

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

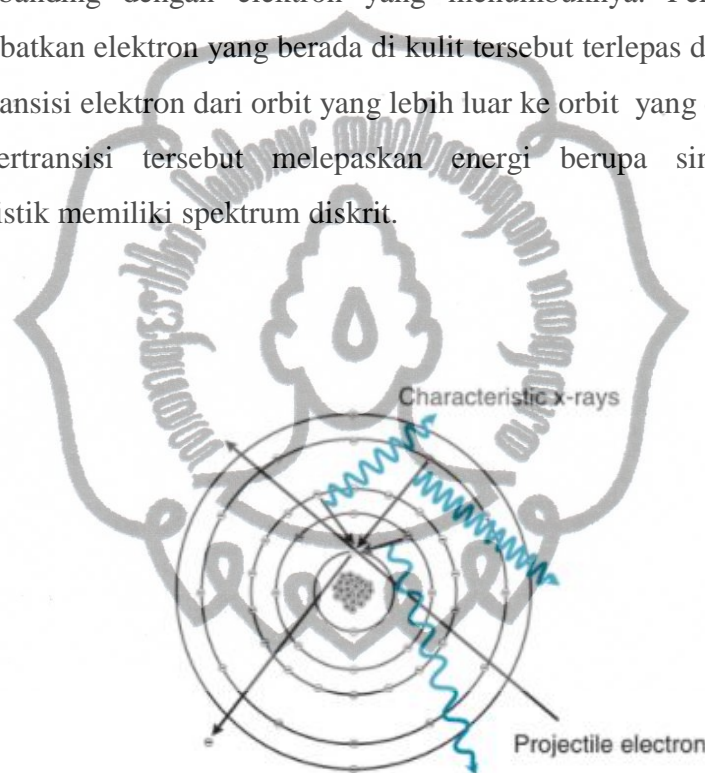
2.1 Sinar-X

Sinar-X merupakan gelombang elektromagnetik sejenis dengan gelombang radio, panas, cahaya dan sinar ultraviolet yang mempunyai panjang gelombang sangat pendek ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$), sehingga mempunyai daya tembus tinggi. Sinar-X pertama kali ditemukan pada tahun 1895 oleh seorang sarjana fisika yaitu Wilhelm Conrad Rontgen. Foton sinar-X dihasilkan ketika elektron yang berasal dari katoda berkecepatan tinggi menumbuk target pada anoda. Elektron dari katoda berasal dari pemanasan filamen mencapai suhu lebih dari 2000°C yang mengakibatkan terbentuknya awan elektron pada filament ini. Dengan tegangan tinggi antara katoda dan anoda, elektron dari katoda akan bergerak cepat menumbuk bidang anoda. Dari hasil tumbukan tersebut menghasilkan 1% foton sinar-X dan sisanya 90% merupakan energi panas (Rasad dkk, 1999). Sinar-X tidak terlihat, tidak dapat dibelokkan oleh medan magnet, tidak dapat difokuskan dengan lensa, hanya dapat dibelokkan setelah menembus logam atau benda padat, mempunyai frekuensi yang tinggi, dan dapat bereaksi dengan film sehingga menghasilkan gambar atau citra ketika paparan terjadi.

Sinar-X yang dipancarkan oleh tabung sinar-X merupakan pancaran foton yang berasal dari interaksi elektron dengan inti atom di anoda. Besar energi dari sinar-X ditentukan oleh beda tegangan antara katoda dan anoda. Foton tiap satuan luas disebut dengan penyinaran (*exposure*). Berdasarkan proses terjadinya, sinar-X dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu, (Pasinringi, 2012)

1. Sinar-X Karakteristik

Sinar-X karakteristik merupakan proses terjadinya perpindahan elektron akibat peristiwa eksitasi saat menumbuk target sehingga memancarkan energi yang berbentuk gelombang elektromagnetik dengan waktu yang singkat. Sinar-X karakteristik terjadi ketika elektron dengan energi kinetik lebih tinggi berinteraksi dengan elektron di setiap kulit atom yang memiliki energi lebih kecil dibanding dengan elektron yang menumbuknya. Peristiwa tersebut mengakibatkan elektron yang berada di kulit tersebut terlepas dari orbitnya dan terjadi transisi elektron dari orbit yang lebih luar ke orbit yang dalam. Elektron yang bertransisi tersebut melepaskan energi berupa sinar-X. Sinar-X karakteristik memiliki spektrum diskrit.

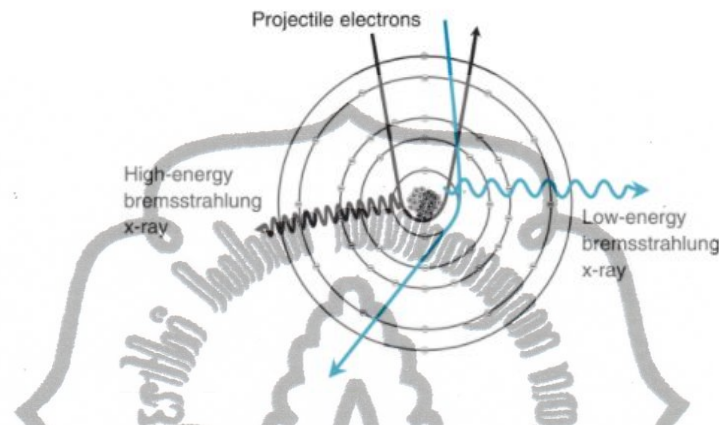


Gambar 2. 1 Proses Terjadinya Sinar-X Karakteristik (Percuoco, 2014)

2. Sinar-X Bremstahlung

Bremstrahlung merupakan kata dalam bahasa Jerman yang berarti pengereman atau perlambatan. Ketika elektron proyektil berkecepatan tinggi yang berasal dari katoda melewati inti atom di target, inti bermuatan positif akan memberikan gaya tarik pada elektron. Medan listrik yang kuat menghambat penetrasi elektron kedalam inti atom, menyebabkan elektron melambat dan berubah arah. Perlambatan ini mengakibatkan hilangnya energi kinetik yang diubah menjadi EM (sinar-X). kualitas radiasi yang dilepaskan bergantung pada jumlah perlambatan dan energi kinetik yang dimiliki elektron

yang masuk (diukur dalam kVp) (Percuoco, 2014). Sinar-X bremsstrahlung mempunyai spektrum energi kontinu.



Gambar 2. 2 Proses Terjadinya Sinar-X Bremsstrahlung (Percuoco, 2014)

Sinar-X memiliki beberapa sifat fisik sebagai berikut (Adnyana, 2014)

a. Daya tembus

Sinar-X mempunyai daya tembus yang besar, dapat menembus bahan yang padat dengan daya tembus yang sangat besar seperti tulang dan gigi. Daya tembus sinar-X berbanding lurus dengan tegangan tabung, semakin tinggi nilai tegangan tabung (kV) yang digunakan maka semakin besar pula daya tembus sinar-X.

b. Pertebaran

Sinar-X setelah melalui suatu bahan, berkas sinar-X akan bertebaran ke seluruh arah yang akan menimbulkan radiasi hambur pada bahan yang dilalui. Hal ini mengakibatkan gambar pada radiografi dan pada film akan tampak terlihat kabur secara menyeluruh. Untuk mengurangi akibat dari radiasi hambur maka digunakan timah hitam (grid) yang tipis diantara subjek.

c. Penyerapan

Sinar-X dalam radiografi akan diserap oleh bahan sesuai dengan kepadatan bahan tersebut. Penyerapan sinar-X akan semakin besar apabila kepadatan bahan semakin tinggi.

d. Efek fotografik

Dalam kamar gelap, sinar-X dapat menghitamkan emulsi film setelah diproses secara kimiawi.

e. Fluoresensi

Sinar-X dapat menyebabkan bahan-bahan tertentu (kalsium atau sink sulfide) memancarkan cahaya (luminisensi). Terdapat 2 (dua) jenis luminisensi

- 1) Fluoresensi, terjadi pemendarkan cahaya sewaktu sinar-X ada
- 2) Fosforisensi, terjadi pemendaran cahaya berlangsung beberapa saat walaupun radiasi dari sinar-X sudah dimatikan.

f. Ionisasi

Efek primer dari sinar-X apabila mengenai suatu bahan akan menimbulkan ionisasi dari partikel atau zat tersebut.

g. Efek biologi

Sinar-X memberikan efek perubahan biologi pada jaringan tubuh. Efek biologi ini dipergunakan dalam pengobatan radiologi.

2.2 Efek radiasi sinar-X

Efek radiasi sinar-X berdasarkan jumlah dosis yang diterima dapat dibedakan menjadi (Syarifudin, 2016)

1. Dosis berlebihan

Penerimaan dosis yang berlebih dapat menimbulkan efek radiasi sebagai berikut

a. Efek Stokastik

Efek stokastik muncul tanpa dipengaruhi oleh ambang batas dosis radiasi dan tidak dapat diprediksi. Peluang muncul efek stokastik berbanding lurus

commut to user

dengan besar dosis radiasi yang diterima pasien. Contoh dari efek stokastik adalah cacat genetik, kanker, dan kelainan hereditas.

b. Efek Deterministik

Efek deterministik muncul dipengaruhi oleh ambang batas dosis radiasi dan tidak berakibat fatal. Contoh dari efek deterministik adalah kemandulan, kematian janin, katarak dan kesakitan radiasi (mual, muntah, diare).

2. Dosis kecil

Efek radiasi sinar-X berdasarkan waktu paparannya dapat dibedakan menjadi 2 (dua), yaitu

a. Paparan dengan waktu singkat (akut)

Paparan atau penyinaran dalam waktu singkat terjadi biasanya secara tidak sengaja (kecelakaan radiasi). Paparan ini dapat memberikan efek biologis secara langsung apabila dalam dosis yang tinggi. Efek biologi akan muncul kurang dari satu tahun sejak terkena paparan.

b. Paparan dengan waktu terus-menerus

Paparan ini biasanya terjadi pada pasien terapi. Efek yang ditimbulkan muncul tidak seketika akibat paparan dengan dosis rendah secara terus-menerus disebut efek tertunda.

2.3 Pesawat Sinar-X

Pesawat sinar-X atau yang dikenal dengan pesawat Rontgen merupakan suatu alat yang digunakan untuk diagnose medis dengan memanfaatkan berkas radiasi sinar-X. Sinar-X dipancarkan dari tabung diarahkan ke bagian tubuh yang akan di diagnosa. Berkas dari sinar-X akan menembus tubuh kemudian akan ditangkap oleh film, sehingga akan terbentuk gambar atau citra dari bagian tubuh yang telah disinari. Sebelum pengoperasian dilakukan perlu dilakukan *setting* beberapa parameter yaitu tegangan (kV), arus tabung (mA), dan waktu paparan (s). Pesawat sinar-X dapat dikelompokkan menjadi (BAPETEN, 2018)

1. Berdasarkan cara penempatan

- a. Pesawat sinar-X terpasang tetap (*fixed*)
- b. Pesawat sinar-X mudah dipindahkan (*mobile*)
- c. Pesawat sinar-X dapat dijinjing (*portable*)

2. Berdasarkan Kegunaan

- a. Pesawat Sinar-X Diagnostik

Ditujukan untuk melihat organ dalam manusia. Pesawat sinar-X ini dapat mendeteksi kerusakan organ dalam manusia dan tumor pada jaringan tubuh. Pesawat sinar-X diagnostic dapat dioperasikan dengan tegangan maksimal 150 kV.

- b. Pesawat Sinar-X Terapi

Ditujukan untuk membunuh atau menghancurkan sel kanker dalam tubuh manusia. Pesawat sinar-X ini dapat dioperasikan dengan tegangan ± 400 kV sampai belasan MV.

3. Berdasarkan penerapan

- a. Pesawat sinar-X medis

Pesawat sinar-X yang dimanfaatkan untuk keperluan medis.

- b. Pesawat sinar-X industri

Pesawat sinar-X yang dimanfaatkan untuk keperluan industri seperti keperluan radiografi dalam teknik uji difraktometri, kristalograf dan uji tidak merusak.

Pesawat sinar-X adalah pesawat yang memproduksi sinar-X. Sinar-X dibangkitkan dengan menembaki target (logam) dengan elektron cepat didalam tabung *vacuum*. Elektron dihasilkan oleh *filament* (katoda) yang dipanaskan. Ketika sumber tegangan tinggi dihidupkan, *filament* akan panas sehingga banyak elektron yang keluar dari permukaan *filament*. Elektron akan bergerak cepat menuju anoda dengan energi kinetik karena beda potensial yang tinggi antara katoda dan anoda. Terjadi tumbukan antara target logam (anoda) dengan elektron yang menghasilkan sinar-X (Suyatno dkk, 2009). Pesawat sinar-X memiliki beberapa komponen yaitu *mit to user*

a. Panel Kontrol (*control panel*)

Panel kontrol merupakan komponen penting dalam pesawat sinar-X. Untuk sinar-X standar terdapat 3 (tiga) prinsip dari panel kontrol yaitu tegangan (kV), arus tabung (mA), dan waktu (s). Jika kV yang diberikan antara katoda dan anoda semakin besar maka elektron akan bergerak semakin cepat. Semakin cepat elektron akan menumbuk target (anoda), sinar-X semakin cepat terbentuk dan daya tembusnya semakin kuat. Kualitas dari sinar-X mempengaruhi detail ketajaman gambar yang dihasilkan. Arus tabung (mA) mempengaruhi jumlah sinar-X yang keluar dari tabung. Elektron dihasilkan dari pemanasan filament (katoda). Pemanasan filament terjadi ketika tabung diberi arus listrik. Jika arus listrik yang diberikan tinggi akan menghasilkan elektron lebih banyak. Apabila elektron yang dihasilkan lebih banyak maka semakin banyak elektron yang menumbuk target (anoda). Peristiwa tersebut akan menghasilkan lebih banyak foton sinar-X.

Fungsi dari waktu (s) adalah untuk mengontrol durasi paparan dan mengetahui berapa banyak waktu tabung dalam menghasilkan radiasi. Tujuan dari waktu penyinaran (s) adalah mengurangi dosis yang diterima oleh pasien dan mengurangi hasil kabur pada gambar radiografi akibat dari pergerakan organ atau pasien. Kuat arus tabung (mA) perlu dikombinasikan dengan waktu kuat arus yang diberikan, dinyatakan dalam *second* (s). Kombinasi antara kuat arus dengan waktu yang diberikan ke tabung sinar-X disebut mAs. Kenaikan mAs akan mempengaruhi banyaknya jumlah elektron yang dihasilkan oleh *filament* dan mempengaruhi kuantitas foton sinar-X yang dihasilkan. Kuantitas dari sinar-X akan mempengaruhi derajat kehitaman (densitas) gambar atau citra yang dihasilkan ketika *exposure*. Densitas yang dihasilkan akan semakin tinggi apabila mAs yang digunakan semakin tinggi (Rahman, 1990).

b. Transformator (Trafo)

Transformator mempunyai fungsi menaikkan dan menurunkan tegangan. Transformator terdiri dari 2 (dua) set gulungan yang terpisah satu sama lain. Gulungan pertama disebut gulungan primer yang terhubung ke catu daya

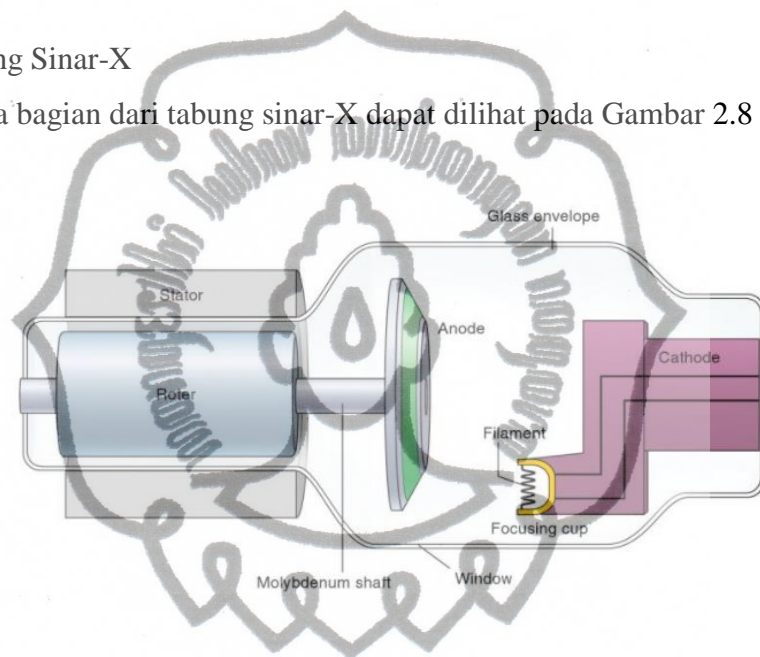
sedangkan gulungan kedua disebut gulungan sekunder yang terhubung ke tabung sinar-X.

c. Generator

Generator berfungsi menaikkan tegangan listrik, mengkonversi arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC), mengendalikan tegangan tabung (kV), mengendalikan arus tabung (mA), dan waktu paparan (s).

d. Tabung Sinar-X

Beberapa bagian dari tabung sinar-X dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2. 3 Tabung Sinar-X (Fosbinder and Orth, 2012)

Tabung sinar-X terdiri dari (Fosbinder and Orth, 2012)

a) *Tube Insert*

Tube insert merupakan bagian dalam dari tabung sinar-X yang terdiri dari beberapa bagian

- Katoda

Katoda adalah sebagai tempat filamen. Filamen bertujuan untuk menyediakan elektron proyektil untuk mempercepat ke anoda. Filamen adalah sebuah kumparan dari kawat paduan logam tungsten (wolfram) karena memiliki titik leleh yang tinggi dan tahan penguapan. Pada katoda terdapat *focusing cup* yang mempunyai fungsi untuk memusatkan berkas elektron yang terbuat dari nikel yang mempunyai dua cekungan dangkal.

- Anoda

Anoda merupakan target dari elektron yang ditembakkan. Anoda dilengkapi dengan *focal spot* dan permukaan yang membentuk sudut kemiringan sebesar 45°. Hal tersebut berfungsi untuk menghasilkan fokus yang lebih akurat dan sinar-X yang keluar dari tabung vacum lebih terarah.

- Anoda putar (rotor)

Fungsi dari adanya anoda putar atau rotor adalah untuk memaksimalkan pendinginan.

- Kaca tabung sinar-X

Kaca tabung sinar-X terbuat dari kaca *Pyrex*. Kondisi tabung harus bersifat vacum agar tidak terjadi ionisasi molekul gas dengan elektron dari filament dan tidak mengganggu pergerakan elektron menuju target.

b) *Tube Housing*

Tube housing merupakan dinding bagian luar dari tabung sinar-X yang terbuat dari bahan metal dan bagian dalam tabung terbuat dari lapisan timbal (Pb). *Tube housing* ini biasa disebut dengan Rumah Tabung. Fungsi dari *tube housing* adalah menekan radiasi yang tidak dibutuhkan. Sisi kanan dan kiri dari *tube housing* dihubungkan dengan socket kabel yang menghubungkan generator tegangan tinggi dengan tabung vacum. Terdapat jendela pada *tube housing* yang berfungsi sebagai tempat berkas sinar-X keluar. *Tube housing* mempunyai fungsi antara lain sebagai isolasi dan proteksi *tube inserti* dari gangguan tekanan luar.

c) Filter

Fungsi dari filter adalah sebagai penyaring radiasi energi rendah. Apabila filter yang digunakan semakin tebal maka intensitas dari sinar-X akan semakin kecil namun daya tembus dari sinar-X menjadi semakin besar. Filter bawaan dari tabung sinar-X setara dengan 0,5 mm-1,0 mm alumunium. Filter bawaan dari tabung sinar-X biasa disebut dengan *inherent filter*. Untuk filter tambahan biasanya menggunakan bahan yang terbuat dari alumunium. Filter tambahan sendiri dapat dilepas atau diganti, bersifat *remove filter*.

e. Kolimator

Kolimator mempunyai fungsi untuk mengatur luas lapangan bidang penyinaran sesuai dengan kebutuhan *exposure*.

2.4 Uji Kesesuaian

Setiap pesawat sinar-X radiologi diagnostik dan intervensional yang digunakan di fasilitas kesehatan perlu dilakukan uji secara berkala sebelum dioperasikan, maka perlu dilakukannya program *quality assurance* dan *quality control*. Uji kesesuaian (*quality control*) dimaksudkan untuk memastikan bahwa peralatan yang digunakan dalam prosedur radiologi diagnostik berfungsi dengan benar sehingga pasien tidak mendapat paparan yang tidak diperlukan, dan menerapkan program jaminan mutu untuk radiologi diagnostik. Pada pemeriksaan pasien agar hasil citra tidak menyimpang maka perlu dilakukan uji kesesuaian. Uji kesesuaian adalah uji untuk memastikan bahwa pesawat sinar-X memenuhi syarat keselamatan radiasi dan memberikan informasi diagnos yang akurat. Apabila terjadi penyimpangan nilai pada beberapa parameter, nilai harus tetap berada pada batas toleransi yang tercantum dalam Perka BAPETEN. Nilai batas toleransi setiap parameter uji kesesuaian adalah sebagai berikut (Hastuti dkk, 2009).

Tabel 2.3 Batas toleransi uji kesesuaian pesawat sinar-x radiologi diagnostik
(Hastuti dkk, 2009).

No	Parameter Uji	Batas Toleransi
1	Akurasi tegangan	$\frac{(kV \text{ panel} - kV \text{ terukur})}{kV \text{ panel}} \leq 10\%$
2	Akurasi waktu	$\frac{(s \text{ panel} - s \text{ terukur})}{s \text{ panel}} \leq 10\%$
3	Lineritas output	Koefisien lineritas : $\frac{ X_1 - X_2 }{(X_1 + X_2)} \leq 0,1$ X ₁ dan X ₂ : sensitivitas paparan dari dua pengukuran berturut-turut (mGy/mAs)
4	Kedapatulangan kV, waktu dan	Koefisien variasi (C) $\leq 5\%$ <i>commit to user</i>

output

$$C = \frac{S}{X} = \frac{1}{X} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}$$

		1. 70 kV \geq 2,1 mmAl dan 80 kV \geq 2,3 mmAl untuk pesawat diagnostic konvensional
5	Kualitas berkas radiasi (HVL)	2. 50 kV \geq 1,5 mmAl dan 60 kV \geq 1,8 mmAl untuk pesawat dental 3. $(kVp/100) \leq HVL \leq (kVp/100 + c)$ untuk pesawat mammografi
6	Kesesuaian dan kelurusan berkas radiasi	1. $\leq 2\%$ SID nilai selisih lapangan kolimasi dengan berkas sinar-X 2. $\pm 2\%$ SID nilai akurasi dimensi berkas sinar-X 3. $\leq 2\%$ SID nilai selisih titik pusat bidang sinar-X dengan titik pusat berkas kolimasi
7	Kebocoran tabung	≤ 1 mGy/jam atau 115 R/jam pada jarak 1 meter dari fokal spot; pesawat sinar-X dental $\leq 0,25$ mGy/jam atau 28,5 mR/jam pada jarak 1 meter dari fokal spot.
8	Dosis pasien	Sesuai panduan BSS-115

Pengujian tabung sinar-X dan pengujian kolimasi berkas sinar-X merupakan pengujian penting dalam menentukan uji kesesuaian. Pengujian kolimasi menggunakan alat bantu uji berupa alat uji kolimator unit RMI berupa *Collimator Test Tool* dan *Beam Alignment Test Tool*. Terdapat beberapa pengujian terhadap kolimasi berkas sinar-X (Dasril, 2019).

1. Uji luminasi lampu kolimator

Pengujian ini bertujuan untuk mengukur kuat cahaya lampu kolimator. Uji iluminasi dilakukan dengan menggunakan alat *Illuminance meter* (IM) dan satuan yang digunakan Lux meter. Nilai lolos uji dari parameter ini adalah > 100 Lux pada jarak 1 meter. *commit to user*

2. Uji kesesuaian luas lapangan kolimasi dengan berkas sinar-X

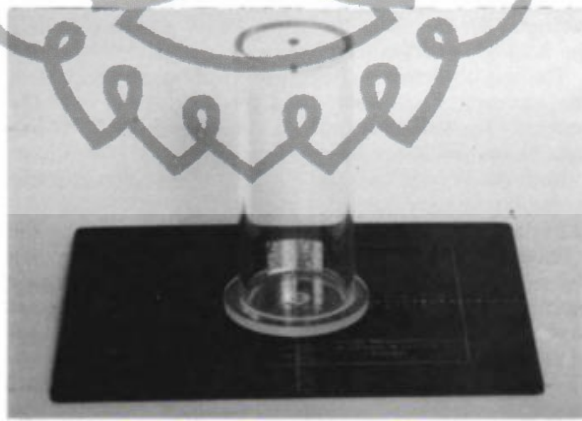
Pengujian ini berfungsi untuk mengukur nilai akurasi luas lapangan kolimasi terhadap berkas radiasi sinar-X pada jarak 100 cm. Nilai lolos uji dari parameter ini untuk bagian horizontal (ΔX) maupun bagian vertikal (ΔY) $\leq 2\%$ dari jarak fokus ke bidang film (FFD). Untuk total penyimpangan dari bidang horizontal dan vertikal ($\Delta X + \Delta Y$) $\leq 3\%$ dari FFD.

3. Uji ketegaklurusan berkas radiasi sinar-X

Pengujian ini bertujuan untuk menjamin berkas sinar-X tepat jatuh pada organ yang dituju. Parameter ini memiliki nilai lolos uji yaitu $\leq 3^\circ$.

2.5 Beam alignment test tool

Beam alignment test tool merupakan sebuah alat berbentuk silinder yang terbuat dari bahan akrilik dengan gotri dibagian tengah pada tiap dasarnya agar tidak dapat ditembus radiasi. *Beam alignment test tool* memiliki fungsi yaitu untuk mengukur ketegaklurusan dari berkas sinar-X (Begum *et al.*, 2011).



Gambar 2. 4 Collimator Alignment Test Tool and Beam Alignment Test Tool (Forster, 1985).

Nilai ketegaklurusan dari berkas sinar-X menurut Keputusan Menteri Kesehatan RI No 1250 Tahun 2009 dapat diperoleh dengan persamaan 2.5 (Fitriyani dkk., 2017).

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{R(FFD-t-x)}{FFD(t+x)} \right] \quad (2.5)$$

Keterangan

- θ : sudut penyimpangan berkas sinar-X
 FFD : jarak tabung ke sinar-X
 t : tinggi tabung uji
 x : jarak antara alat uji dengan film
 R : simpangan dari titik pusat atas ke titik pusat bawah

2.6 Collimator test tool

Collimator test tool merupakan alat yang berfungsi untuk menganalisa kesejajaran kolimator. *Collimator test tool* (Gambar 2.6) terbuat dari bahan kuningan yang dilengkapi dengan ukuran dalam satuan sentimeter (cm) pada permukaannya yang digunakan untuk memberikan hasil pengukuran paparan sinar-X pada radiograf. Sebelum menggunakan *Collimator test tool*, permukaan kaset dan tabung sinar-X harus berada pada posisi tegak lurus. Untuk memastikan posisi tersebut sudah tegak lurus, digunakan alat *waterpass* yang ditempelkan pada permukaan kaset.

Menurut Keputusan Menteri Kesehatan No 1250 Tahun 2009 tentang kendali mutu radiodiagnostik nilai kesesuaian luas lapangan penyinaran dengan berkas sinar-X diperoleh dari persamaan berikut

$$X1 + X2 \leq 2\% \text{ FFD} \quad (2.6)$$

$$Y1 + Y2 \leq 2\% \text{ FFD} \quad (2.7)$$

$$X1 + X2 + Y1 + Y2 \leq 3\% \text{ FFD} \quad (2.8)$$

2.7 Lux meter

Salah satu kegiatan pengujian terhadap tabung kolimasi adalah uji iluminensi lampu kolimator. Uji iluminensi ini bertujuan untuk mengukur kuat cahaya lampu kolimator dengan ukuran lapangan 25 cm x 25 cm pada jarak 100 cm. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat yang disebut lux meter (Dasril, 2019).



Gambar 2. 5 Lux meter

(<https://i0.wp.com/pengelasan.net/wp-content/uploads/2019/09/Bagian-Bagian-Lux-Meter.jpg>)

Lux meter adalah suatu alat yang digunakan untuk mengukur besar dari intensitas cahaya di suatu tempat dengan satuan lux. Setiap pembacaan lux meter akan memberikan hasil yang berbeda, bergantung pada variasi sumber yang berbeda dari intensitas yang sama. Berikut bagian-bagian dari alat Lux Meter (Achmadi, 2019).

- Layar panel, berfungsi untuk menampilkan hasil dari pengukuran yang telah dilakukan menggunakan skala.
- Tombol Off/On, berfungsi sebagai tombol menghidupkan dan mematikan alat. Adanya tombol off/on berguna untuk menghemat baterai karena penggunaannya dapat diatur.
- Tombol Range, berfungsi untuk menentukan jangkuan pengukuran.
- Zero Adjust VR, berfungsi untuk mengatasi permasalahan alat terkait dengan pembagian tanda skala.
- Sensor Cahaya, bagian ini merupakan bagian terpenting karena berfungsi untuk menangkap cahaya yang akan diukur.