

# **PRINSIP DASAR PROTEKSI RADIASI DALAM RADIOLOGI KONVENSIONAL: PENGANTAR**

## **TUJUAN PEMBELAJARAN**

Setelah mempelajari materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Mengidentifikasi sumber-sumber paparan radiasi dalam radiologi konvensional
2. Menjelaskan efek biologis dari radiasi pengion pada jaringan tubuh manusia
3. Menguraikan prinsip ALARA (As Low As Reasonably Achievable) dan penerapannya dalam praktik klinis

## **1. DASAR-DASAR RADIASI DALAM RADIOLOGI KONVENSIONAL**

### **1.1 Pengertian Radiasi Pengion**

#### **Definisi Radiasi Pengion**

Radiasi pengion adalah bentuk energi yang memiliki kemampuan untuk mengeluarkan elektron dari atom, sehingga membentuk ion. Proses ini disebut ionisasi, yang dapat memicu perubahan kimia dalam sel-sel tubuh dan berpotensi menyebabkan kerusakan biologis.

#### **Jenis-jenis Radiasi Pengion**

Radiasi pengion dapat dibagi menjadi beberapa jenis:

- Radiasi Alfa ( $\alpha$ ): Terdiri dari 2 proton dan 2 neutron (inti atom helium). Memiliki daya tembus yang sangat rendah, dapat dihentikan oleh selembar kertas atau lapisan kulit manusia.
- Radiasi Beta ( $\beta$ ): Terdiri dari elektron energi tinggi. Memiliki daya tembus lebih besar dari radiasi alfa, dapat menembus beberapa milimeter jaringan tubuh.
- Radiasi Gamma ( $\gamma$ ): Berupa gelombang elektromagnetik energi tinggi. Memiliki daya tembus sangat tinggi, dapat menembus jaringan tubuh dan bahan padat.
- Sinar-X: Mirip dengan radiasi gamma, merupakan gelombang elektromagnetik energi tinggi yang dihasilkan secara artifisial melalui tabung sinar-X.

Dalam radiologi konvensional, sinar-X adalah jenis radiasi yang paling sering digunakan untuk pemeriksaan diagnostik.

#### **Karakteristik Sinar-X dalam Radiologi Konvensional**

Sinar-X yang digunakan dalam radiologi konvensional memiliki karakteristik berikut:

- Rentang energi: 20-150 keV (kiloelektron volt)
- Panjang gelombang: 0,01-10 nanometer
- Tidak terlihat, tidak berbau, dan tidak terasa
- Merambat dengan kecepatan cahaya
- Dapat menembus jaringan tubuh dengan tingkat penetrasi yang berbeda-beda

Perbandingan Energi Sinar-X Diagnostik vs Terapi

<b>Parameter</b>	<b>Sinar-X Diagnostik</b>	<b>Sinar-X Terapi</b>
Rentang energi	20-150 keV	4-25 MeV
Tujuan	Pencitraan jaringan	Merusak sel kanker
Dosis	Rendah ( $\mu\text{Gy}$ - $\text{mGy}$ )	Tinggi (Gy)
Durasi paparan	Singkat (milidetik)	Lama (menit)

## 1.2 Produksi Sinar-X

### Prinsip Dasar Produksi Sinar-X

Sinar-X dihasilkan di dalam tabung sinar-X melalui proses konversi energi kinetik elektron menjadi energi elektromagnetik. Prosesnya melibatkan:

1. Pemanasan filamen katoda menghasilkan elektron melalui emisi termionik
2. Elektron dipercepat oleh tegangan tinggi antara katoda dan anoda
3. Elektron menumbuk target (anoda) dan menghasilkan sinar-X

Komponen utama tabung sinar-X meliputi:

- Katoda: Terdiri dari filamen tungsten yang menghasilkan elektron saat dipanaskan
- Anoda: Target yang terbuat dari tungsten atau paduan tungsten-rhenium yang menghasilkan sinar-X saat ditumbuk elektron
- Housing: Pelindung luar yang terbuat dari kaca dan dilapisi timbal untuk menyerap radiasi yang tidak diinginkan
- Jendela: Bagian housing yang dirancang khusus untuk memungkinkan berkas sinar-X keluar dari tabung

## Proses Interaksi Elektron dengan Target

Saat elektron berenergi tinggi menumbuk target anoda, terjadi dua jenis interaksi utama:

1. Radiasi Bremsstrahlung (radiasi pengereman): Terjadi ketika elektron dibelokkan oleh inti atom target, menghasilkan foton sinar-X. Menghasilkan spektrum kontinyu.
2. Radiasi Karakteristik: Terjadi ketika elektron menyebabkan elektron di kulit dalam atom target terlepas, dan elektron dari kulit lebih luar mengisi kekosongan, melepaskan foton sinar-X dengan energi spesifik.

Spektrum Sinar-X terdiri dari kombinasi radiasi Bremsstrahlung (spektrum kontinyu) dan radiasi karakteristik (puncak diskrit pada energi spesifik).

## 1.3 Sumber Paparan Radiasi

Dalam lingkungan radiologi konvensional, terdapat tiga sumber utama paparan radiasi:

### 1. Radiasi Primer

- Berkas sinar-X yang langsung keluar dari tabung sinar-X
- Memiliki intensitas tertinggi
- Digunakan untuk membentuk gambar radiografi
- Dibatasi oleh kolimasi untuk mengurangi paparan yang tidak perlu

### 2. Radiasi Sekunder (Hambur)

- Dihasilkan ketika berkas primer berinteraksi dengan pasien atau objek lain
- Merupakan sinar-X yang berubah arah setelah mengalami hamburan Compton
- Mengurangi kontras gambar radiografi
- Menyebarkan ke segala arah, termasuk ke arah operator

### 3. Radiasi Bocor

- Radiasi yang menembus housing tabung sinar-X
- Intensitas harus dijaga di bawah 1 mGy/jam pada jarak 1 meter
- Diatenuasi oleh pelindung tabung sinar-X

## Lokasi dengan Risiko Paparan Tertinggi

Beberapa area dengan risiko paparan tinggi dalam departemen radiologi:

- Posisi dekat dengan tabung sinar-X (< 1 meter)
- Area di sekitar pasien selama pemeriksaan (sumber hamburan)
- Ruang pemeriksaan tanpa pelindung yang memadai

- Posisi searah dengan berkas primer

## 1.4 Parameter Teknis yang Mempengaruhi Dosis Radiasi

### 1.4.1 kV dan mAs

#### Kilovoltage (kV)

- Menentukan energi atau kualitas sinar-X
- Mempengaruhi penetrasi berkas sinar-X
- Meningkatkan kV akan meningkatkan energi rata-rata berkas sinar-X
- Pengaruh terhadap dosis: Peningkatan 15% kV  $\approx$  pengurangan dosis 50% (dengan kualitas gambar yang tetap)

#### Milliampere-seconds (mAs)

- Produk dari arus tabung (mA) dan waktu eksposur (s)
- Menentukan jumlah elektron yang diproduksi di katoda
- Mempengaruhi kuantitas (bukan kualitas) sinar-X
- Pengaruh terhadap dosis: Hubungan linier - menggandakan mAs akan menggandakan dosis

#### Praktik optimasi:

- Gunakan kV yang cukup tinggi untuk penetrasi yang memadai
- Gunakan mAs serendah mungkin untuk mencapai noise yang dapat diterima
- Pertimbangkan "15% Rule": Menaikkan kV sebesar 15% memungkinkan pengurangan mAs hingga 50% dengan dosis yang lebih rendah

### 1.4.2 SID, Kolimasi, dan Filtrasi

#### Source to Image Distance (SID)

- Jarak antara sumber sinar-X dan reseptor gambar
- Mempengaruhi intensitas sinar-X yang mencapai reseptor
- Mengikuti hukum kuadrat terbalik: intensitas radiasi  $\propto 1/d^2$
- Peningkatan SID akan mengurangi dosis pasien (dengan penyesuaian faktor teknis lain)

#### Kolimasi

- Membatasi ukuran berkas sinar-X
- Mengurangi volume jaringan yang terpapar

- Mengurangi radiasi hambur sehingga meningkatkan kualitas gambar
- Kolimasi yang baik dapat mengurangi dosis efektif hingga 50%

#### Filtrasi

- Filtrasi Inherent: Filtrasi bawaan pada tabung sinar-X (setara 0,5-1,0 mm Al)
- Filtrasi Added: Filter tambahan (biasanya aluminium) yang dipasang pada apertur tabung
- Filtrasi total minimal yang direkomendasikan: 2,5 mm Al untuk kV > 70
- Fungsi: Menyaring sinar-X berenergi rendah yang hanya akan diserap kulit tanpa berkontribusi pada pembentukan gambar

#### Contoh Kalkulasi Perubahan Dosis dengan Perubahan Parameter

1. Efek perubahan SID:
  - Jika SID berubah dari 100 cm menjadi 180 cm, intensitas radiasi akan berkurang menjadi:  $(100/180)^2 = 0,31$  atau 31% dari intensitas awal
2. Efek kolimasi:
  - Mengurangi ukuran lapangan dari 35×43 cm ke 20×20 cm dapat mengurangi dosis efektif hingga 60%
3. Efek filtrasi:
  - Menambahkan 1 mm Al dapat mengurangi dosis kulit sebesar 30-40% pada 70 Kv

## 2. EFEK BIOLOGIS RADIASI PADA TUBUH MANUSIA

### 2.1 Interaksi Radiasi dengan Materi Biologis

Ketika sinar-X berinteraksi dengan jaringan tubuh, terjadi beberapa interaksi fisik utama:

#### Efek Fotolistrik

- Foton sinar-X diserap sepenuhnya oleh elektron orbital
- Elektron terlepas (fotoelektron) dan selanjutnya berionisasi
- Dominan pada energi rendah (< 50 keV) dan nomor atom tinggi (Z tinggi)
- Berkontribusi besar pada dosis pasien

#### Hamburan Compton

- Foton sinar-X berinteraksi dengan elektron bebas atau elektron terikat lemah
- Foton kehilangan sebagian energi dan berubah arah
- Dominan pada rentang energi diagnostik (50-100 keV)
- Sumber utama radiasi hambur dan paparan terhadap staf

## Produksi Pasangan

- Foton berenergi tinggi dikonversi menjadi elektron dan positron
- Hanya terjadi pada energi  $> 1.02$  MeV
- Tidak signifikan dalam radiologi konvensional, lebih relevan pada radioterapi

## Ionisasi dan Eksitasi pada Tingkat Selular

Pada tingkat selular, interaksi radiasi dengan jaringan menghasilkan:

1. Efek Langsung: Radiasi langsung merusak DNA dan molekul biologis penting
2. Efek Tidak Langsung: Radiasi mengionisasi molekul air ( $H_2O$ ) membentuk radikal bebas ( $OH^\cdot$ ,  $H^\cdot$ ,  $H_2O_2$ ) yang selanjutnya merusak DNA dan struktur sel

Sekitar 70% kerusakan biologis akibat radiasi pengion pada tubuh manusia terjadi melalui efek tidak langsung.

## 2.2 Kerusakan DNA

DNA merupakan target biologis paling penting dalam kerusakan radiasi. Kerusakan DNA dapat berupa:

### Single Strand Breaks (SSB)

- Putusnya satu untai DNA
- Mudah diperbaiki oleh mekanisme perbaikan sel
- Umumnya tidak menyebabkan kematian sel atau mutasi

### Double Strand Breaks (DSB)

- Putusnya kedua untai DNA pada lokasi yang sama atau berdekatan
- Sulit diperbaiki dengan akurat
- Dapat menyebabkan kematian sel atau mutasi permanen

## Proses Repair DNA dan Kemungkinan Mutasi

Sel memiliki beberapa mekanisme perbaikan DNA:

1. Base Excision Repair (BER): Memperbaiki basa yang rusak
2. Nucleotide Excision Repair (NER): Memperbaiki kerusakan yang lebih kompleks
3. Double Strand Break Repair: Melalui Non-Homologous End Joining (NHEJ) atau Homologous Recombination (HR)

Namun, proses perbaikan bisa mengalami kesalahan, menghasilkan:

- Perbaikan sempurna: Sel kembali normal

- Perbaikan tidak sempurna: Sel mengalami mutasi
- Kegagalan perbaikan: Kematian sel (apoptosis)

#### Periode Laten Efek Radiasi

Efek radiasi memiliki periode laten yang bervariasi:

- Efek akut: Muncul dalam hitungan hari hingga minggu
- Efek tertunda: Muncul setelah bulan hingga tahun
- Efek genetik: Dapat muncul pada generasi berikutnya

### 2.3 Efek Deterministik vs Stokastik

Efek radiasi pada manusia dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama:

#### Efek Deterministik (Reaksi Jaringan)

Karakteristik:

- Memiliki ambang dosis (threshold)
- Keparahan meningkat seiring peningkatan dosis
- Biasanya muncul dalam waktu singkat (hari-minggu)
- Disebabkan oleh kematian sel masif

Contoh:

- Erythema (kemerahan kulit):  $>2$  Gy
- Epilasi (kerontokan rambut):  $>3$  Gy
- Deskuamasi kering:  $>5$  Gy
- Katarak:  $>2$  Gy (akumulasi)
- Sterilitas sementara:  $>0.15$  Gy (testis)
- Sterilitas permanen:  $>3.5$  Gy (testis),  $>2.5$  Gy (ovarium)

#### Efek Stokastik

Karakteristik:

- Tidak memiliki ambang dosis (no threshold)
- Probabilitas (bukan keparahan) meningkat seiring peningkatan dosis
- Biasanya muncul setelah periode laten yang panjang (tahun-dekade)
- Disebabkan oleh mutasi DNA

Contoh:

- Kanker (leukemia, kanker payudara, kanker tiroid, dll)

- Efek herediter (mutasi pada sel germinal)

#### Perbandingan Risiko pada Level Dosis Diagnostik

Pada rentang dosis diagnostik ( $<100$  mSv), risiko efek stokastik bersifat rendah namun tidak nol:

- Dosis efektif 10 mSv diperkirakan menyebabkan risiko kanker fatal sebesar 1:2000
- Hampir semua pemeriksaan radiografi konvensional menghasilkan dosis  $<1$  mSv
- Risiko relatif harus selalu dibandingkan dengan manfaat diagnostik

#### Tingkat Keyakinan Ilmiah untuk Efek pada Dosis Rendah

Model Linear No-Threshold (LNT) adalah model yang diadopsi untuk proteksi radiasi, yang mengasumsikan bahwa risiko berbanding lurus dengan dosis tanpa ambang batas. Namun, terdapat perdebatan ilmiah tentang efek dosis rendah:

- Data epidemiologi kuat untuk dosis  $>100$  mSv
- Data terbatas dan tidak meyakinkan untuk dosis  $<100$  mSv
- Beberapa ilmuwan mendukung teori hormesis (efek menguntungkan pada dosis sangat rendah)

## 2.4 Radiosensitivitas Organ dan Jaringan

### Hukum Bergonie-Tribondeau

Sensitivitas sel terhadap radiasi berbanding lurus dengan:

- Tingkat aktivitas mitosis (pembelahan sel)
- Masa perkembangan sel di masa depan (potensial proliferasi)
- Tingkat diferensiasi sel yang rendah

### Organ dengan Radiosensitivitas Tinggi

- Sumsum tulang merah (sel hematopoietik)
- Organ reproduksi (gonad): ovarium dan testis
- Kelenjar timus
- Lensa mata
- Usus halus (epitel)

### Organ dengan Radiosensitivitas Menengah

- Kelenjar tiroid
- Kelenjar payudara
- Kulit

- Mukosa rongga mulut dan esofagus
- Hati

#### Organ dengan Radiosensitivitas Rendah

- Otot
- Tulang (jaringan keras)
- Jaringan saraf (otak, saraf tepi)
- Pankreas
- Kelenjar adrenal

#### Faktor Tissue Weighting dalam Perhitungan Dosis Efektif

ICRP (International Commission on Radiological Protection) menetapkan faktor pembebanan jaringan (wT) untuk menghitung dosis efektif:

Jaringan/Organ	Faktor wT (ICRP 103, 2007)
Sumsum tulang, Kolon, Paru, Lambung, Payudara, Organ lainnya*	0.12
Gonad	0.08
Tiroid, Esofagus, Kandung kemih, Hati	0.04
Permukaan tulang, Otak, Kelenjar ludah, Kulit	0.01

\*Organ lainnya: Adrenal, Ekstrathorakal (ET), Empedu, Jantung, Ginjal, Limfonodus, Otot, Mukosa oral, Pankreas, Prostat, Usus halus, Limpa, Timus, Rahim/Serviks

Dosis Efektif (E) =  $\sum wT \times HT$  di mana HT adalah dosis ekuivalen pada jaringan T

#### 2.5 Batas Dosis

Batas dosis adalah nilai dosis yang tidak boleh dilampaui dalam kondisi normal. Batas ini ditetapkan oleh badan regulasi seperti BAPETEN di Indonesia dan mengikuti rekomendasi ICRP.

##### Batas Dosis untuk Pekerja Radiasi

- Dosis efektif: 20 mSv per tahun (rata-rata 5 tahun), tidak boleh melebihi 50 mSv dalam satu tahun
- Lensa mata: 20 mSv per tahun (rata-rata 5 tahun)
- Kulit (rata-rata 1 cm<sup>2</sup>): 500 mSv per tahun
- Tangan dan kaki: 500 mSv per tahun

##### Batas Dosis untuk Masyarakat Umum

- Dosis efektif: 1 mSv per tahun
- Lensa mata: 15 mSv per tahun
- Kulit: 50 mSv per tahun

### Batas Dosis untuk Ibu Hamil dan Janin

- Setelah diketahui hamil, batas dosis equivalen untuk embrio/janin: 1 mSv selama masa kehamilan
- Rekomendasi agar dosis pada perut ibu hamil tidak melebihi 2 mSv selama kehamilan

### Perbedaan antara Batas Dosis dan Dosis Referensi Diagnostik

Penting untuk membedakan:

- Batas Dosis: Nilai regulatori yang tidak boleh dilampaui untuk proteksi individu
- Diagnostic Reference Level (DRL): Nilai panduan untuk prosedur medis, bukan batas dosis, yang digunakan untuk optimasi proteksi radiasi

### 2.6 Dosis Efektif pada Pemeriksaan Radiologi Konvensional

Berikut perbandingan dosis efektif untuk berbagai pemeriksaan radiologi konvensional:

Pemeriksaan	Dosis Efektif (mSv)
Thorax PA	0.02
Ekstremitas	0.01
Kepala (AP/Lateral)	0.1
Abdomen AP	0.7
Pelvis	0.7
Lumbal Spine (AP+Lat)	1.5
IVP (Urografi)	3.0

### Ekuivalensi dengan Radiasi Latar Alam

Radiasi latar alam rata-rata global adalah sekitar 2.4 mSv per tahun, yang berasal dari:

- Radiasi kosmik
- Radiasi terestrial (dari tanah dan bangunan)
- Radiasi internal (K-40 dalam tubuh)
- Radon dan turunannya

Membandingkan dosis medis dengan radiasi latar alam dapat membantu pasien memahami risiko dalam konteks yang lebih familiar.

### 3. PRINSIP ALARA DAN JUSTIFIKASI PEMERIKSAAN

#### 3.1 Prinsip ALARA

##### Asal dan Perkembangan Prinsip ALARA

ALARA (As Low As Reasonably Achievable) adalah prinsip fundamental dalam proteksi radiasi yang dikembangkan dari rekomendasi ICRP sejak tahun 1970-an. Prinsip ini menekankan bahwa semua dosis radiasi harus dijaga serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial.

##### Tiga Pilar ALARA

ALARA didasarkan pada tiga pilar proteksi radiasi:

1. Justifikasi
  - Setiap kegiatan yang melibatkan radiasi harus memberikan manfaat yang lebih besar dibandingkan dengan risikonya
  - Prinsip: "No benefit, no exposure"
2. Optimalisasi
  - Paparan radiasi harus dijaga serendah mungkin dengan mempertimbangkan faktor ekonomi dan sosial
  - Prinsip: "As low as reasonably achievable"
3. Limitasi
  - Dosis individual tidak boleh melebihi batas yang ditetapkan
  - Prinsip: "Individual rights"

##### Interpretasi "Reasonably Achievable"

"Reasonably Achievable" berarti menerapkan langkah-langkah proteksi radiasi dengan mempertimbangkan:

- Teknologi yang tersedia
- Biaya implementasi vs manfaat pengurangan dosis
- Dampak sosial dan ekonomi
- Penerimaan oleh staf dan pasien

Ini bukan berarti "serendah mungkin" tanpa pertimbangan, tetapi optimalisasi berdasarkan analisis biaya-manfaat yang rasional.

## Tanggung Jawab Penerapan ALARA dalam Tim Radiologi

Penerapan ALARA adalah tanggung jawab bersama seluruh tim radiologi:

1. Ahli Fisika Medis:
  - Uji kesesuaian dan kalibrasi peralatan
  - Pengukuran dan pemantauan dosis
  - Optimasi protokol
2. Radiografer/Penata Radiologi:
  - Pemilihan parameter teknis optimal
  - Penggunaan alat proteksi dengan benar
  - Positioning pasien yang tepat
3. Dokter Radiologi:
  - Justifikasi pemeriksaan
  - Optimasi protokol pencitraan
  - Supervisi prosedur kompleks
4. Dokter Perujuk:
  - Merujuk hanya untuk indikasi yang tepat
  - Memberikan informasi klinis yang lengkap
  - Menghindari pengulangan pemeriksaan

### 3.2 Penerapan ALARA dalam Praktik Klinis

#### Penggunaan Protokol Terstandarisasi

Protokol terstandarisasi membantu penerapan ALARA melalui:

- Parameter teknis yang sudah dioptimasi untuk tipe pemeriksaan spesifik
- Pengurangan variabilitas antar operator
- Konsistensi kualitas gambar dan dosis pasien
- Efisiensi alur kerja

Contoh format protokol standar mencakup:

- Parameter eksposur (kV, mAs) berdasarkan ukuran pasien
- SID dan kolimasi yang direkomendasikan
- Proyeksi dan posisi pasien
- Alat proteksi yang diperlukan

## Pemilihan Parameter Teknis yang Optimal

Optimasi parameter teknis meliputi:

- Pemilihan kV tertinggi yang masih memberikan kontras adekuat
- Penggunaan mAs terendah yang masih menghasilkan noise yang dapat diterima
- Kolimasi tepat sesuai area yang diperiksa
- Filtrasi tambahan bila diperlukan
- Penyesuaian teknik berdasarkan ukuran pasien (pediatrik, dewasa kurus, obesitas)

## Penggunaan Alat Pelindung Radiasi

Alat pelindung yang umum digunakan:

- Apron timbal untuk pasien dan staf
- Pelindung gonad untuk usia reproduktif
- Thyroid shield untuk pemeriksaan dengan potensi paparan tiroid
- Kacamata timbal untuk prosedur fluoroskopi

Catatan penting: Pelindung harus digunakan secara selektif dan tidak mengganggu informasi diagnostik.

## Positioning Pasien yang Tepat

Positioning yang tepat sangat penting untuk:

- Mengurangi dosis pasien (PA vs AP)
- Meminimalkan pengulangan eksposur karena posisi yang tidak tepat
- Mengoptimalkan visualisasi area yang dicurigai

## Komunikasi dengan Pasien

Komunikasi efektif dengan pasien membantu:

- Mengurangi pengulangan eksposur akibat gerakan
- Menjelaskan pentingnya prosedur dan kepatuhan
- Mengatasi kecemasan yang dapat mengganggu pemeriksaan
- Mendapatkan riwayat pemeriksaan radiasi sebelumnya

## 3.3 Justifikasi Pemeriksaan

### Definisi Justifikasi dalam Konteks Proteksi Radiasi

Justifikasi adalah proses menentukan bahwa manfaat dari pemeriksaan radiologi lebih besar daripada risikonya. Justifikasi mencakup:

- Evaluasi apakah pemeriksaan yang diminta sesuai dengan indikasi klinisnya
- Pertimbangan apakah ada alternatif non-radiasi yang lebih sesuai
- Penentuan bahwa informasi yang diperoleh akan bermanfaat untuk diagnosis atau penatalaksanaan pasien

#### Penilaian Risk vs Benefit untuk Setiap Pemeriksaan

Pertimbangan dalam penilaian risk vs benefit:

- Kondisi klinis dan urgensi diagnosis
- Usia dan jenis kelamin pasien (pertimbangan khusus untuk anak-anak dan wanita usia reproduksi)
- Dosis radiasi dari pemeriksaan yang diusulkan
- Ketersediaan modalitas pencitraan alternatif
- Pemeriksaan radiologi sebelumnya (menghindari pengulangan yang tidak perlu)

#### Peran Radiologist dan Referring Physician

Tanggung jawab bersama dalam justifikasi:

- Dokter Perujuk: Memberikan informasi klinis yang cukup dan merujuk pemeriksaan yang tepat
- Dokter Radiologi: Mengevaluasi permintaan, menyarankan alternatif jika diperlukan, dan memastikan pemeriksaan sesuai

Proses konsultasi antara dokter perujuk dan radiologis sangat penting untuk optimasi justifikasi.

#### Alternatif Modalitas Tanpa Radiasi Pengion

Modalitas pencitraan alternatif yang tidak menggunakan radiasi pengion:

- Ultrasonografi (USG): Ideal untuk pemeriksaan organ padat, obstetrik, pediatrik
- Magnetic Resonance Imaging (MRI): Unggul untuk jaringan lunak, sistem saraf pusat, muskuloskeletal
- Pemeriksaan klinis: Untuk kasus di mana pencitraan mungkin tidak memberikan informasi tambahan yang signifikan

#### Guidelines Pemeriksaan Berbasis Bukti

Beberapa panduan berbasis bukti yang dapat digunakan untuk justifikasi pemeriksaan:

- ACR Appropriateness Criteria: Panduan berbasis bukti yang dikembangkan oleh American College of Radiology untuk membantu memilih pemeriksaan pencitraan yang tepat
- iRefer: Guidelines dari Royal College of Radiologists (UK)

- Panduan praktik klinis spesifik penyakit: Seperti panduan untuk nyeri punggung bawah, trauma kepala ringan, dll.

### 3.4 Optimalisasi Prosedur

#### Strategi Optimalisasi

Optimalisasi adalah keseimbangan antara dosis radiasi dan kualitas gambar. Strategi utama meliputi:

- Menyesuaikan parameter teknis untuk menghasilkan kualitas gambar yang cukup baik (bukan sempurna) dengan dosis terendah yang mungkin
- Menerapkan prinsip ALADA (As Low As Diagnostically Acceptable)
- Mengembangkan protokol khusus untuk populasi khusus (pediatrik, geriatri)
- Menerapkan teknik pengurangan dosis yang sesuai dengan teknologi yang tersedia

Pengaturan Teknis: kV, mAs, Filtrasi, Kolimasi

Parameter teknis dan dampaknya:

#### 1. Kilovoltage (kV):

- Meningkatkan kV: Meningkatkan penetrasi, mengurangi kontras, mengurangi dosis permukaan
- Rule of 15%: Meningkatkan kV sebesar 15% memungkinkan pengurangan mAs sebesar 50% dengan dosis lebih rendah
- Rentang optimal: 60-80 kV untuk ekstremitas, 70-90 kV untuk skull, 70-125 kV untuk thorax/abdomen

#### 2. Milliampere-seconds (mAs):

- Berhubungan linier dengan dosis:  $mAs \downarrow 50\% = \text{dosis} \downarrow 50\%$
- Penyesuaian mAs berdasarkan ukuran pasien:
  - Pasien pediatrik: 50-80% dari mAs dewasa
  - Pasien obesitas: Peningkatan 25-50% dari mAs standar

#### 3. Filtrasi:

- Total filtrasi minimal: 2.5 mm Al ekuivalen
- Filtrasi tambahan (Cu, Al+Cu): Mengurangi dosis permukaan hingga 50%
- Menyerap sinar-X energi rendah yang hanya berkontribusi pada dosis kulit

#### 4. Kolimasi:

- Kolimasi ketat pada area interest
- Mengurangi dosis integral dan radiasi hambur
- Meningkatkan kontras gambar

#### Penggunaan Grid Anti-Scatter

Grid berfungsi menyerap radiasi hambur yang dapat menurunkan kontras gambar:

- Grid ratio: Rasio tinggi grid terhadap jarak antar strip timbal (8:1, 10:1, 12:1)
- Grid frequency: Jumlah garis per cm (40-60 lines/cm)
- Penggunaan grid meningkatkan kualitas gambar tetapi juga meningkatkan dosis (faktor 2-3x)
- Grid sebaiknya digunakan untuk pemeriksaan dengan ketebalan >10 cm

#### Quality Control Peralatan

Program quality control rutin sangat penting untuk optimalisasi dosis:

- Kalibrasi output tabung sinar-X
- Verifikasi akurasi kV dan timing
- Pengujian kolimasi
- Evaluasi sistem penyimpanan dan tampilan gambar
- Interval pengujian: Harian, mingguan, bulanan, tahunan sesuai parameter

#### Penggunaan Chart Eksposur atau AEC

Panduan eksposur dan otomatisasi:

- Exposure Chart: Tabel parameter teknis yang direkomendasikan berdasarkan jenis pemeriksaan dan ukuran pasien
- Automatic Exposure Control (AEC): Sistem yang secara otomatis menyesuaikan mAs berdasarkan atenuasi pasien
  - Memilih sensor AEC yang sesuai untuk anatomi yang diperiksa
  - Menetapkan batas minimum dan maksimum mAs
  - Melakukan kalibrasi dan pengujian berkala

### 3.5 Studi Kasus: Penerapan ALARA

#### Kasus 1: Radiografi Toraks pada Pasien Geriatri

Skenario: Pasien wanita 78 tahun dirujuk untuk foto toraks karena batuk kronik.

Pendekatan Optimal:

- Justifikasi: Review riwayat pasien, pemeriksaan sebelumnya, tujuan diagnostik spesifik
- Parameter Teknis:
  - Peningkatan kV (110-120 kV) untuk penetrasi adekuat
  - Reduksi mAs (serendah mungkin, sekitar 2-3 mAs)
  - Proyeksi PA untuk mengurangi dosis payudara dan tiroid
  - Grid rasio 8:1 untuk mengurangi radiasi hambur
- Proteksi: Penggunaan shield untuk area sensitif (tiroid jika sesuai)
- Optimasi Alur Kerja: Instruksi yang jelas, posisi yang nyaman untuk menghindari gerakan

#### Kasus 2: Radiografi Ekstremitas pada Anak-anak

Skenario: Anak laki-laki 5 tahun dengan trauma pergelangan tangan

Pendekatan Optimal:

- Justifikasi: Evaluasi kebutuhan berdasarkan mekanisme cedera dan temuan klinis
- Parameter Teknis:
  - Reduksi kV (50-60 kV) untuk kontras yang baik
  - Reduksi mAs (50-70% dari nilai dewasa)
  - Kolimasi ketat pada area interest
  - Pertimbangkan tidak menggunakan grid
- Immobilisasi: Gunakan alat bantu immobilisasi untuk menghindari pengulangan
- Proteksi: Pelindung gonad, tiroid shield jika area cukup dekat
- Komunikasi: Melibatkan orang tua dan anak dalam proses pemeriksaan

#### Kasus 3: Multiple Eksposur pada Pasien Trauma

Skenario: Pasien trauma multi-organ yang memerlukan beberapa pemeriksaan radiografi

Pendekatan Optimal:

- Justifikasi dan Prioritas: Prioritaskan pemeriksaan yang paling kritis
- Koordinasi: Kolaborasi antara radiologi dan tim trauma
- Strategi Pengurangan Dosis:
  - Pertimbangkan protokol "low-dose" untuk pemeriksaan follow-up
  - Gunakan modalitas non-radiasi bila memungkinkan untuk evaluasi tertentu
  - Hindari pengulangan pemeriksaan yang tidak perlu
- Optimasi Parameter: Pertimbangkan kondisi klinis pasien dan kebutuhan kualitas gambar
- Monitoring Dosis: Catatan tentang paparan kumulatif

## **RINGKASAN**

Proteksi radiasi dalam radiologi konvensional berlandaskan pada pemahaman mendalam tentang sifat radiasi, efeknya pada tubuh manusia, dan penerapan prinsip-prinsip untuk meminimalkan risiko sambil memaksimalkan manfaat diagnostik.

Poin-poin Kunci:

### 1. Dasar-Dasar Radiasi:

- Radiasi pengion dapat menyebabkan kerusakan biologis melalui efek langsung dan tidak langsung
- Parameter teknis (kV, mAs, SID, kolimasi) memiliki pengaruh signifikan terhadap dosis radiasi

### 2. Efek Biologis:

- Efek deterministik terjadi di atas ambang dosis tertentu dengan keparahan meningkat seiring dosis
- Efek stokastik tidak memiliki ambang dan probabilitasnya meningkat dengan dosis
- Organ memiliki sensitivitas berbeda terhadap radiasi

### 3. Prinsip ALARA:

- Justifikasi: Memastikan manfaat lebih besar dari risiko
- Optimalisasi: Menjaga dosis serendah mungkin dengan tetap mempertahankan kualitas diagnostik
- Limitasi: Tidak melampaui batas dosis yang ditetapkan

### 4. Penerapan Praktis:

- Protokol terstandarisasi yang dioptimasi
- Penggunaan alat pelindung dan teknik yang tepat
- Pemilihan parameter teknis yang optimal
- Komunikasi efektif dengan pasien dan tim

Dengan menerapkan prinsip-prinsip ini secara konsisten, profesional radiologi dapat memberikan layanan diagnostik yang aman dan efektif.

## PENUGASAN

1. Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Dosis Radiasi pada Pemeriksaan Radiografi Dada
  - Format: Laporan 2-3 halaman
  - Struktur: Pendahuluan, Identifikasi Faktor-faktor, Analisis Pengaruh, Strategi Optimasi, Kesimpulan
  - Deadline: [Tanggal]
2. Identifikasi 3 Tindakan Praktis untuk Menerapkan Prinsip ALARA dalam Praktik Klinis
  - Format: Presentasi 5 menit (3-5 slide)
  - Konten: Deskripsi tindakan, Justifikasi ilmiah, Implementasi praktis, Manfaat yang diharapkan
  - Deadline: [Tanggal]

## REFERENSI

1. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
2. Bushberg, J.T., et al. (2020). The Essential Physics of Medical Imaging, 4th Edition
3. Peraturan BAPETEN tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X untuk Radiologi Diagnostik dan Intervensional
4. Bushong, S.C. (2021). Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection, 12th Edition
5. Jurnal dan publikasi terkini tentang proteksi radiasi dalam radiologi diagnostik

# METODE DAN ALAT PROTEKSI RADIASI DALAM RADIOLOGI KONVENSIONAL

## PENGANTAR

Selamat datang pada pertemuan kedua mata kuliah Proteksi Radiasi untuk Mahasiswa Penata Radiologi. Setelah memahami prinsip dasar proteksi radiasi pada pertemuan pertama, kita akan melangkah lebih jauh dengan mempelajari metode praktis dan alat-alat proteksi radiasi yang digunakan dalam praktik radiologi konvensional. Pengetahuan dan keterampilan dalam mengaplikasikan metode proteksi dan menggunakan alat proteksi secara tepat merupakan kompetensi kunci bagi seorang penata radiologi profesional.

## TUJUAN PEMBELAJARAN

Setelah mempelajari materi ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Mengidentifikasi dan menggunakan berbagai alat proteksi radiasi dengan benar
2. Menerapkan teknik proteksi radiasi bagi pasien, diri sendiri, dan staf lain
3. Mengoptimalkan parameter teknis untuk meminimalkan dosis pasien tanpa mengorbankan kualitas diagnostik

## 1. ALAT PROTEKSI RADIASI

### 1.1 Prinsip Dasar Pelindung Radiasi

#### Atenuasi Radiasi dan Nilai HVL (Half-Value Layer)

Atenuasi radiasi adalah proses pengurangan intensitas berkas radiasi saat melewati materi. Konsep kunci dalam atenuasi radiasi meliputi:

- Half-Value Layer (HVL): Ketebalan material yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi menjadi setengahnya
- Tenth-Value Layer (TVL): Ketebalan material yang diperlukan untuk mengurangi intensitas radiasi menjadi sepersepuluhnya

Rumus atenuasi radiasi:

$$I = I_0 \times e^{(-\mu x)}$$

di mana:

- $I$  = intensitas radiasi setelah melewati material
- $I_0$  = intensitas radiasi awal
- $\mu$  = koefisien atenuasi linear material ( $\text{cm}^{-1}$ )
- $x$  = ketebalan material (cm)

Nilai HVL beberapa material untuk sinar-X 100 kV:

- Timbal (Pb): 0,27 mm
- Beton: 2,15 cm
- Baja: 1,16 cm
- Aluminium: 1,63 cm
- Kaca: 2,85 cm

### Material Pelindung Radiasi

Berbagai material digunakan sebagai pelindung radiasi, masing-masing dengan karakteristik dan keunggulan tersendiri:

1. Timbal (Pb):
  - Material pelindung paling umum
  - Efektif pada energi rendah hingga menengah
  - Kepadatan tinggi (11,34 g/cm<sup>3</sup>)
  - Mudah dibentuk dan fleksibel bila dicampur dengan karet/vinil
  - Kekurangan: berat, beracun, dan tidak ramah lingkungan
2. Komposit Timbal:
  - Kombinasi timbal dengan bahan lain (karet, vinil, akrilik)
  - Lebih ringan dan fleksibel dibanding timbal murni
  - Contoh: karet timbal (lead rubber), vinil timbal (lead vinyl)
3. Material Non-Timbal:
  - Alternatif ramah lingkungan untuk timbal
  - Berbasis tungsten, bismuth, antimoni, timah, atau barium
  - Keunggulan: lebih ringan (20-30%), tidak beracun, lebih ramah lingkungan
  - Kekurangan: umumnya lebih mahal

### Ekuivalensi Timbal (Lead Equivalence) dan Standarisasi

Ekuivalensi timbal adalah ukuran kemampuan material dalam mengurangi radiasi, dinyatakan dalam ketebalan timbal yang memberikan atenuasi setara:

- Dinyatakan dalam mm Pb (misalnya 0,5 mm Pb)
- Standar internasional: IEC 61331-1, ASTM F2547
- Ekuivalensi timbal harus diukur pada energi spesifik (biasanya 50-150 kV)
- Sertifikasi ekuivalensi timbal wajib ada pada setiap alat proteksi radiasi

### Transmisi Radiasi Melalui Material Pelindung pada Berbagai Energi

Transmisi radiasi melalui material pelindung bervariasi berdasarkan energi sinar-X:

- Efektivitas timbal menurun pada energi tinggi
- Pada 50 kV, 0,5 mm Pb meneruskan kurang dari 0,1% radiasi
- Pada 100 kV, 0,5 mm Pb meneruskan sekitar 0,5% radiasi
- Pada 150 kV, 0,5 mm Pb meneruskan sekitar 4% radiasi

Pada praktik radiologi konvensional (50-120 kV), apron dengan ekuivalensi 0,5 mm Pb dapat mengurangi dosis hingga 95-99%.

## 1.2 Apron dan Variasi Desain

### Jenis-jenis Apron

Apron timbal tersedia dalam berbagai desain untuk memenuhi kebutuhan spesifik:

1. Full Front (Apron Depan Penuh):
  - Melindungi bagian depan tubuh saja
  - Ringan dan nyaman untuk prosedur singkat
  - Ideal untuk staf yang tidak selalu berada di ruang pemeriksaan
  - Berat: 2-3 kg
2. Front-Back (Apron Depan-Belakang):
  - Melindungi bagian depan dan belakang tubuh
  - Untuk prosedur yang memerlukan proteksi 360°
  - Ideal untuk fluoroskopi dan personel yang berdiri dekat dengan pasien
  - Berat: 4-5 kg
3. Skirt-Vest Combination (Kombinasi Rompi dan Rok):
  - Mendistribusikan berat ke bahu dan pinggul
  - Mengurangi tekanan pada tulang belakang
  - Ideal untuk prosedur lama (fluoroskopi, intervensional)
  - Berat: 5-7 kg
  - Memberikan perlindungan tambahan pada area gonad

### Ketebalan Standar

Apron timbal tersedia dalam beberapa ketebalan standar:

- 0,25 mm Pb: Proteksi minimum untuk staf radiologi yang jarang terpapar
- 0,35 mm Pb: Proteksi standar untuk radiografi umum
- 0,5 mm Pb: Proteksi tinggi untuk fluoroskopi dan radiologi intervensional

- 0,5 mm Pb depan / 0,25 mm Pb belakang: Kombinasi umum untuk apron depan-belakang

#### Pertimbangan Ergonomis dan Distribusi Berat

Pertimbangan ergonomis sangat penting untuk mencegah cedera muskuloskeletal:

- Apron harus sesuai dengan ukuran tubuh pengguna
- Tali bahu lebar dan adjustable untuk mendistribusikan berat
- Sabuk pinggang untuk mendistribusikan berat ke pinggul
- Panjang apron ideal: dari bahu hingga lutut
- Distribusi berat: 30% bahu, 70% pinggul untuk desain skirt-vest

#### Perbedaan Desain untuk Radiologi Umum vs Intervensional

Fitur	Apron Radiologi Umum	Apron Radiologi Intervensional
Ketebalan	0,25-0,35 mm Pb	0,35-0,5 mm Pb
Desain	Full front atau front-back	Skirt-vest combination
Cakupan	Dada hingga lutut	Leher hingga lutut, wrap-around
Berat	Lebih ringan (2-4 kg)	Lebih berat (5-7 kg)
Fitur tambahan Minimal		Thyroid collar terintegrasi, flap tambahan

#### Apron Non-Timbal dan Keunggulannya

Apron non-timbal menawarkan beberapa keunggulan:

- 20-30% lebih ringan dari apron timbal ekuivalen
- Lebih fleksibel dan nyaman saat dipakai
- Tidak beracun, ramah lingkungan
- Lebih tahan terhadap keretakan dan masa pakai lebih panjang
- Memenuhi standar proteksi yang sama (ekuivalensi timbal)
- Ideal untuk penggunaan jangka panjang dan personel dengan masalah punggung

### 1.3 Thyroid Shield dan Eye Protection

#### Desain dan Ketebalan Thyroid Shield

Thyroid shield atau pelindung tiroid memiliki karakteristik:

- Bentuk: Kerah yang menutupi area tiroid di leher
- Ketebalan: 0,35-0,5 mm Pb ekuivalen
- Desain: Standalone atau terintegrasi dengan apron
- Ukuran: Tersedia dalam berbagai ukuran atau adjustable

- Material: Timbal atau alternatif non-timbal

Pemakaian yang Benar dan Situasi yang Memerlukan

Thyroid shield harus dipakai:

- Dengan tepat menutupi area tiroid di bagian depan leher
- Tidak terlalu ketat agar tidak mengganggu pernapasan
- Dipastikan terpasang dengan benar di sepanjang prosedur

Situasi yang memerlukan thyroid shield:

- Prosedur fluoroskopi dan intervensional
- Pemeriksaan kepala, leher, dan dada
- Pemeriksaan pediatrik
- Personel yang bekerja dalam jarak dekat dengan pasien
- Wanita hamil (tiroid lebih sensitif selama kehamilan)

Kacamata Timbal: Spesifikasi dan Desain

Kacamata timbal (lead glasses) untuk proteksi mata:

- Ekuivalensi timbal: 0,35-0,75 mm Pb
- Lensa: Kaca tinggi-densitas atau plastik khusus dengan komponen timbal
- Frame: Ringan namun kuat, dengan pelindung samping
- Desain: Wrap-around (melengkung) untuk proteksi dari radiasi hambur lateral
- Variasi: Clip-on untuk pengguna kacamata reguler, lensa bifokal, lensa fotokromatik

Pentingnya Proteksi Mata dalam Prosedur Fluoroskopi

Proteksi mata sangat penting terutama pada prosedur fluoroskopi karena:

- Lensa mata sangat radiosensitif (ambang dosis untuk katarak:  $> 2$  Gy)
- Prosedur fluoroskopi menghasilkan radiasi hambur signifikan pada level mata
- Posisi operator sering dekat dengan sumber radiasi
- Efek deterministik pada mata bersifat kumulatif
- Risiko katarak radiasi meningkat tanpa proteksi mata yang memadai

Alternatif: Shield Mounted pada Langit-Langit

Sebagai alternatif atau tambahan kacamata timbal:

- Ceiling-mounted lead shield: Panel timbal transparan yang digantung dari langit-langit
- Ekuivalensi timbal: 0,5-1,0 mm Pb
- Keunggulan: Melindungi seluruh wajah dan leher, tidak perlu dipakai operator

- Lebih efektif dalam mengurangi dosis pada mata (reduksi 90-95%)
- Tetap memungkinkan visibilitas dan komunikasi dengan pasien
- Dapat digunakan bersamaan dengan kacamata timbal untuk proteksi maksimal

#### 1.4 Sarung Tangan dan Pelindung Gonad

##### Sarung Tangan Timbal: Ketebalan, Atenuasi, dan Limitasi

Sarung tangan timbal (lead gloves) memiliki karakteristik berikut:

- Ketebalan ekuivalen: 0,25-0,35 mm Pb
- Atenuasi: Mengurangi dosis tangan 30-40% pada 70-90 kV
- Material: Karet atau vinil yang mengandung timbal atau material non-timbal
- Tersedia dalam berbagai ukuran dengan desain yang memungkinkan ketangkasan

Limitasi sarung tangan timbal:

- Dapat menimbulkan false sense of security
- Tangan dalam berkas primer akan menerima dosis tinggi meskipun menggunakan sarung tangan
- Jika tangan terlihat dalam gambar, sarung tangan dapat meningkatkan teknik (mAs) secara otomatis pada AEC, meningkatkan dosis
- Tidak disarankan untuk meletakkan tangan dalam berkas primer, bahkan dengan sarung tangan

##### Trade-off antara Proteksi dan Ketangkasan

Pertimbangan dalam menggunakan sarung tangan timbal:

- Semakin tebal pelindung, semakin besar proteksi
- Semakin tebal pelindung, semakin berkurang ketangkasan
- Kelelahan tangan meningkat dengan berat sarung tangan
- Sarung tangan timbal tipis (0,25 mm Pb) menawarkan keseimbangan terbaik antara proteksi dan ketangkasan
- Alternatif: radioprotektif cream (reduksi 30-50%) untuk ketangkasan maksimal dengan proteksi moderate

##### Pelindung Gonad: Tipe Flat Contact dan Shadow Shield

Dua tipe utama pelindung gonad:

1. Flat Contact Shield:
  - Diletakkan langsung pada permukaan tubuh pasien

- o Bentuk: Khusus untuk pria (cangkang) dan wanita (bentuk persegi panjang)
- o Ekuivalensi timbal: 0,5-1,0 mm Pb
- o Keunggulan: Proteksi maksimal, mudah diposisikan
- o Kekurangan: Mungkin mengganggu kenyamanan, dapat menutupi area diagnostik

## 2. Shadow Shield:

- o Ditempatkan pada jarak tertentu antara tabung dan pasien
- o Diposisikan untuk menaungi area gonad dari berkas primer
- o Ekuivalensi timbal: 1,0-2,0 mm Pb
- o Keunggulan: Tidak kontak dengan pasien, dapat diatur posisinya
- o Kekurangan: Positioning harus tepat, proteksi mungkin kurang optimal

### Ukuran Pelindung Gonad untuk Berbagai Kelompok Usia

Pelindung gonad tersedia dalam berbagai ukuran berdasarkan usia:

Kelompok Usia	Ukuran Pelindung Flat Contact (cm)	Ukuran Shadow Shield (cm)
Infant (0-1 tahun)	3 × 3	6 × 6
Anak kecil (1-5 tahun)	5 × 5	8 × 8
Anak-anak (5-10 tahun)	7 × 7	10 × 10
Remaja (10-15 tahun)	9 × 9	12 × 12
Dewasa	10 × 10 (pria), 15 × 8 (wanita)	15 × 15

### Indikasi dan Kontraindikasi Penggunaan Pelindung Gonad

#### Indikasi:

- Pasien usia reproduktif (laki-laki dan perempuan)
- Anak-anak dan remaja
- Pemeriksaan di mana gonad berada dalam atau dekat dengan berkas primer
- Radiografi pelvis, hip, lumbar spine, abdomen bagian bawah

#### Kontraindikasi:

- Area gonad adalah region of interest diagnostik
- Pemeriksaan urologi atau ginekologi spesifik
- Posisi pelindung dapat mengganggu informasi diagnostik penting
- Pasien tidak kooperatif yang dapat menyebabkan positioning yang tidak tepat

### 1.5 Proteksi Khusus untuk Pasien Pediatrik

## Radiosensitivitas Lebih Tinggi pada Anak-anak

Anak-anak memiliki radiosensitivitas lebih tinggi karena:

- Sel-sel dalam pertumbuhan aktif dan pembelahan cepat
- Jaringan dengan tingkat proliferasi tinggi lebih sensitif terhadap radiasi
- Organ dalam fase perkembangan lebih rentan terhadap kerusakan radiasi
- Harapan hidup lebih panjang, memberikan waktu lebih lama untuk manifestasi efek stokastik
- Ukuran tubuh lebih kecil menyebabkan organ-organ vital lebih dekat dengan sumber radiasi

Anak-anak memiliki risiko kanker akibat radiasi 2-3 kali lebih tinggi dibandingkan orang dewasa untuk dosis yang sama.

## Alat Proteksi Khusus untuk Pediatrik

Alat proteksi khusus untuk pasien pediatrik:

- Apron pediatrik dengan ukuran dan berat yang sesuai
- Pelindung gonad pediatrik dalam berbagai ukuran
- Shield tiroid khusus pediatrik (ukuran kecil)
- Breast shield untuk anak perempuan dalam pemeriksaan thorax
- Eye shield untuk pemeriksaan kepala
- Modifikasi peralatan standar yang disesuaikan dengan anatomi pediatrik

## Immobilization Devices untuk Mengurangi Pengulangan Pemeriksaan

Alat bantu immobilisasi pediatrik:

- Papan immobilisasi untuk infant dan balita
- Sandbags dan velcro straps yang lembut
- Clear acrylic restraints
- Mummy wraps (pembungkus) untuk infant
- Pigeon-hole atau clear plastic positioning devices
- Alat bantu untuk pemeriksaan spesifik: head holders, extremity immobilizers

Manfaat immobilisasi yang tepat:

- Mengurangi pengulangan eksposur akibat blurring motion
- Meningkatkan konsistensi positioning
- Mengurangi dosis kumulatif

- Memungkinkan kolimasi lebih tepat

#### Teknik Pengurangan Dosis Khusus Pediatrik

Teknik khusus untuk mengurangi dosis pediatrik:

- Penurunan kV dan mAs berdasarkan ukuran pasien (protokol weight-based)
- Kolimasi ketat sesuai ukuran anatomi
- Filtrasi tambahan (Cu 0,1-0,2 mm)
- Meningkatkan SID bila memungkinkan
- Menghindari grid pada pasien < 10-12 kg (atau ketebalan < 10-13 cm)
- Menggunakan teknik exposure charts khusus pediatrik
- Mengadaptasi protokol digital untuk sensitivitas tinggi (high-speed imaging)

#### Komunikasi dengan Pasien Anak dan Orang Tua

Strategi komunikasi efektif:

- Melibatkan orang tua dalam proses pemeriksaan
- Menggunakan bahasa yang sesuai dengan usia anak
- Memberikan penjelasan sederhana tentang prosedur
- Teknik distraksi untuk mengurangi kecemasan dan pergerakan
- Memberikan penghargaan setelah pemeriksaan (stiker, pujian)
- Mengedukasi orang tua tentang pentingnya proteksi radiasi
- Menjawab pertanyaan dan kekhawatiran dengan jujur namun menenangkan

#### 1.6 Desain Ruang Pemeriksaan dan Pelindung Struktural

##### Persyaratan Pelindung Dinding, Lantai, dan Langit-Langit

Persyaratan pelindung struktural bergantung pada:

- Beban kerja (workload) ruangan
- Energi maksimum sinar-X yang digunakan
- Faktor penggunaan (U): fraksi waktu berkas diarahkan ke barrier tertentu
- Faktor okupansi (T): fraksi waktu area disekitar barrier ditempati
- Batasan dosis yang ditetapkan untuk area yang dilindungi

Persyaratan proteksi:

- Dinding primary barrier: Menghadap berkas primer, memerlukan proteksi maksimal
- Dinding secondary barrier: Menangani radiasi hambur dan bocor
- Lantai dan langit-langit: Bergantung pada ruangan di atas/bawah

- Jendela observasi: Kaca timbal dengan ekuivalensi timbal sesuai dinding
- Pintu: Bisa memerlukan pelindung timbal tergantung lokasi

Perhitungan Ketebalan Barrier Berdasarkan Beban Kerja

Perhitungan ketebalan barrier mengikuti rekomendasi NCRP 147 dengan rumus:

$$K = (dP \times W \times T \times U) / (d^2)$$

di mana:

- K = faktor transmisi barrier
- d = jarak dari sumber ke area yang dilindungi (m)
- P = batas dosis (mGy/minggu)
- W = beban kerja (mA-menit/minggu)
- T = faktor okupansi
- U = faktor penggunaan

Dari nilai K, ketebalan barrier (dalam mm Pb atau cm beton) ditentukan menggunakan tabel atau grafik atenuasi.

Kaca Timbal dan Jendela Observasi

Jendela observasi memungkinkan visualisasi pasien dari konsol operator:

- Terbuat dari kaca timbal (lead glass) dengan kandungan oksida timbal tinggi
- Ekuivalensi timbal harus sama dengan dinding di sekitarnya
- Ukuran dan posisi harus memungkinkan pengamatan optimal pada pasien
- Laminasi dengan kaca reguler untuk perlindungan mekanis
- Label ekuivalensi timbal harus terpasang pada jendela

Pintu dengan Pelindung Radiasi

Pintu ruang pemeriksaan radiologi:

- Memerlukan pelindung timbal jika berhadapan langsung dengan berkas primer atau area dengan radiasi hambur signifikan
- Ketebalan timbal: 0,5-2,0 mm Pb tergantung lokasi dan penggunaan
- Dapat berupa pintu timbal solid atau pintu berlapis timbal
- Harus dilengkapi safety interlock dan/atau tanda peringatan radiasi
- Ponderosa pintu perlu dipertimbangkan (pintu berlapis timbal sangat berat)
- Alternatif: Maze entrance (pintu tidak langsung menghadap sumber) untuk mengurangi kebutuhan pelindung

## Area Terkontrol vs Area Diawasi

Klasifikasi area berdasarkan potensi paparan radiasi:

### 1. Area Terkontrol:

- Area di mana paparan okupasional normal dapat melebihi 3/10 batas dosis pekerja
- Contoh: Ruang pemeriksaan radiografi, ruang fluoroskopi
- Memerlukan kontrol akses, monitoring area, dan signage yang jelas
- Hanya personel yang diizinkan boleh masuk
- Memerlukan monitoring dosis individu

### 2. Area Diawasi:

- Area di mana paparan okupasional dapat melebihi 1/10 batas dosis tetapi tidak melebihi 3/10
- Contoh: Koridor di dekat ruang radiografi, ruang tunggu pasien
- Memerlukan pengawasan radiologis tetapi biasanya tidak memerlukan kontrol akses khusus
- Signage peringatan radiasi tetap diperlukan
- Monitoring area periodik direkomendasikan

## 1.7 Perawatan dan Pengujian Alat Proteksi

### Penanganan dan Penyimpanan Apron yang Benar

Penanganan yang tepat untuk memperpanjang masa pakai apron:

- Selalu gantung apron pada hanger khusus saat tidak digunakan
- Hindari melipat apron (dapat menyebabkan keretakan lapisan timbal)
- Jika harus dilipat untuk transportasi, lipat dengan lapisan timbal di dalam
- Simpan pada suhu ruangan kering, jauh dari panas dan kelembaban berlebih
- Hindari menumpuk apron satu sama lain
- Gunakan hanger lebar untuk mendistribusikan berat secara merata

Metode penyimpanan apron:

- Wall-mounted racks: Ideal untuk ruang terbatas
- Mobile racks: Memungkinkan fleksibilitas penempatan
- Dedicated cabinets: Melindungi dari debu dan kerusakan

### Jadwal Pemeriksaan Visual Rutin

Program pemeriksaan visual apron dan pelindung radiasi:

- Pemeriksaan harian: Inspeksi visual cepat sebelum penggunaan
- Pemeriksaan bulanan: Inspeksi visual menyeluruh untuk mendeteksi keretakan, sobek, atau kerusakan lain
- Pemeriksaan tahunan: Inspeksi visual dan radiografi untuk mendeteksi kerusakan internal

Checklist pemeriksaan visual:

- Kerusakan pada permukaan luar (sobek, lubang, keausan)
- Keretakan atau patahan pada jahitan
- Fungsi tali pengencang dan sabuk
- Pola lipatan atau kerutan yang konsisten (indikasi keretakan internal)
- Kelengkapan label dan informasi ekuivalensi timbal

Fluoroskopi untuk Deteksi Retak/Kerusakan

Pemeriksaan fluoroskopi/radiografi untuk alat proteksi:

- Dilakukan minimal setahun sekali
- Teknik rendah (50-70 kV, 2-3 mAs) untuk mendeteksi lapisan timbal
- Apron diletakkan rata di atas meja pemeriksaan
- Area dengan keretakan akan muncul sebagai garis terang
- Lubang akan muncul sebagai titik terang
- Dokumentasi kerusakan dengan gambar untuk pelaporan

Kriteria penolakan berdasarkan hasil fluoroskopi:

- Keretakan tunggal  $> 2$  cm
- Lubang tunggal  $> 5$  mm
- Keretakan/lubang multipel pada area yang sama
- Kerusakan pada area kritis (gonad, tiroid, dada)

Pengujian Lead Equivalence

Pengujian ekuivalensi timbal:

- Menggunakan alat dosimetri dan material standar
- Membandingkan transmisi radiasi melalui alat proteksi dengan standar timbal
- Dapat menggunakan teknik step-wedge dengan berbagai ketebalan timbal
- Dilakukan saat penerimaan alat baru dan secara periodik (2-3 tahun)
- Harus dilakukan pada berbagai energi sesuai penggunaan

Dokumentasi Pengujian dan Penggantian Alat

Sistem dokumentasi yang komprehensif meliputi:

- Inventaris semua alat proteksi radiasi
- Identifikasi unik untuk setiap alat (nomor seri/barcode)
- Catatan pembelian dan spesifikasi
- Log pemeriksaan dan pengujian rutin
- Catatan hasil pengujian dan kerusakan
- Riwayat perbaikan atau penggantian
- Tanggal pengujian berikutnya

Kriteria penggantian alat proteksi:

- Gagal memenuhi standar ekuivalensi timbal
- Kerusakan fisik yang tidak dapat diperbaiki
- Kerusakan pada area kritis yang meliputi >5% luas permukaan
- Usia alat melebihi rekomendasi produsen (biasanya 5-10 tahun)

## 2. TEKNIK PROTEKSI RADIASI

### 2.1 Prinsip Waktu, Jarak, dan Perisai

Waktu: Minimalisasi Durasi Eksposur

Prinsip waktu dalam proteksi radiasi:

- Dosis radiasi berbanding lurus dengan durasi paparan
- Mengurangi waktu paparan 50% = mengurangi dosis 50%

Teknik minimalisasi waktu:

- Persiapan yang tepat sebelum eksposur
- Pre-setting parameter eksposur
- Penggunaan exposure charts untuk menghindari repeated exposures
- Pemilihan waktu eksposur minimum yang menghasilkan kualitas gambar adekuat
- Pada fluoroskopi: penggunaan pulsed fluoroscopy, last image hold, dan record modes
- Rotasi personel untuk prosedur panjang

Jarak: Hukum Kuadrat Terbalik (Inverse Square Law)

Prinsip jarak:

- Intensitas radiasi berbanding terbalik dengan kuadrat jarak
- Matematisnya:  $I_2 = I_1 \times (d_1/d_2)^2$
- Menggandakan jarak mengurangi intensitas radiasi menjadi seperempat

Aplikasi praktis:

- Operator berdiri minimal 2 meter dari tabung dan pasien selama eksposur
- Menggunakan ekstensi untuk menambah jarak saat manipulasi kolimasi atau tabung
- Personel yang tidak dibutuhkan mundur sejauh mungkin
- Pelindung kontrol/konsol diletakkan pada jarak optimal dari sumber

Perisai: Penggunaan Barrier Pelindung

Jenis-jenis barrier pelindung:

- Personal: Apron, thyroid shield, kacamata timbal, sarung tangan timbal
- Struktural: Dinding berlapis timbal, kaca timbal, pintu berlapis timbal
- Mobile: Shield portable, tabir timbal beroda, protective drapes
- Peralatan mounted: Ceiling-suspended shields, table-mounted lateral shields

Prinsip penggunaan barrier:

- Selalu tempatkan barrier antara sumber radiasi dan diri sendiri
- Pastikan barrier memiliki ekuivalensi timbal yang sesuai
- Gunakan kombinasi barrier bila memungkinkan untuk proteksi maksimal
- Perhatikan kemungkinan radiasi hambur yang melewati atau memantul dari barrier

Interrelasi Ketiga Prinsip dalam Praktik Klinis

Proteksi radiasi optimal dicapai dengan menerapkan ketiga prinsip secara simultan:

- Waktu: Minimalisasi durasi paparan
- Jarak: Maksimalisasi jarak dari sumber
- Perisai: Penggunaan barrier yang sesuai

Contoh aplikasi terintegrasi:

- Operator berada di balik barrier proteksi (perisai), pada jarak maksimal (jarak), dengan meminimalkan durasi eksposur (waktu)
- Dalam fluoroskopi, menggunakan last image hold (waktu), remote manipulation (jarak), dan ceiling-mounted shield (perisai)
- Pada radiografi mobile, menggunakan eksposur minimum (waktu), tali ekstensi (jarak), dan apron timbal (perisai)

Kalkulasi Perubahan Dosis dengan Perubahan Waktu dan Jarak

Contoh perhitungan praktis:

1. Efek Waktu:

- Jika waktu fluoroskopi dikurangi dari 5 menit menjadi 2 menit:
- Reduksi dosis =  $(5-2)/5 = 60\%$
- Dosis baru = 40% dari dosis awal

## 2. Efek Jarak:

- Jika jarak dari sumber meningkat dari 1 m menjadi 2 m:
- Faktor reduksi =  $(1/2)^2 = 1/4$
- Intensitas pada 2 m = 25% dari intensitas pada 1 m

## 3. Kombinasi Waktu dan Jarak:

- Jika waktu dikurangi 50% dan jarak digandakan:
- Reduksi total =  $0,5 \times 0,25 = 0,125$
- Dosis baru = 12,5% dari dosis awal

## 2.2 Teknik Positioning Pasien untuk Proteksi Radiasi

### Posisi PA vs AP: Pengurangan Dosis pada Organ Radiosensitif

#### Proyeksi PA (Posterior-Anterior) vs AP (Anterior-Posterior):

- Pada proyeksi PA, organ-organ radiosensitif anterior (tiroid, payudara, mata, gonad) berada lebih jauh dari sumber radiasi
- Pengurangan dosis signifikan untuk organ-organ anterior:
  - Dosis payudara: 98% lebih rendah pada PA vs AP
  - Dosis tiroid: 92% lebih rendah pada PA vs AP
  - Dosis lensa mata: 95% lebih rendah pada PA vs AP
- Dosis kulit entrance lebih tinggi pada PA, tetapi dosis efektif total lebih rendah

#### Rekomendasi:

- Gunakan PA untuk pemeriksaan toraks rutin dan menetap
- Gunakan PA untuk tulang belakang bila memungkinkan
- PA mungkin sulit untuk pasien trauma atau tidak mobile (compromised)

### Posisi Lateral: Pertimbangan Proteksi Radiasi

#### Pertimbangan proteksi pada proyeksi lateral:

- Sisi tubuh yang lebih dekat dengan reseptor gambar menerima dosis lebih rendah
- Sisi tubuh yang lebih dekat dengan tabung menerima dosis lebih tinggi
- Organ radiosensitif harus ditempatkan jauh dari tabung bila memungkinkan

#### Rekomendasi:

- Left lateral untuk pemeriksaan cervical dan thoracic spine (mengurangi dosis tiroid)
- Right lateral untuk lumbar spine (mengurangi dosis gonad pada wanita)
- Right lateral pada abdomen (mengurangi dosis ovarium)
- Pertimbangkan posisi organ-organ radiosensitif pada setiap kasus

Oblique Views: Optimalisasi Sudut untuk Proteksi

Optimalisasi proyeksi oblique:

- Sudut oblique memengaruhi dosis organ-organ dalam jalur berkas
- RAO/LAO (Right/Left Anterior Oblique): Pergeseran sudut dari posisi AP
- RPO/LPO (Right/Left Posterior Oblique): Pergeseran sudut dari posisi PA

Rekomendasi:

- Minimalisasi sudut oblique ke derajat minimum yang dibutuhkan diagnostik
- Pertimbangkan lokasi organ radiosensitif dalam menentukan arah oblique
- Untuk pemeriksaan serius tertentu, pertimbangkan untuk menggunakan CT dengan dosis rendah alih-alih multiple oblique views

Supine vs Prone: Implikasi Proteksi Radiasi

Pertimbangan posisi supine vs prone:

- Posisi prone secara umum lebih baik dari segi proteksi radiasi untuk organ anterior
- Posisi supine lebih nyaman untuk pasien dan lebih mudah diatur
- Dosis organ bervariasi tergantung posisi organ terhadap tabung dan reseptor

Rekomendasi:

- Prone lebih disukai untuk pemeriksaan lumbar spine dari perspektif proteksi radiasi
- Prone dapat dipertimbangkan untuk pemeriksaan abdomen untuk mengurangi dosis gonad
- Pertimbangkan kenyamanan dan kondisi pasien (pasien dengan sesak napas sulit dalam posisi prone)
- Untuk pasien pediatrik, posisi prone dapat mengurangi dosis gonad hingga 95% pada pemeriksaan spine

Pentingnya Komunikasi dengan Pasien untuk Immobilisasi

Komunikasi efektif sangat penting untuk:

- Mengurangi pergerakan yang menyebabkan blur dan pengulangan eksposur
- Memastikan pasien memahami pentingnya menjaga posisi
- Mendapatkan kerjasama untuk positioning yang optimal

- Mengurangi kecemasan yang dapat menyebabkan pergerakan

Teknik komunikasi efektif:

- Instruksi jelas dan sederhana sebelum pemeriksaan
- Jelaskan durasi harus menahan posisi
- Gunakan instruksi pernapasan yang tepat (inspirasi/ekspirasi)
- Beri tahu pasien sebelum setiap eksposur
- Berikan feedback positif untuk meningkatkan kerjasama

### 2.3 Teknik Kolimasi dan Filtrasi

Kolimasi: Prinsip dan Teknik Penggunaan

Kolimasi adalah pembatasan ukuran berkas sinar-X menggunakan diafragma yang dapat disesuaikan:

Prinsip dasar:

- Membatasi area yang terpapar radiasi primer
- Mengurangi volume jaringan yang menerima dosis
- Mengurangi radiasi hambur, meningkatkan kontras gambar
- Mengurangi dosis efektif pasien

Teknik penggunaan:

- Kolimasi harus membatasi field tepat pada area yang diperiksa
- Ukuran field maksimal: 2 cm lebih besar dari area yang diperiksa pada tiap sisi
- Visualisasikan anatomi target dan batas-batasnya sebelum kolimasi
- Gunakan light beam diaphragm untuk melihat area yang akan dieksposi
- Kolimasi pada dua sisi (vertikal dan horizontal) lebih baik daripada kolimasi circular

Efek Kolimasi terhadap Dosis dan Kualitas Gambar

Efek kolimasi pada dosis:

- Mengurangi dosis integral tubuh
- Mengurangi dosis ke organ-organ di luar field
- Mengurangi dosis efektif hingga 50% dengan kolimasi yang tepat

Efek kolimasi pada kualitas gambar:

- Mengurangi radiasi hambur hingga 50%
- Meningkatkan kontras gambar
- Mengurangi fog pada gambar

- Meningkatkan detail dan ketajaman gambar
- Memperbaiki exposure control pada sistem AEC

### Filtrasi Inherent vs Added Filtration

Filtrasi total pada berkas sinar-X terdiri dari:

1. Filtrasi Inherent:
  - Atenuasi dari komponen tabung sinar-X (jendela, minyak pendingin)
  - Biasanya setara dengan 0,5-1,0 mm Al
  - Bersifat permanen, tidak dapat dimodifikasi
  - Menyaring sebagian sinar-X energi rendah
2. Added Filtration (Filtrasi Tambahan):
  - Filter tambahan yang dipasang pada apertur tabung
  - Biasanya berupa lembaran aluminium (1-3 mm)
  - Dapat berupa filter compound (Al + Cu)
  - Dapat diganti atau disesuaikan tergantung kebutuhan
  - Menyaring sinar-X energi rendah yang hanya akan diserap kulit

Persyaratan regulasi:

- Filtrasi total minimum pada pesawat diagnostik umum: 2,5 mm Al ekuivalen untuk kV > 70
- Filtrasi total minimum pada pesawat mammografi: 0,3 mm Al ekuivalen
- Filtrasi harus diuji secara berkala sebagai bagian dari quality control

Jenis Filter: Aluminium, Copper, Compound Filters

Berbagai jenis filter dan karakteristiknya:

1. Aluminium (Al):
  - Filter standar untuk radiografi umum
  - Tebal: 1-3 mm
  - Menyaring sinar-X energi rendah (<20 keV)
  - Efektif mengurangi dosis kulit
  - Atenuasi sinar-X diagnostik relatif rendah
2. Tembaga (Cu):
  - Filter untuk pemeriksaan pediatrik dan high-kV techniques
  - Tebal: 0,1-0,3 mm

- Menyaring spektrum energi lebih luas
- Lebih efektif mengurangi dosis kulit dibanding Al
- Memerlukan peningkatan mAs untuk mempertahankan densitas gambar

### 3. Compound Filters:

- Kombinasi beberapa material filter (Al + Cu, Al + Mo)
- Mengoptimalkan spektrum sinar-X untuk aplikasi spesifik
- Contoh: 0,1 mm Cu + 1 mm Al untuk pediatrik
- Filter "K-edge" untuk mammografi (Mo, Rh)
- Filter shaped (filter bentuk khusus) untuk compensating beams

## Pengaruh Filtrasi terhadap Spektrum Sinar-X dan Dosis Permukaan

### Efek filtrasi pada spektrum sinar-X:

- Mengurangi proporsi sinar-X energi rendah (beam hardening)
- Meningkatkan energi rata-rata berkas sinar-X
- Menghasilkan spektrum yang lebih homogen
- Tidak mengurangi sinar-X energi tinggi yang penting untuk penetrasi

### Efek filtrasi pada dosis:

- Mengurangi dosis permukaan kulit (entrance skin dose) hingga 50%
- Mengurangi dosis efektif hingga 30%
- Pengurangan dosis lebih signifikan pada kV rendah
- Pengurangan dosis lebih signifikan dengan filter Cu dibanding Al

### Contoh kuantitatif:

- Penambahan 1 mm Al dapat mengurangi dosis kulit 30% pada 70 kV
- Penambahan 0,1 mm Cu + 1 mm Al dapat mengurangi dosis kulit 50% pada 80 kV
- Pengurangan dosis lebih besar pada pediatrik dibanding dewasa

## 2.4 Proteksi Radiasi untuk Pasien Berkebutuhan Khusus

### Pasien Geriatri: Pertimbangan Khusus

Pasien geriatri memerlukan pendekatan khusus dalam proteksi radiasi:

#### Pertimbangan biologis:

- Sensitivitas radiasi lebih rendah dibanding usia muda (namun risiko tetap ada)
- Penurunan fungsi organ dapat memengaruhi clearance radioparmaka
- Komorbiditas sering hadir dan dapat memengaruhi keputusan pemeriksaan

Pertimbangan teknis:

- Osteoporosis dapat memerlukan penyesuaian parameter eksposi
- Kemungkinan pergerakan lebih tinggi (tremor, kesulitan menahan posisi)
- Penurunan fungsi kognitif dapat memengaruhi kemampuan mengikuti instruksi

Strategi proteksi:

- Prioritaskan justifikasi pemeriksaan dengan ketat
- Pertimbangkan dampak hasil pada manajemen pasien
- Protokol khusus dengan waktu eksposur lebih singkat bila memungkinkan
- Alat bantu positioning dan immobilisasi yang nyaman
- Instruksi jelas dan sederhana, melibatkan keluarga bila perlu

Pasien Trauma: Teknik Pemeriksaan dengan Minimalisasi Pergerakan

Proteksi radiasi untuk pasien trauma:

Tantangan khusus:

- Positioning konvensional sering tidak memungkinkan
- Multiple views sering diperlukan
- Immobilisasi sulit dilakukan
- Kondisi kritis memerlukan kecepatan

Strategi proteksi:

- Gunakan protokol trauma yang terstandarisasi
- Prioritaskan pemeriksaan yang paling kritis
- Gunakan peralatan positioning khusus trauma yang transparan terhadap radiasi
- Portable shields dapat diposisikan menutupi area sensitif yang tidak diperiksa
- Pertimbangkan modifikasi proyeksi standar sesuai kondisi pasien
- Horizon alignment untuk mengurangi pengulangan akibat rotasi
- Pada digital imaging, pertimbangkan post-processing alih-alih pengulangan

Pasien dengan Disabilitas: Adaptasi Prosedur

Adaptasi untuk pasien dengan disabilitas:

1. Pasien dengan disabilitas fisik:
  - Pertimbangkan modifikasi positioning standar
  - Gunakan alat bantu positioning khusus
  - Pertimbangkan proyeksi alternatif jika posisi standar tidak mungkin

- Eksposur lebih cepat untuk mengurangi ketidaknyamanan posisi
- 2. Pasien dengan gangguan kognitif:
  - Komunikasi sederhana dan bertahap
  - Melibatkan caregiver dalam persiapan dan positioning
  - Minimalisasi waktu persiapan sebelum eksposur
  - Pertimbangkan sedasi ringan untuk prosedur panjang (konsultasi medis)
- 3. Pasien dengan disabilitas sensorik:
  - Adaptasi metode komunikasi (visual cues untuk gangguan pendengaran)
  - Instruksi taktil bila diperlukan
  - Pastikan pasien memahami prosedur dengan konfirmasi

Pasien Hamil: Protokol Khusus dan Pertimbangan Etis

Proteksi radiasi untuk pasien hamil:

Pertimbangan dasar:

- Sel-sel janin sangat sensitif terhadap radiasi, terutama pada trimester pertama
- Dosis > 100 mGy dapat menyebabkan efek deterministik pada janin
- Dosis diagnostik tipikal biasanya < 10 mGy
- Justifikasi dan optimisasi sangat kritis

Protokol khusus:

- Konfirmasi status kehamilan sebelum pemeriksaan pelvis/abdomen
- Tunda pemeriksaan non-urgen hingga setelah kehamilan bila memungkinkan
- Pertimbangkan modalitas non-radiasi (USG, MRI)
- Gunakan pelindung janin (apron timbal) untuk pemeriksaan di luar area abdomen/pelvis
- Modifikasi protokol untuk mengurangi dosis (↑ kV, ↓ mAs, kolimasi ketat)
- Dokumentasi estimasi dosis janin untuk pemeriksaan abdomen/pelvis

Pertimbangan etis:

- Informed consent khusus untuk pasien hamil
- Diskusi tentang risiko dan manfaat
- Pertimbangkan risiko bila pemeriksaan tidak dilakukan
- Konsultasi dengan radiolog dan ahli fisika medis
- Dokumentasi proses pengambilan keputusan

Pasien Obesitas: Parameter Teknis dan Proteksi

Tantangan proteksi radiasi pada pasien obesitas:

Pertimbangan fisik:

- Atenuasi sinar-X lebih tinggi memerlukan peningkatan dosis
- Peningkatan radiasi hambur menurunkan kualitas gambar
- Dosis permukaan kulit lebih tinggi, meningkatkan risiko efek deterministik
- Positioning dan kolimasi lebih menantang

Adaptasi parameter teknis:

- Peningkatan kV (80-90 kV menjadi 100-120 kV untuk ekstremitas)
- Peningkatan mAs yang proporsional (25-50% lebih tinggi)
- Pertimbangkan grid dengan rasio lebih tinggi (12:1 vs 8:1)
- Peningkatan SID bila memungkinkan
- Penggunaan AEC dengan kalibrasi tepat
- Kolimasi yang cermat untuk mengurangi radiasi hambur

Strategi proteksi tambahan:

- Posisi pasien optimal untuk mengurangi ketebalan jaringan yang ditembus
- Pertimbangkan memisahkan pemeriksaan multipel (memberikan waktu recovery kulit)
- Pemantauan dosis permukaan, terutama untuk prosedur multipel
- Apron proteksi ekstra lebar bila diperlukan
- Pertimbangkan modalitas alternatif untuk kasus sangat obesitas

### 3. OPTIMALISASI PARAMETER TEKNIS

#### 3.1 Pemilihan kV Optimal

Hubungan kV dengan Kualitas Radiasi dan Kontras Gambar

Kilovoltage (kV) menentukan energi dan penetrasi sinar-X:

Efek kV pada karakteristik berkas:

- Energi rata-rata sinar-X  $\propto$  kV
- Penetrasi  $\propto$  kV
- Kontras gambar  $\propto$  1/kV (berbanding terbalik)

Efek kV pada kontras:

- kV rendah: Kontras tinggi, perbedaan jaringan lebih terlihat
- kV tinggi: Kontras rendah, perbedaan densitas kurang terlihat
- Perbedaan kontras lebih nyata pada jaringan dengan perbedaan nomor atom (Z) besar

Trade-off:

- kV tinggi mengurangi dosis tetapi juga mengurangi kontras
- kV rendah meningkatkan kontras tetapi meningkatkan dosis
- Optimasi kV mencari keseimbangan terbaik antara kontras dan dosis

Rule of Thumb Pemilihan kV Berdasarkan Ketebalan Pasien dan Jenis Jaringan

Panduan umum pemilihan kV berdasarkan anatomi:

Anatomi	Ketebalan (cm)	kV Rekomendasi
Ekstremitas (tangan, kaki)	4-8	55-65
Ekstremitas (sendi besar)	8-12	65-75
Kepala	15-20	70-80
Thorax (PA)	20-30	110-125
Abdomen/Pelvis	18-30	75-90
Lumbar Spine	20-30	80-95

Faktor koreksi ketebalan pasien:

- Untuk setiap 4-5 cm kenaikan ketebalan, tambahkan 10 kV
- Pasien pediatrik: Kurangi 5-15 kV dari nilai dewasa
- Pasien obesitas: Tambahkan 10-15 kV dari nilai standar

High kV Technique vs Low kV Technique: Pro dan Kontra

Perbandingan teknik kV tinggi vs kV rendah:

1. High kV Technique (>90 kV):
  - Pro: Dosis lebih rendah, penetrasi lebih baik, latitude lebih lebar
  - Kontra: Kontras rendah, radiasi hambur lebih banyak
  - Aplikasi ideal: Thorax, pasien besar, pemeriksaan dengan grid, proyeksi lateral
2. Low kV Technique (<70 kV):
  - Pro: Kontras tinggi, detail struktur halus lebih baik
  - Kontra: Dosis lebih tinggi, penetrasi lebih rendah
  - Aplikasi ideal: Ekstremitas, deteksi kalsifikasi, pemeriksaan jaringan lunak

Pemilihan teknik berdasarkan tujuan diagnostik:

- Deteksi fraktur halus: Low kV technique
- Visualisasi paru-paru: High kV technique

- Deteksi nodul paru: Moderate kV technique
- Pemeriksaan pediatrik: Moderate to low kV dengan mAs rendah

Pengaruh kV terhadap Dosis Permukaan dan Dosis Organ

Efek perubahan kV pada dosis:

Dosis permukaan (entrance skin dose):

- Meningkatkan kV 15% memungkinkan pengurangan mAs 50%
- Mengurangi dosis permukaan hingga 20-30%
- Efek paling signifikan pada pasien dengan ketebalan besar

Dosis organ:

- Efek kV pada dosis organ lebih kompleks
- Organ dangkal: Peningkatan kV mengurangi dosis
- Organ dalam: Peningkatan kV dapat meningkatkan dosis karena penetrasi lebih baik
- Rasio dosis organ/dosis entrance meningkat dengan kV

Dosis efektif:

- Peningkatan kV moderate (15-20%) umumnya mengurangi dosis efektif
- Peningkatan kV ekstrem dapat meningkatkan dosis efektif karena penetrasi terlalu tinggi

Strategi Optimalisasi kV untuk Berbagai Pemeriksaan

Strategi optimalisasi kV berdasarkan pemeriksaan:

1. Thorax:

- High kV technique (110-125 kV)
- Memaksimalkan perbedaan attenuasi udara-jaringan lunak-tulang
- Mengurangi dosis hingga 60% dibanding teknik konvensional (70-80 kV)
- Memerlukan grid rasio tinggi (12:1) untuk mengatasi radiasi hambur

2. Abdomen dan Pelvis:

- Moderate kV (75-90 kV)
- Balance antara kontras dan penetrasi
- kV lebih tinggi (90-100) untuk pasien besar
- kV lebih rendah (70-80) untuk deteksi lesi subtle

3. Ekstremitas:

- Low kV (55-65 kV)
- Maksimalkan kontras tulang-jaringan lunak

- Tingkatkan ke 65-75 kV untuk sendi besar (hip, shoulder)
  - Tidak perlu grid untuk ekstremitas tipis
4. Tulang Belakang:
- Cervical: 70-80 kV
  - Thoracic: 75-85 kV
  - Lumbar: 80-95 kV
  - Pertimbangkan kV lebih tinggi untuk proyeksi lateral

### 3.2 Pengaturan mAs Optimal

#### Hubungan mAs dengan Noise Gambar dan Dosis Radiasi

Milliamperere-seconds (mAs) adalah hasil perkalian antara arus tabung (mA) dan waktu eksposur (s):

Efek mAs pada karakteristik gambar:

- Densitas optik (film) atau nilai piksel (digital)  $\propto$  mAs
- Signal-to-noise ratio (SNR)  $\propto \sqrt{\text{mAs}}$
- Quantum noise  $\propto 1/\sqrt{\text{mAs}}$

Efek mAs pada dosis:

- Dosis radiasi  $\propto$  mAs (hubungan linier)
- Menggandakan mAs = menggandakan dosis
- Mengurangi mAs 50% = mengurangi dosis 50%

Untuk digital radiography:

- Overexposure kurang terlihat ("exposure latitude" lebar)
- Underexposure menghasilkan noise yang jelas
- Indikator eksposur (EI, DEI, etc.) menunjukkan kecukupan mAs

#### Strategi Pemilihan mAs Minimum yang Dapat Diterima

Pendekatan ALARA dalam pemilihan mAs:

1. Definisi "dapat diterima":
  - Noise tidak mengganggu interpretasi diagnostik
  - Detail penting masih terlihat jelas
  - Diagnostically Acceptable Image Quality (DAIQ)
2. Target SNR berdasarkan pemeriksaan:
  - Pemeriksaan dengan detail halus: SNR lebih tinggi

- Pemeriksaan kontras tinggi (tulang/udara): SNR lebih rendah cukup
  - High-contrast structures: Toleransi noise lebih tinggi
3. Strategi praktis:
- Mulai dengan nilai mAs referensi (chart)
  - Kurangi mAs 30-50% dan evaluasi kualitas gambar
  - Lakukan incremental adjustment berdasarkan feedback
  - Dokumentasikan nilai optimal untuk referensi
4. Pendekatan berbasis bukti:
- Image quality assessment subjektif
  - Objective metrics (SNR, CNR, DQE)
  - Phantom studies untuk validasi
  - Peer review gambar klinis

#### Kompensasi mAs untuk Variasi Ketebalan Pasien

Ketebalan pasien sangat memengaruhi atenuasi sinar-X dan kebutuhan mAs:

Aturan kompensasi:

- 15% Rule: Menambahkan 15% kV  $\approx$  menggandakan penetrasi
- Exponential Thickness Rule:  $mAs \propto e^{(\mu x)}$ , di mana  $\mu$  adalah koefisien atenuasi dan  $x$  adalah ketebalan

Panduan praktis:

- Untuk setiap penambahan 4-5 cm ketebalan, gandakan mAs (jika kV tetap)
- Pasien pediatrik: 50-80% dari mAs dewasa (tergantung ukuran)
- Pasien obesitas: mAs 2-3x nilai standar (dengan kV juga ditingkatkan)

Tabel kompensasi untuk thorax PA:

Kategori Pasien Ketebalan (cm) Faktor mAs (dibanding standar)

Pediatrik kecil	10-15	0.3-0.5x
Pediatrik besar	15-20	0.5-0.8x
Dewasa kurus	20-22	0.8-1.0x
Dewasa normal	22-25	1.0x (standar)
Dewasa besar	25-28	1.2-1.5x
Obesitas	>28	1.5-3.0x

## Automatic Exposure Control (AEC): Prinsip dan Penggunaan

AEC adalah sistem yang secara otomatis mengakhiri eksposur saat detektor menerima jumlah radiasi yang tepat:

Prinsip kerja:

- Ionization chambers atau solid-state detectors mendeteksi radiasi yang menembus pasien
- Sistem memutuskan eksposur saat level pre-set tercapai
- Kompensasi otomatis untuk variasi ketebalan dan densitas pasien

Komponen AEC:

- Sensor chambers (biasanya 3: tengah, lateral kanan, lateral kiri)
- Backup timer (mencegah overexposure)
- Density control (memungkinkan penyesuaian  $\pm 25\%$ )
- Chamber selection controls (memilih chamber aktif)

Penggunaan optimal:

- Pilih chamber sesuai region of interest (ROI)
- Posisikan ROI tepat di atas chamber aktif
- Set density adjustment sesuai kebutuhan
- Tetapkan mAs minimum dan maksimum yang aman
- Perhatikan struktur non-representatif di area sensor (implan, pacemaker)

Limitasi AEC:

- Tidak ideal untuk pasien pediatrik atau ekstremitas kecil
- Dapat terpengaruh oleh positioning yang tidak tepat
- Perlu kalibrasi dengan reseptor gambar spesifik
- Dapat tidak optimal untuk anatomi asimetris

Protokol Optimalisasi mAs untuk Radiografi Digital

Radiografi digital memiliki karakteristik berbeda dibanding film dalam hubungannya dengan mAs:

Karakteristik unik digital:

- Dynamic range lebar (exposure latitude)
- Post-processing dapat kompensasi variasi eksposur
- Overexposure tidak terlihat langsung (dose creep)
- Exposure index (EI) sebagai indikator kecukupan mAs

Strategi optimalisasi:

1. Target Exposure Index (EI):
  - Tetapkan EI target untuk setiap pemeriksaan
  - Monitor deviation index (DI) untuk mengidentifikasi penyimpangan
  - Terapkan range penerimaan yang ketat (misal  $DI \pm 0.5$ )
2. Protokol reduksi dosis bertahap:
  - Mulai dari protokol film-screen equivalent
  - Kurangi mAs bertahap (10-20% per tahap)
  - Evaluasi kualitas gambar pada setiap tahap
  - Tetapkan "low-dose protocol" berdasarkan hasil evaluasi
3. Optimalisasi berdasarkan anatomical region:
  - Thorax: Potensial reduksi mAs 30-50%
  - Ekstremitas: Potensial reduksi mAs 30-40%
  - Abdomen: Potensial reduksi mAs 20-30%
  - Lumbar spine: Potensial reduksi mAs 15-25%
4. Quality control program:
  - Monitoring rutin EI dan DI untuk semua pemeriksaan
  - Pelatihan operator tentang optimalisasi eksposur digital
  - Audit eksposur dan kualitas gambar berkala
  - Penyesuaian protokol berdasarkan umpan balik radiologis

### 3.3 Grid Ratio dan Air Gap Technique

Fungsi Grid Anti-Scatter dan Jenis-jenisnya

Grid anti-scatter berfungsi menyerap radiasi hambur sebelum mencapai reseptor gambar:

Fungsi dasar:

- Meningkatkan kontras gambar dengan mengurangi fog akibat hamburan
- Memungkinkan penggunaan kV lebih tinggi tanpa kehilangan kontras
- Meningkatkan definisi detail anatomi

Komponen grid:

- Strip penyerap (biasanya timbal)
- Material interspace (aluminum, fiber, carbon)
- Cover (aluminium, fiber karbon)

- Frame (aluminium, fiber, karbon, kayu)

Jenis-jenis grid:

1. Berdasarkan orientasi strip:
  - Parallel grid: Strip sejajar, arah tunggal
  - Crossed grid: Dua set strip tegak lurus (grid ganda)
  - Focused grid: Strip mengarah ke titik fokus (Bucky)
2. Berdasarkan pola:
  - Linear grid: Strip lurus paralel
  - Waffle pattern: Grid persegi
  - Honeycomb: Pola sarang lebah
3. Berdasarkan mobilitas:
  - Stationary grid: Tetap pada posisinya
  - Moving grid (Potter-Bucky): Bergerak selama eksposur untuk menghilangkan grid lines
  - Portable/mobile grid: Dapat dipindahkan, untuk pemeriksaan di luar ruangan

Grid Ratio: Pengaruh terhadap Dosis dan Kualitas Gambar

Grid ratio adalah rasio tinggi strip timbal terhadap jarak antar strip:

Jenis-jenis grid ratio:

- Low ratio: 5:1 (jarang digunakan)
- Medium ratio: 8:1 (umum untuk radiografi rutin)
- High ratio: 10:1, 12:1 (untuk thorax, abdomen, dan pemeriksaan dengan kV tinggi)
- Very high ratio: 15:1, 16:1 (spesialisasi, fluoroskopi)

Pengaruh grid ratio terhadap kualitas gambar:

- Grid ratio tinggi: Menghilangkan lebih banyak radiasi hambur
- Grid ratio tinggi: Kontras lebih baik
- Grid ratio tinggi: Lebih sensitif terhadap kesalahan alignment

Pengaruh grid ratio terhadap dosis:

- Grid ratio  $\uparrow$  = Factor mAs  $\uparrow$
- Grid 8:1 memerlukan peningkatan mAs 4x dibanding tanpa grid
- Grid 12:1 memerlukan peningkatan mAs 5-6x dibanding tanpa grid
- Grid 16:1 memerlukan peningkatan mAs 6-8x dibanding tanpa grid

## Grid Frequencies dan Pengaruhnya

Grid frequency adalah jumlah garis grid per cm atau inch:

Karakteristik:

- Low frequency: 25-30 lines/cm (grid lines mungkin terlihat)
- Medium frequency: 30-40 lines/cm (umum digunakan)
- High frequency: >40 lines/cm (grid lines sulit terlihat)

Pengaruh grid frequency:

- Grid frequency tinggi: Grid lines kurang terlihat pada gambar
- Grid frequency tinggi: Manufaktur lebih sulit, harga lebih mahal
- Grid frequency rendah: Grid lines mungkin terlihat pada teknik kV rendah
- Grid frequency optimal ditentukan oleh resolusi sistem pencitraan

## Air Gap Technique sebagai Alternatif Grid

Air gap technique menggunakan jarak antara pasien dan reseptor gambar untuk mengurangi radiasi hambur:

Prinsip dasar:

- Radiasi hambur memiliki sudut divergen dari pasien
- Dengan air gap, sebagian radiasi hambur tidak mengenai reseptor
- Radiasi primer tetap mencapai reseptor karena arah langsung

Teknik implementasi:

- Jarak pasien-reseptor: 15-20 cm
- Peningkatan SID (source-to-image distance) untuk kompensasi magnifikasi
- Biasanya SID 150-180 cm dibandingkan 100 cm standar

Perbandingan dengan grid:

- Keuntungan: Tidak memerlukan peningkatan dosis, lebih sederhana
- Kerugian: Magnifikasi gambar, penumbra geometris, memerlukan ruang lebih

Efektivitas:

- Air gap 15 cm  $\approx$  efektivitas grid 8:1
- Air gap 20 cm  $\approx$  efektivitas grid 10:1
- Optimal untuk pemeriksaan dengan kontras tinggi (thorax)

## Pemilihan Grid versus Air Gap untuk Berbagai Pemeriksaan

Pertimbangan pemilihan:

Faktor	Grid	Air Gap
Ketebalan pasien	Ideal untuk >10 cm	Lebih baik untuk <10 cm
Mobilitas	Berat, perlu bucky	Ringan, fleksibel
Dosis	Meningkatkan dosis	Tidak meningkatkan dosis
Detail	Detail maksimal	Slight blurring
Magnifikasi	Minimal	Signifikan (10-30%)
Setup	Mudah tapi berat	Memerlukan positioning khusus

Rekomendasi berdasarkan pemeriksaan:

- Thorax: Air gap untuk pasien kurus, grid 12:1 untuk pasien besar
- Ekstremitas (<10 cm): Non-grid atau air gap
- Ekstremitas besar (>10 cm): Grid 8:1
- Abdomen/Pelvis: Grid 10:1 atau 12:1
- Spine: Grid 10:1 atau 12:1
- Pediatrik: Hindari grid jika memungkinkan, gunakan air gap
- Mobile radiography: Grid ringan portabel atau non-grid

### 3.4 Teknik Pengganti untuk Mengurangi Paparan

Proyeksi PA vs AP: Pengurangan Dosis pada Organ Anterior

Proyeksi PA (posterior-anterior) vs AP (anterior-posterior):

Prinsip proteksi:

- Organ radiosensitif mayoritas terletak di anterior tubuh (tiroid, payudara, lensa mata, gonad)
- Pada proyeksi PA, organ-organ ini lebih jauh dari sumber radiasi
- Intensitas radiasi menurun dengan kuadrat jarak ( $1/d^2$ )
- Atenuasi jaringan sebelum mencapai organ radiosensitif lebih besar

Pengurangan dosis organ:

- Dosis payudara: 80-98% lebih rendah pada PA vs AP (sangat signifikan)
- Dosis tiroid: 80-90% lebih rendah pada PA vs AP
- Dosis mata: 90-95% lebih rendah pada PA vs AP
- Dosis efektif keseluruhan: 20-50% lebih rendah pada PA vs AP

Rekomendasi:

- PA untuk semua pemeriksaan thorax rutin
- PA untuk cervical dan thoracic spine bila memungkinkan
- PA untuk lumbar pada pasien non-trauma
- AP hanya bila kondisi pasien tidak memungkinkan posisi PA

Posisi Supine vs Prone: Pertimbangan Proteksi

Perbandingan posisi supine (terlentang) dan prone (tengkurap) dari perspektif proteksi radiasi:

Supine (untuk proyeksi AP):

- Posisi lebih nyaman untuk pasien
- Lebih mudah diatur
- Dosis lebih tinggi pada organ anterior
- Direkomendasikan untuk pasien trauma atau dengan kesulitan napas

Prone (untuk proyeksi PA):

- Dosis lebih rendah pada organ anterior
- Kompresi alami organ anterior, mengurangi ketebalan yang ditembus
- Lebih sulit untuk pasien dengan mobilitas terbatas
- Dosis gonad wanita 90-95% lebih rendah pada proyeksi PA prone vs AP supine

Rekomendasi berdasarkan pemeriksaan:

- Thorax: Prone (PA) bila memungkinkan
- Lumbar: Prone (PA) untuk mengurangi dosis gonad
- Abdomen: Prone untuk mengurangi dosis organ anterior
- Pediatrik: Prone dapat sangat mengurangi dosis gonad dan tiroid

Limited Sequences vs Full Series Radiografi

Pendekatan limited sequences:

Prinsip:

- Melakukan hanya proyeksi yang esensial untuk diagnosis
- Mengevaluasi hasil pemeriksaan awal sebelum tambahan proyeksi
- "Less is more" - fokus pada kualitas, bukan kuantitas gambar

Contoh implementasi:

- Thorax: Mulai dengan PA saja, lateral hanya jika diperlukan
- Ekstremitas: Mulai dengan 2 proyeksi, tambahan hanya jika diperlukan
- Spine: Fokus pada area yang dicurigai, hindari full spine series

- Trauma: Targeted views berdasarkan lokasi cedera, bukan full body series

Pengurangan dosis:

- Mengurangi jumlah proyeksi 1/3 = mengurangi dosis 1/3
- Menghindari duplikasi area yang tereksposi
- Menghindari pemeriksaan rutin yang tidak perlu (contoh: lateral thorax pada check-up)

Penggantian Radiografi dengan Modalitas Lain Bila Memungkinkan

Alternatif non-radiasi atau dosis rendah:

1. Ultrasonografi (USG):
  - Tanpa radiasi pengion
  - Ideal untuk: jaringan lunak, abdomen, obstetri, pediatrik, muskuloskeletal
  - Contoh penggantian: Abdominal USG vs KUB, shoulder USG vs radiografi
2. MRI (Magnetic Resonance Imaging):
  - Tanpa radiasi pengion
  - Ideal untuk: saraf, otak, jaringan lunak, sendi, tulang belakang
  - Contoh penggantian: MRI lumbar vs radiografi untuk low back pain
3. CT Dosis Rendah:
  - Dosis lebih tinggi dari radiografi konvensional tapi informasi lebih lengkap
  - Ultra-low dose CT untuk screening paru
  - Menggantikan multiple views radiografi dengan satu CT dosis rendah
4. Pemeriksaan Klinis:
  - Evaluasi fisik yang cermat dapat mengurangi kebutuhan pencitraan
  - Clinical decision rules (Ottawa ankle rules, Canadian C-spine rules)
  - Follow-up klinis vs radiografi berulang

Contoh Protokol Pengurangan Dosis pada Pemeriksaan Umum

1. Protokol Thorax Low-Dose:
  - PA proyeksi saja (lateral hanya jika diperlukan)
  - kV tinggi (120-130 kV)
  - Grid 12:1 atau air gap 15 cm
  - AEC dengan density setting -1
  - Hasil: Pengurangan dosis 50-70% dari protokol standar
2. Protokol Ekstremitas Pediatrik:

- Non-grid untuk semua pasien <10 tahun
  - kV rendah (50-60 kV)
  - mAs 50% dari nilai dewasa
  - Kolimasi ketat
  - Hasil: Pengurangan dosis 60-75% dari protokol dewasa
3. Protokol Lumbar Spine Optimized:
- PA proyeksi alih-alih AP
  - Limited sequences (PA dan lateral saja)
  - Gunakan 90 kV dengan grid 10:1
  - Kolimasi ketat pada region of interest
  - Hasil: Pengurangan dosis 40-60% dari protokol full series
4. Protokol Abdomen Pediatrik:
- Single view AP/PA
  - Filtrasi tambahan (0.1 mm Cu)
  - kV lebih tinggi, mAs lebih rendah
  - Kolimasi berdasarkan ukuran tubuh
  - Hasil: Pengurangan dosis hingga 80% dari protokol dewasa

### 3.5 Praktik Pengukuran dan Perhitungan Dosis

Metode Pengukuran Dosis: TLD, OSL, Dosimeter Elektronik

Berbagai metode pengukuran dosis radiasi:

1. Thermoluminescent Dosimeter (TLD):
  - Prinsip: Material kristal yang menyimpan energi radiasi dan melepaskannya sebagai cahaya saat dipanaskan
  - Material: LiF, CaSO<sub>4</sub>, CaF<sub>2</sub>
  - Keunggulan: Kecil, akurat, rentang dosis lebar, tidak terpengaruh medan elektromagnetik
  - Keterbatasan: Pembacaan tidak langsung, perlu reader khusus
2. Optically Stimulated Luminescence (OSL):
  - Prinsip: Material kristal disinari laser untuk melepaskan energi tersimpan sebagai cahaya
  - Material: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:C (aluminium oksida terdoping karbon)

- Keunggulan: Akurat, dapat dibaca berulang, sensitif pada dosis rendah
  - Aplikasi: Dosimeter personel, pemantauan area
3. Dosimeter Elektronik:
- Prinsip: Deteksi langsung radiasi dengan detektor solid state
  - Jenis: Semiconductor diode, ionization chamber based
  - Keunggulan: Pembacaan real-time, alarm dosis dan laju dosis, penyimpanan data
  - Aplikasi: Monitoring personal dalam prosedur intervensional, survei area
4. Ionization Chamber:
- Prinsip: Pengukuran arus listrik yang dihasilkan oleh ionisasi udara
  - Keunggulan: Akurasi tinggi, standar emas untuk dosimetri
  - Aplikasi: Kalibrasi peralatan, pengukuran output tabung sinar-X

Entrance Surface Dose (ESD): Pengukuran dan Perhitungan

Entrance Surface Dose (ESD) adalah dosis yang diterima di permukaan kulit pasien saat titik masuk berkas sinar-X:

Metode pengukuran langsung:

- Penempatan dosimeter pada permukaan kulit (TLD, OSL)
- Penempatan dosimeter pada phantom dan koreksi untuk ketebalan pasien
- Ionization chamber pencil dengan koreksi backscatter

Metode perhitungan:

$$ESD = Output \times (100/FSD)^2 \times mAs \times BSF$$

di mana:

- Output = output tabung sinar-X (mGy/mAs) pada jarak referensi 100 cm
- FSD = focus-to-skin distance (cm)
- mAs = milliampere-seconds yang digunakan
- BSF = backscatter factor (1.3-1.4 untuk tubuh, 1.1 untuk ekstremitas)

Nilai tipikal ESD untuk beberapa pemeriksaan:

- Thorax PA: 0.1-0.2 mGy
- Abdomen AP: 3-6 mGy
- Lumbar AP: 5-10 mGy
- Ekstremitas: 0.1-1 mGy

Dose Area Product (DAP): Penggunaan dan Interpretasi

Dose Area Product (DAP) adalah produk dari dosis radiasi dan luas area yang disinari:

Karakteristik:

- Satuan: Gy·cm<sup>2</sup> atau mGy·cm<sup>2</sup>
- Independen terhadap jarak (inverse square law dikompensasi oleh peningkatan area)
- Mencerminkan dosis total yang diterima pasien
- Lebih representatif untuk risiko stokastik dibanding ESD

Metode pengukuran:

- DAP meter (ionization chamber transparan) dipasang pada kolimator
- Pembacaan langsung pada konsol kontrol modern
- Kalibrasi periodik diperlukan

Interpretasi nilai DAP:

- Thorax PA: 0.1-0.2 Gy·cm<sup>2</sup>
- Abdomen AP: 1-3 Gy·cm<sup>2</sup>
- Pelvis: 1-3 Gy·cm<sup>2</sup>
- Lumbar spine: 1-5 Gy·cm<sup>2</sup>
- Fluoroskopi diagnostik: 5-50 Gy·cm<sup>2</sup>
- Fluoroskopi intervensional: 50-500 Gy·cm<sup>2</sup>

Aplikasi DAP:

- Perbandingan dosis antar prosedur
- Monitoring tren dosis temporal
- Perbandingan dengan Diagnostic Reference Levels (DRLs)
- Estimasi dosis efektif melalui faktor konversi

Perhitungan Estimasi Dosis Organ dan Dosis Efektif

Estimasi dosis organ dari pengukuran ESD atau DAP:

Metode faktor konversi:

$$\text{Dosis Organ} = \text{ESD} \times \text{CF}_{\text{organ}}$$

atau

$$\text{Dosis Organ} = \text{DAP} \times \text{CF}_{\text{organ}}$$

di mana CF<sub>organ</sub> adalah faktor konversi spesifik organ (mSv/mGy atau mSv/Gy·cm<sup>2</sup>)

Perhitungan dosis efektif:

$$\text{Dosis Efektif (E)} = \sum w_T \times H_T$$

di mana:

- $w_T$  = faktor pembobotan jaringan (dari ICRP)
- $H_T$  = dosis ekuivalen pada jaringan/organ T

Pendekatan alternatif:

$$\text{Dosis Efektif} = \text{DAP} \times \text{CF}_E$$

di mana  $\text{CF}_E$  adalah faktor konversi dosis efektif ( $\text{mSv/Gy}\cdot\text{cm}^2$ )

Faktor konversi E/DAP untuk beberapa pemeriksaan:

- Thorax PA: 0.17-0.22  $\text{mSv/Gy}\cdot\text{cm}^2$
- Abdomen AP: 0.18-0.20  $\text{mSv/Gy}\cdot\text{cm}^2$
- Pelvis AP: 0.21-0.28  $\text{mSv/Gy}\cdot\text{cm}^2$
- Lumbar AP: 0.18-0.21  $\text{mSv/Gy}\cdot\text{cm}^2$

Diagnostic Reference Levels (DRLs) sebagai Panduan

Diagnostic Reference Levels (DRLs) adalah nilai acuan dosis untuk prosedur radiologi spesifik:

Karakteristik DRLs:

- Biasanya ditetapkan pada persentil ke-75 dari distribusi dosis pada praktik klinis
- Bukan batas dosis atau nilai optimal
- Indikator untuk mengidentifikasi praktik dengan dosis tidak biasa tinggi
- Specific untuk prosedur dan pasien (dewasa vs pediatrik)
- Ditinjau dan diperbarui secara berkala (3-5 tahun)

Penggunaan DRLs:

- Membandingkan dosis median fasilitas dengan DRLs
- Jika secara konsisten melebihi DRLs, investigasi dan optimasi diperlukan
- Sebagai alat untuk mengidentifikasi kebutuhan optimasi
- Benchmark untuk protokol baru

Contoh nilai DRLs (nilai indikatif, dapat bervariasi antar negara):

Pemeriksaan ESD (mGy) DAP ( $\text{Gy}\cdot\text{cm}^2$ )

Thorax PA 0.2 0.15

Thorax LAT 0.8 0.4

Lumbar AP 5 1.5

Lumbar LAT 15 2.5

Pemeriksaan ESD (mGy) DAP (Gy·cm<sup>2</sup>)

Pelvis AP 5 3

Abdomen AP 5 3

## RINGKASAN

Proteksi radiasi dalam radiologi konvensional melibatkan penerapan metode praktis dan penggunaan alat-alat pelindung yang tepat untuk meminimalkan paparan radiasi pada pasien, staf, dan masyarakat umum. Optimalisasi parameter teknis radiografi sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara kualitas gambar diagnostik dan dosis radiasi.

Poin-poin Kunci:

### 1. Alat Proteksi Radiasi:

- Pemilihan dan penggunaan APD yang tepat (apron, thyroid shield, kacamata timbal)
- Perawatan dan pengujian berkala peralatan proteksi radiasi
- Desain ruang pemeriksaan dengan barrier radiasi yang memadai

### 2. Teknik Proteksi Radiasi:

- Penerapan prinsip waktu, jarak, dan perisai
- Positioning pasien yang optimal untuk mengurangi dosis organ radiosensitif
- Teknik kolimasi ketat dan filtrasi yang tepat

### 3. Optimalisasi Parameter Teknis:

- Pemilihan kV optimal berdasarkan anatomi dan tujuan diagnostik
- Penggunaan mAs minimal yang masih menghasilkan kualitas diagnostik
- Penerapan grid dan air gap technique secara tepat
- Teknik pengganti untuk mengurangi paparan radiasi

### 4. Pengukuran dan Monitoring Dosis:

- Metode pengukuran dosis radiasi
- Perhitungan dan interpretasi dosis pasien
- Benchmark terhadap Diagnostic Reference Levels (DRLs)

Dengan memahami dan menerapkan konsep-konsep ini secara konsisten, penata radiologi dapat memberikan layanan pencitraan diagnostik yang optimal sambil menjaga dosis radiasi serendah mungkin sesuai prinsip ALARA.

## PENUGASAN

1. Evaluasi Checklist Proteksi Radiasi untuk Pemeriksaan:
  - Buatlah checklist evaluasi proteksi radiasi untuk pemeriksaan ekstremitas, thorax, dan abdomen
  - Sertakan parameter teknis, positioning, alat proteksi, dan pertimbangan khusus
  - Format: Form evaluasi terstruktur
  - Deadline: [Tanggal]
2. Protokol Pengaturan Parameter Teknis:
  - Pilih salah satu: Radiografi thorax pediatrik ATAU Radiografi lumbal geriatri
  - Kembangkan protokol optimasi parameter teknis (kV, mAs, SID, kolimasi, filtrasi)
  - Jelaskan justifikasi pemilihan parameter
  - Sertakan pertimbangan proteksi radiasi spesifik
  - Format: SOP 2-3 halaman
  - Deadline: [Tanggal]

#### REFERENSI

1. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection
2. NCRP Report No. 147: Structural Shielding Design for Medical X-Ray Imaging Facilities
3. Bushberg, J.T., et al. (2020). The Essential Physics of Medical Imaging, 4th Edition
4. Peraturan BAPETEN tentang Keselamatan Radiasi dalam Penggunaan Pesawat Sinar-X
5. Bushong, S.C. (2021). Radiologic Science for Technologists: Physics, Biology, and Protection, 12th Edition
6. Image Wisely Campaign: [www.imagewisely.org](http://www.imagewisely.org)
7. Image Gently Campaign: [www.imagegently.org](http://www.imagegently.org)