.73^2} \\&= 3.760 \%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{70} = 2 * 3.760\% = 7.52\%$

### Tegangan 80 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\&= \sqrt{1^2 + 0.33^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2} \\&= \mathbf{3.66 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\&= \sqrt{0.1^2 + 3.66^2} \\&= 3.661\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{80} = 2 * 3.661\% = 7.32\%$

**Tegangan 90 kV :**

$$\begin{aligned} U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{1^2 + 1.46^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= 3.93\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.4^2 + 3.93^2} \\ &= 3.946\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{90} = 2 * 3.946\% = 7.89\%$

**Tegangan 100 kV :**

$$\begin{aligned} U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{1^2 + 0.51^2 + 0.35^2 + 0.4^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= 3.68\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.4^2 + 3.68^2} \\ &= 3.70\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1 \end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{100} = 2 * 3.70\% = 7.4 \%$ .

### Detektor Unfors

Perhitungan deviasi dari nilai koreksi (Nk) tiap tegangan panel.

#### **Tegangan panel 60 kV:**

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.737; 42.436; 42.800; 42.617; 42.436 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42.605 mGy/nC

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (S) Nk} &= \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \\ &= \sqrt{((42,737-42.605)^2/4 + (42,436-42.605)^2/4 + \dots \\ &\quad + (42,397-42.436)^2/4)} \\ &= 0.168 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} &= (\text{S}/\bar{x}_{\text{rata-rata}}) \times 100\% \\ &= (0,168/42.605) \times 100\% = 0,39 \% \end{aligned}$$

#### **Tegangan panel 70 kV:**

Pengambilan data dilakukan sebanyak 6 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.334; 42.409; 42.394; 42.153; 42.386; 42.245 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,320 mGy/nC

$$\begin{aligned} \text{Deviasi (S) Nk} &= \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 / (n-1)} \\ &= \sqrt{((42.334-42.320)^2/5 + (42.409-42.320)^2/5 + \dots \\ &\quad + (42.245 -42.320)^2/5)} \\ &= 0,102 \end{aligned}$$



$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} = (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\%$$

$$= (0,102/42.320) \times 100\% = \mathbf{0,24\%}$$

### **Tegangan panel 80 kV:**

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.347; 42.376; 42.391; 42.301; 42.376 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,358 mGy/nC

$$\text{Deviasi (S) Nk} = \sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$$

$$= ((42.347-42.358)^2/4 + (42.376-42.358)^2/4+... \\ +(42.376 -42.358)^2/4)$$

$$= 0,036$$

$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} = (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\%$$

$$= (0,036/42.358) \times 100\% = \mathbf{0,08\%}$$

### **Tegangan panel 90 kV:**

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.208; 42.164; 42.164; 42.164; 42.164mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,173 mGy/nC

$$\text{Deviasi (S) Nk} = \sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$$

$$= ((42.208-42,173)^2/4 + (42.164-42,173)^2/4+... \\ +(42.164-42,173)^2/4)$$

$$= 0,019$$

$$\text{Relatif Standar Deviasi (RSD)} = (S/x_{\text{rata-rata}}) \times 100\%$$

$$= (0,019/42.173) \times 100\% = \mathbf{0,04\%}$$

### Tegangan panel 100 kV:

Pengambilan data dilakukan sebanyak 5 kali dan menghasilkan bacaan nilai koreksi (Nk):

42.099; 42.087; 42.101; 42.013; 42.013 mGy/nC

Rerata nilai koreksi, Nk = 42,062 mGy/nC

Deviasi (S) Nk =  $\sqrt{\Sigma(xi-x)^2 / (n-1)}$

$$\begin{aligned} &= ((42.099-42.445)^2/4+(42.087-42,445)^2/4+... \\ &\quad +(42.013-42.445)^2/4) \\ &= 0.046 \end{aligned}$$

Relatif Standar Deviasi (RSD) =  $(S/x_{rata-rata}) \times 100\%$

$$= (0.046/42,062) \times 100\% = \mathbf{0,1\%}$$

### Perhitungan ketidakpastian pada masing-masing tegangan:

#### Tegangan 60 kV :

$$U_{gab} = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2}$$

$$= \sqrt{5^2 + 0.46^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2}$$

$$= \mathbf{6.12\%}$$

$$U_{rel} = \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2}$$

$$= \sqrt{0.39^2 + 6.12^2}$$

$$= 6.128\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{70} = 2 * 6.128\% = \mathbf{12.26\%}$

### Tegangan 70 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 0.78^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= \mathbf{6.15 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.24^2 + 6.15^2} \\ &= 6.153 \%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{60} = 2 * 6.153\% = \mathbf{12.31 \%}$

### Tegangan 80 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 0.33^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= \mathbf{6.11 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.08^2 + 6.11^2} \\ &= 6.108\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{80} = 2 * 6.108\% = \mathbf{12.22\%}$

### Tegangan 90 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 1.46^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= \mathbf{6.27 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.04^2 + 6.27^2} \\ &= 6.271\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{90} = 2 * 6.271\% = \mathbf{12.54\%}$

### Tegangan 100 kV :

$$\begin{aligned}U_{gab} &= \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + \dots + U_h^2} \\ &= \sqrt{5^2 + 0.51^2 + 0.18^2 + 0.4^2 + 2^2 + 2^2 + 2^2} \\ &= \mathbf{6.12 \%}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}U_{rel} &= \sqrt{(\text{deviasi}^2) + (U_{gab})^2} \\ &= \sqrt{0.1^2 + 6.12^2} \\ &= 6.12\%, \text{ pada tingkat kepercayaan } 68.7\%, k=1\end{aligned}$$

Sehingga didapatkanlah nilai ketidakpastian relative untuk yang dikalibrasi pada tegangan tersebut diatas dengan tingkat kepercayaan 95%, k=2 yaitu sebesar  $U_{100} = 2 * 6.12\% = \mathbf{12.24 \%}$ .