

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Review Penelitian Sebelumnya

Review penelitian sebelumnya bertujuan untuk mendapatkan bahan perbandingan dan untuk menghindari kesamaan dalam penulisan penelitian ini. Berikut adalah hasil penelitian sebelumnya yang berhubungan dengan judul penelitian penulis

No.	Nama	Judul Penelitian	Hasil penelitian
1	Moh Lukman Khakim, R. Syarifuddin, Hanto, W. Dwi K., F. Sofi (2025)	Effect of Radiographic Film Quality on SMAW Weld Defect Detection in SA 240 Gr 316L Pressure Vessels	Peningkatan kualitas film dan koreksi parameter eksposur (termasuk SFD dan densitas film) meningkatkan sensitivitas deteksi cacat; hasil mendukung standar ASME V
2	Aulia Riska, Syukran, H. Lubis (2025)	Inspection of Pipe Welds Using the Radiography Method with Double Wall Double Image Technique	Teknik DWDI efektif digunakan untuk pipa berdimensi kecil–sedang; menghasilkan citra yang memenuhi IQI dan densitas standar

3	R. Ramli, M.S.M. Amin, M.H. Zasikin (2021)	The Effect of Object to Film Distance (OFD) to Industrial Radiography Image	OFD berpengaruh pada ketajaman & unsharpness; hasil mendukung teori unsharpness geometrik & inverse square law
4	Z. Liu, X. Hu, Z. Zhang (2025)	Analysis of Radiation Level and Estimation of Protection Distance of γ Mobile Flaw Detection Source	Pengurangan intensitas radiasi sebanding kuadrat jarak; mendukung konsep inverse square law yang relevan dengan SFD
5	Roudotul,S (2024)	TEKNIK RADIOGRAFI DWDV DENGAN SUMBER RADIASI KAMERA GAMMA PADA LASAN PIPA 2,5" SCH 40	Penerapan teknik DWDV elips sangat efektif untuk mendeteksi kualitas interior pipa berdiameter kecil tanpa merusak material, dengan parameter waktu penyinaran yang sangat bergantung pada ketebalan dan kerapatan material uji

Tabel 2.1 Hasil Penelitian sebelumnya

2.2 Inspeksi *Non-Destructive Testing* (NDT)

Non-Destructive Testing (NDT) merupakan metode pengujian yang digunakan untuk mengevaluasi kondisi material, komponen, atau struktur tanpa merusak fungsi maupun integritasnya. *Non-Destructive Testing* (NDT) memiliki peranan penting dalam industri, khususnya pada sektor energi, migas, petrokimia, dan manufaktur, di mana keandalan sistem dan keselamatan operasi menjadi prioritas utama. (Abdollahi-Mamoudan et al., 2025)

Pada sistem perpipaan industri, *Non-Destructive Testing* (NDT), khususnya *Radiographic Testing* (RT), digunakan secara luas untuk mendeteksi berbagai ketidaksempurnaan seperti cacat pengelasan, pengurangan ketebalan akibat korosi, serta diskontinuitas internal lainnya yang tidak terlihat secara visual tetapi berpotensi menyebabkan kegagalan mekanis selama operasi. Radiografi industri baik yang menggunakan sinar-X maupun gamma ray, mampu menghasilkan citra internal material dan sambungan las tanpa merusak komponen yang diuji, sehingga efektif dalam mengungkap cacat internal seperti porositas, retakan, atau pengelasan tidak sempurna yang dapat membahayakan integritas perpipaan (Alnaily & Abdollahi, 2024; Mahvelatishamsabadi & Lee, 2025).

Dibandingkan metode destruktif yang mengharuskan pemotongan atau pengambilan sampel material sehingga mengakibatkan kerusakan permanen, NDT memungkinkan inspeksi selama masa operasi peralatan tanpa menghentikan proses produksi secara signifikan. Hal ini mendukung strategi pemeliharaan berbasis kondisi (*condition-based maintenance*) dan inspeksi prediktif (*predictive maintenance*), yang penting untuk menjaga kontinuitas operasional dan meminimalkan waktu

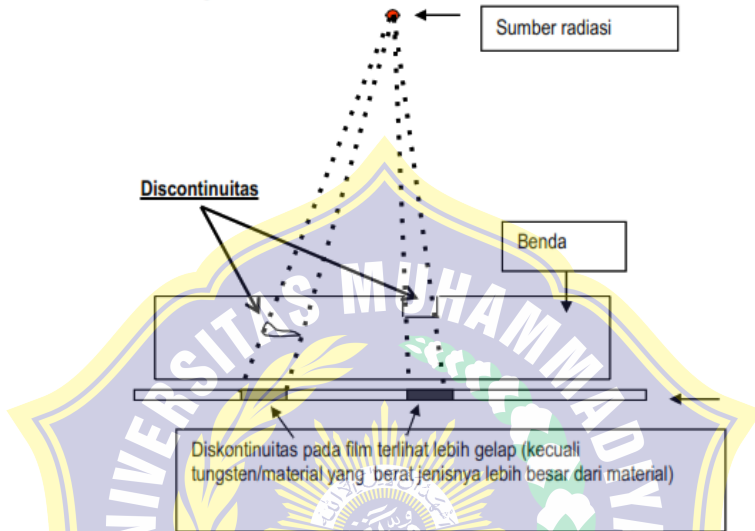
henti produksi pada fasilitas industri besar seperti kilang minyak dan sistem distribusi gas bertekanan tinggi. (Hasan, l. ul, 2025)

Karena sifatnya yang *non-invasif* dan dapat diulang secara berkala, NDT termasuk radiografi telah menjadi bagian integral dari program *Asset Integrity Management* (AIM) dan penilaian *Fitness-for-Service* (FFS), dimana hasil inspeksi digunakan sebagai dasar teknis dalam mengevaluasi kelayakan operasi komponen kritis, merencanakan perbaikan atau penggantian, serta menjamin keselamatan dan keandalan aset industri sepanjang siklus hidupnya. (Hasan, l. ul, 2025)

2.3 Prinsip Radiografi industri

Radiografi industri merupakan salah satu metode NDT yang memanfaatkan radiasi pengion untuk menghasilkan citra internal suatu objek tanpa merusak material yang diuji, radiasi ini menembus material yang kemudian direkam pada film atau detektor digital untuk menunjukkan perbedaan penyerapan berdasarkan sifat material (mislanya densitas dan ketebalan), sehingga cacat internal dapat diidentifikasi melalui kontras citra yang dihasilkan. Prinsip dasar radiografi didasarkan pada perbedaan kemampuan material dalam menyerap atau melemahkan radiasi yang melewatinya, dimana variasi kepadatan dan ketebalan material menyebabkan perbedaan tingkat atenuasi yang termanifestasi sebagai variasi kegelapan atau intensitas pada film atau detektor (differential attenuation of ionizing radiation). Ketika radiasi menembus material uji, intensitas radiasi yang keluar dan diterima oleh media perekam akan dipengaruhi oleh komposisi atomik, ketebalan, dan karakteristik densitas objek tersebut, area yang lebih padat atau lebih tebal menyerap lebih banyak radiasi, sehingga menghasilkan perbedaan intensitas yang dapat diinterpretasikan

sebagai indikasi cacat internal seperti porositas, retakan, atau inklusi (Abdollahi-Mamoudan et al., 2025; Moussa et al., 2025)



Gambar 2.1 Prinsip dasar radiografi

Sumber: https://www.academia.edu/attachments/117058215/download_file

2.4 Karakteristik Sumber Radiasi Iridium-192 (Ir-192)

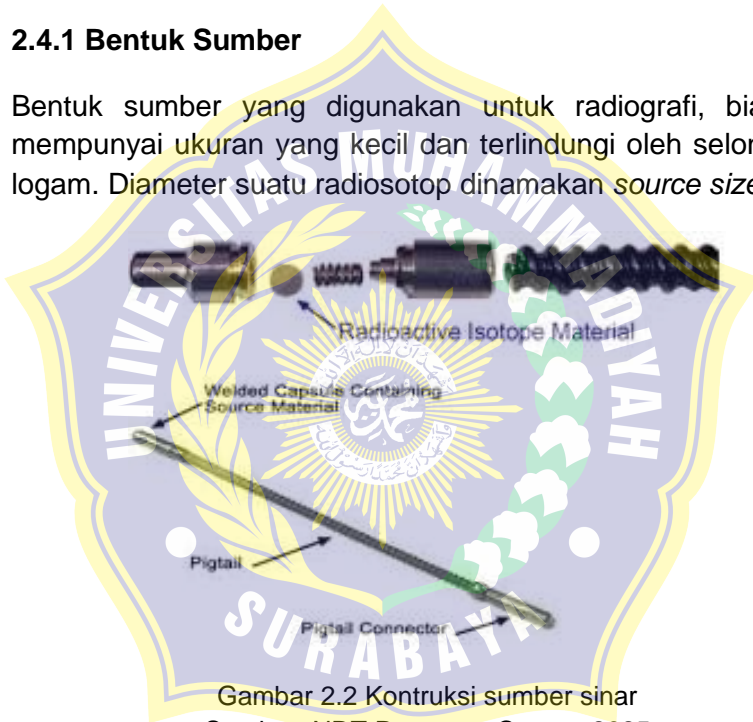
Iridium-192 (Ir-192) merupakan sumber radiasi gamma yang paling umum digunakan dalam radiografi industri, khususnya untuk inspeksi pipa dan sambungan las dengan ketebalan menengah. Ir-192 memiliki spektrum energi gamma yang relatif sesuai untuk material baja dengan ketebalan beberapa milimeter hingga puluhan milimeter. (Moussa et al., 2025)

Keunggulan Ir-192 antara lain ukuran yang relatif kecil, fleksibilitas penggunaannya di lapangan, serta kemampuan

penetrasi yang cukup baik untuk pipa berdimensi kecil hingga menengah (Riska et al, 2022). Namun Ir-192 juga memiliki keterbatasan, seperti kecenderungan menghasilkan hamburan radiasi yang dapat menurunkan kontras citra, terutama pada objek ber dinding tipis dan bergeometri melengkung. (Abdollahi-Mamoudan et al., 2025)

2.4.1 Bentuk Sumber

Bentuk sumber yang digunakan untuk radiografi, biasanya mempunyai ukuran yang kecil dan terlindungi oleh selongsong logam. Diameter suatu radiosotop dinamakan *source size*



Gambar 2.2 Kontruksi sumber sinar
Sumber: NDT Resource Center, 2025

2.4.2 Perisai Radiasi

Radiosotop Ir.192 memancarkan radiasi sepanjang waktu dan ke segala arah, sehingga bila digunakan secara langsung sangatlah tidak aman. Untuk itu maka diperlukan kontainer yang didisain

husus sebagai tempat penyimpanan radiosotop pada saat tidak digunakan, kontainer tersebut dinamakan *gamma projector* atau kamera gamma radiografi.



Gambar 2.3 Kamera Gamma (Type Sentinel 880 Delta)
 Sumber: <https://www.qnde.ca/produit/sentinel-880-source/>

Material	Timah hitam (lead)	Heavy Alloy	Uranium susut kadar (depleted uranium)
1) Nomor Atom	82	94 % Tungsten-74 3% Cooper-29 3% Nickel	92
2) Densitas	11,3	17	19
3) Titikleleh °C	327	3410-3420	1105-1132
4) Proses metalurgi dalam pembuatan rumah sumber (source housing)	Fabrication and casting	Sintering	Casting
5) <i>Half value thickness</i> (mm)			
Co-60	12,45	7,65	6,88
Ir-192	4,83	3,2	2,71

Table 2.2 Material dan karakteristik perisai
 Sumber: Pusdiklat BATAN, 2013

2.4.3 Crank Cable dan Source Cable

Crank cable, yang sering disebut drive cable atau control cable, adalah kabel baja spiral fleksibel yang terhubung ke sumber radioaktif melalui pigtail dan dikelola melalui mekanisme engkol (*crank*) pada unit kontrol.

Fungsi dalam pengoperasian:

1. Menggerakkan sumber radioaktif
Dengan memutar engkol pada crank cable, operator memaksakan sumber untuk keluar dari kamera dan masuk ke guide tube sampai mencapai posisi penyinaran yang ditentukan.
2. Retraksi Sumber
Setelah waktu eksposur selesai, putaran engkol arah berlawanan akan menarik kembali sumber ke dalam kamera untuk menyelesaikan operasi secara aman.
3. Jauhkan radiografer dari sumber
Panjang crank cable diatur sedemikian rupa sehingga radiografer dapat berada pada jarak aman dari kamera selama operasi, mengurangi paparan radiasi
4. Kontrol manual Presisi
Crank memberikan kontrol manual terhadap pergerakan sumber, termasuk kecepatan dan posisi akhir sumber.



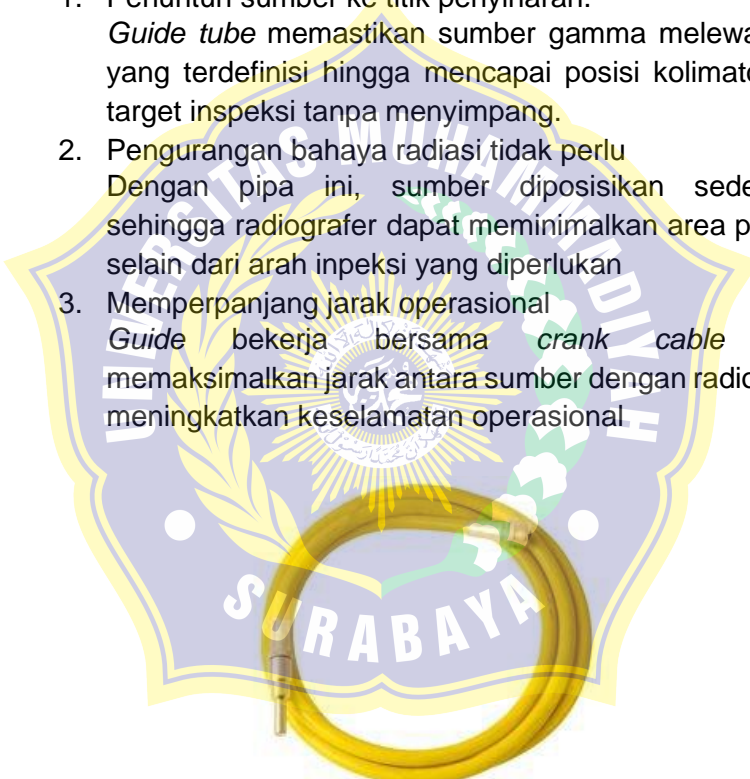
Gambar 2.4 Crank Cable

Sumber: <https://www.qsa-global.com/sentry-series-gamma-ray-source-projectors>

Source guide cable, sering disebut juga *guide tube*, adalah pipa/fleksibel konduktif yang terpasang pada ujung depan kamera yang fungsinya mengatur dan memandu sumber radioaktif dari kamera menuju titik penyinaran yang diinginkan.

Fungsi dalam pengoperasian:

1. Penuntun sumber ke titik penyinaran.
Guide tube memastikan sumber gamma melewati jalur yang terdefinisi hingga mencapai posisi kolimator atau target inspeksi tanpa menyimpang.
2. Pengurangan bahaya radiasi tidak perlu
Dengan pipa ini, sumber diposisikan sedemikian sehingga radiografer dapat meminimalkan area paparan selain dari arah inspeksi yang diperlukan
3. Memperpanjang jarak operasional
Guide bekerja bersama *crank cable* untuk memaksimalkan jarak antara sumber dengan radiografer, meningkatkan keselamatan operasional



Gambar 2.5 Source Guide Tube

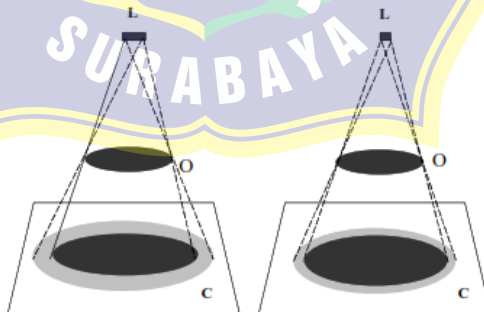
Sumber: <https://www.ndtmart.com/source-guide-tube-extension-6-6-p-3456.html>

2.5 Ketidaktajaman geometri / *Unsharpness Geometri (Ug)* dan Jarak minimal sumber ke Film / *Source Film Distance (SFD) minimal*

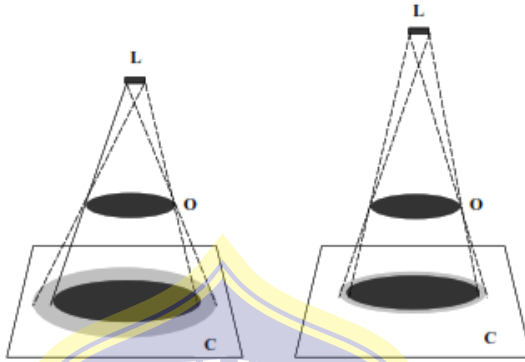
2.5.1 Ketidaktajaman geometri / *Unsharpness Geometri (Ug)*

Bayangan yang dihasilkan pada film hasil radiografi mempunyai batas tepi yang tidak jelas atau tidak tajam tersebut dinamakan ketidaktajaman geometri (*unsharpness geometry, Ug*) atau *penumbra* atau *gradien* tepi. Dalam radiografi, ketidaktajaman geometri yang kecil diinginkan untuk memperoleh gambar dengan definisi yang baik. Penyebab utama terjadinya penumbra adalah karena sumber radiografi berdimensi (bukan sumber titik), Jarak sumber ke film (*Source to Film Distance, SFD*) yang terlalu dekat, dan jarak obyek ke film (*Object to Film Distance, OFD*) yang terlalu jauh juga memperbesar penumbra. (Xiong et al., 2023; Sutanto et al., 2025).

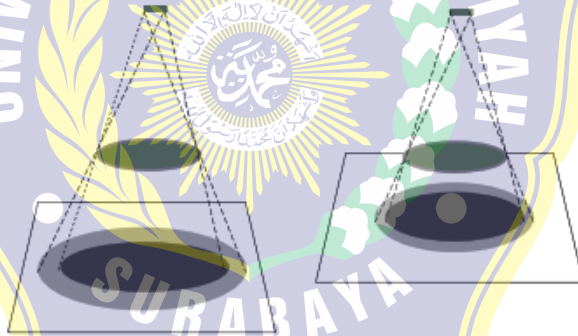
Pengaruh ketiga faktor tersebut terhadap penumbra ditunjukkan pada Gambar 2.6, 2.7, dan 2.8 dimana L adalah sumber, O adalah Obyek, dan C adalah film.



Gambar 2.6 Pengaruh ukuran sumber radiasi terhadap penumbra
Sumber: Pusediklat BATAN, 2013



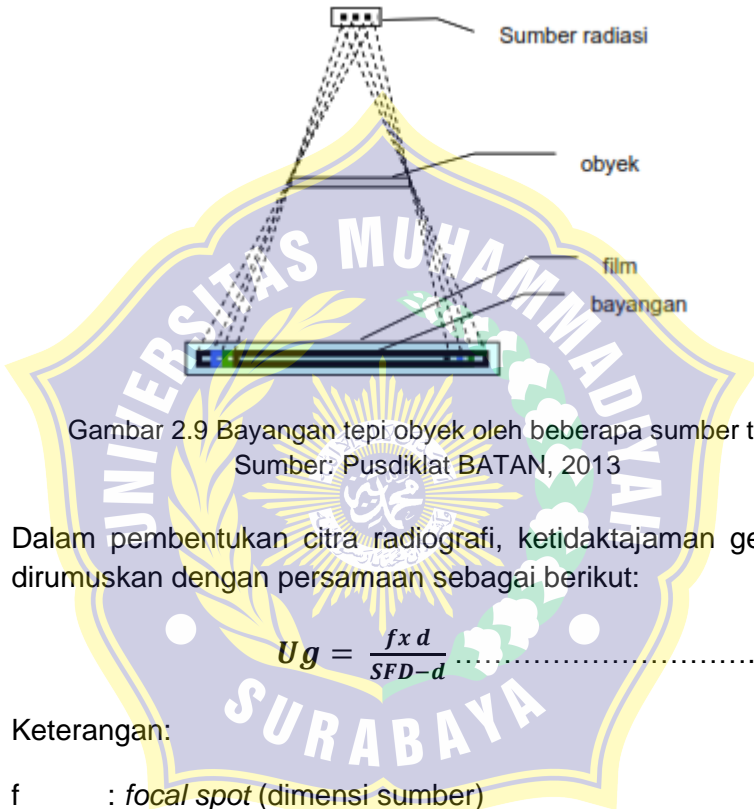
Gambar 2.7 Pengaruh jarak sumber radiasi ke obyek terhadap penumbra
 Sumber: Pusediklat BATAN, 2013



Gambar 2.8 Pengaruh jarak layar ke obyek terhadap penumbra
 Sumber: Pusediklat BATAN, 2013

Terjadinya ketidaktajaman geometri karena *focal spot* atau sumber radiasi gamma tersusun atas banyak sumber titik. Sumber-sumber titik ini masing-masing membentuk gambar obyek pada tempat yang berbeda-beda, sehingga gambar obyek

yang dibentuk setiap sumber titik tidak berada pada tempat yang sama dalam film dan sebagian saling menumpuk, seperti ditunjukkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.9 Bayangan tepi obyek oleh beberapa sumber titik
 Sumber: Pusdiklat BATAN, 2013

Dalam pembentukan citra radiografi, ketidaktajaman geometri dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Ug = \frac{fx d}{SFD-d} \dots\dots\dots(2.1)$$

Keterangan:

- f : focal spot (dimensi sumber)
- SFD : Jarak sumber ke film
- d : Jarak sisi material yang menghadap sumber ke film, pada teknik *Doble Wall Double View* (DWDV) besarnya d sama dengan diameter luar las.

Bila geometric unsharpness melebihi nilai maksimalnya maka, harus dilakukan penyesuaian jarak sumber ke film / *Source to Film Distance* (SFD). Berikut ini merupakan nilai batasan untuk

nilai *geometric unsharpness* berdasarkan ketebalan material / obyek uji.

Material Thickness, in. (mm)	U_g Maximum, in. (mm)
<2 (<50)	0.020 (0.51)
2 through 3 (50 through 75)	0.030 (0.76)
>3 through 4 (>75 through 100)	0.040 (1.02)
>4 (>100)	0.070 (1.78)

Table 2.3 *Geometric Unsharpness Limitations*

Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025.

2.5.2 Jarak minimal sumber ke Film / *Source Film Distance (SFD) minimal*

Source Film Distance (SFD) adalah jarak antara radiasi dan film radiografi. SFD merupakan salah satu parameter geometris utama dalam radiografi yang secara langsung mempengaruhi kualitas citra.

Secara teoritis, peningkatan SFD akan meningkatkan ketajaman citra dengan menurunkan nilai *geometric unsharpness*. Namun, peningkatan SFD juga menyebabkan penurunan intensitas radiasi yang diterima film, sehingga membutuhkan waktu eksposur yang lebih lama. Sebaliknya, SFD yang terlalu kecil dapat meningkatkan intensitas radiasi tetapi menurunkan ketajaman citra akibat efek geometri.

Dengan demikian pemilihan SFD merupakan kompromi antara kualitas citra, waktu eksposur, dan keselamatan radiasi.

Berdasarkan ASME Section V Edisi Tahun 2025, dalam menentukan SFD minimum adalah sebagai berikut:

$$SFD_{minimum} = \left(\frac{f}{Ug_{max}} + 1 \right) \times d \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- $SFD_{minimum}$: Jarak minimum sumber ke film
- Focal Spot (f) : Dimensi sumber
- Ug_{max} : Ketidaktajaman geometri
- d : Jarak sisi material yang menghadap sumber ke film, pada teknik DWDV besarnya d sama dengan diameter luar las (*Outside Diameter + Reinforcement*)

2.6 Teknik Penyinaran Double Wall Double View (DWDV)

Teknik penyinaran Double Wall Double View (DWDV) merupakan cara penyinaran dengan meletakkan sumber radiasi sedemikian rupa, sehingga radiasi menembus kedua dinding benda uji dan pada film tergambar kedua dinding las tersebut. Teknik DWDV terdiri dari teknik *ellip* dan teknik *superimposed*. Mengacu pada standar ASME Section V *Article 2*, teknik DWDV digunakan untuk radiografi lasan pada pipa dengan diameter luar (*outside diameter*) nominal pipa lebih kecil atau sama dengan 3,5 inchi (89 mm)

2.6.1 Teknik Double Wall Double View (Ellip)

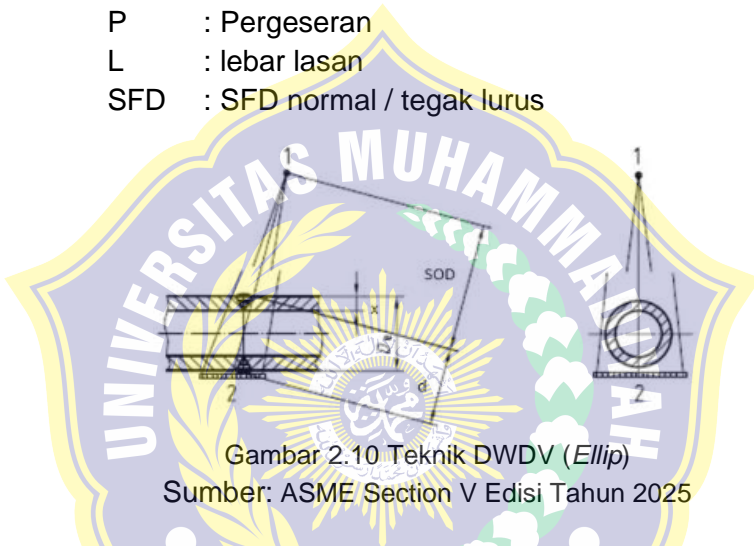
Teknik ellip dilakukan dengan meletakkan sumber radiasi membentuk sudut terhadap bidang normal las sehingga gambar kedua bagian dinding benda uji (*source side* dan *film side*) berbentuk ellip. Pembentukan sudut pada teknik ellip dapat

dilakukan dengan menggeser sumber radiasi dari bidang normalnya sejauh P, yang ditentukan dengan persamaan empiris sebagai berikut:

$$P = \frac{1}{5} x SFD + 2xL \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana:

- P : Pergeseran
- L : lebar lasan
- SFD : SFD normal / tegak lurus

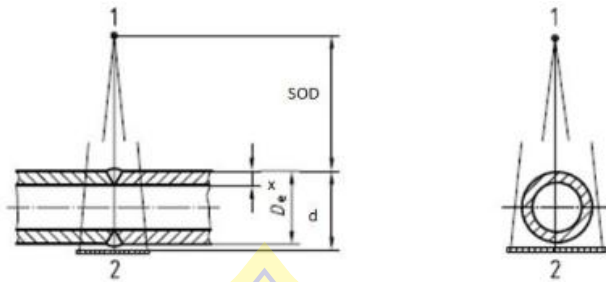


Gambar 2.10 Teknik DWDV (Ellip)

Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

2.6.2 Teknik **Double Wall Double View (Superimposed)**

Teknik DWDV (*superimposed*) merupakan teknik alternatif bilamana teknik ellip tidak dapat dilakukan, dimana teknik ini dengan meletakkan sumber tegak lurus terhadap benda uji, sehingga gambar kedua dinding benda uji menumpuk.



Gambar 2.11 Teknik DWDV (*suprimposed*)
 Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

2.6.3 Waktu Penyinaran Teknik DWDV

Perhitungan waktu penyinaran didasarkan pada ketebalan yang ditembus radiasi. Pada teknik DWDV dengan radiasi menembus dua ketebalan las, waktu penyinaran didasarkan pada dua ketebalan material ditambah tinggi reinforcement, Untuk DWDV-*ellip*, waktu penyinaran dengan sinar gamma dapat ditentukan dengan persamaan:

$$t = \left(\frac{SFD_{ellip}}{SFD_{kurva}} \right)^2 \times \frac{E}{A} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

- A : Aktivitas sumber gamma (Ci)
- E : Nilai exposure yang ditentukan dari kurva penyinaran yang didasarkan pada dua ketebalan las (Ci-Menit)

SFD *ellip* ditentukan dengan menggunakan persamaan Phytagoras sebagai berikut:

$$SFD_{ellip} = \sqrt{SFD_{\perp}^2 + P^2} \dots\dots\dots(2.5)$$

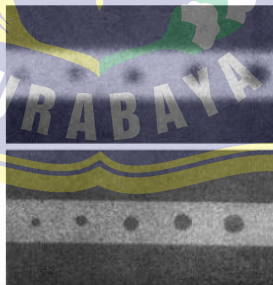
2.7 Sensitivitas radiografi dan Kualitas citra radiografi

Sensitivitas radiografi berhubungan dengan ukuran detail diskontinuitas terkecil yang dapat dilihat pada film hasil radiografi atau kemudahan gambar detail diskontinuitas terkecil untuk dapat di deteksi, Sensitivitas radiografi erat hubungannya dengan kualitas citra radiografi, yakni bila suatu radiograf memiliki kualitas citra yang baik maka dapat mendeteksi diskontinuitas (detail) dengan baik.

Sensitivitas radiografi dan kualitas citra radiografi ditentukan oleh dua parameter yang tidak saling mempengaruhi yaitu kontras radiografi dan definisi radiografi.

Kontras radiografi adalah perbedaan densitas pada suatu daerah terhadap daerah sekitarnya pada film radiografi. Pada gambar 2.12, film bagian atas memiliki kontras radiografi lebih baik daripada film bagian bawah

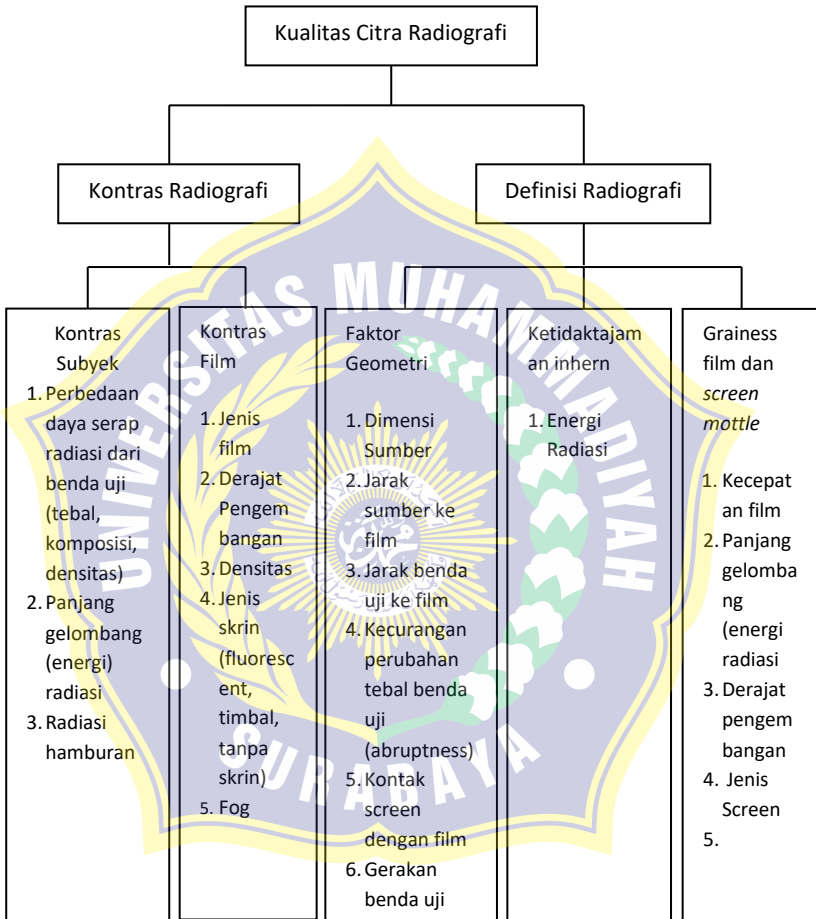
Definisi radiografi diartikan sebagai kemampuan untuk mendeteksi batas tepi gambar dalam film hasil radiografi, dan berhubungan dengan derajat ketajaman gambar radiografi. Pada gambar 2.12, definisi yang baik ditunjukkan oleh film bagian bawah.



Gambar 2.12 Kontras radiografi lebih baik (atas),
Definisi lebih baik (bawah)

Sumber: Pusdiklat BATAN, 2013

Faktor – faktor yang berkaitan dengan kedua parameter tersebut secara skematik adalah dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.13 Parameter yang mempengaruhi citra kualitas radiografi
 Sumber: NDT Resource Center, 2025

2.8 Image Quality Indicator (IQI)

Image Quality Indicator (IQI) / Indikator Kualitas Bayangan (IKB) merupakan alat referensi standar yang ditempatkan pada atau dekat permukaan objek saat eksposur radiografi, dengan tujuan menilai kualitas radiograf (film radiografi) dan memastikan bahwa radiograf yang dibuat cukup sensitif dan jelas untuk mendeteksi cacat yang relevan.

2.8.1 Fungsi utama IQI / IKB

Dalam memastikan prosedur radiografi telah mencapai kualitas minimum standar dengan memeriksa tiga komponen utama kualitas citra, yaitu:

1. Resolusi (ketajaman): seberapa kecil detail yang dapat dibedakan
2. Kontras: kemampuan membedakan variasi densitas
3. Densitas optik: derajat kegelapan film radiografi

Saat IKB / IQI ditempatkan pada obyek uji, hasil radiograf menunjukkan apakah elemen standar (kawat atau lubang) dapat terlihat. Bila elemen terkecil terlihat jelas, maka sensitivitas radiograf dianggap memadai untuk inspeksi.

2.8.2 Jenis – jenis IQI / IKB

Indikator Kualitas Bayangan (IKB) / *Indicator Quality Image* (IQI) memiliki beberapa bentuk utama, antara lain adalah:

1. *Wire – type IQI* (kawat)

IQI tipe kawat terdiri dari sejumlah kawat logam yang disusun berdasarkan urutan diameter yang semakin besar dan ditutupi di antara dua lembar plastik bening. *Wire IQI* dikelompokkan dalam empat set yang masing – masing memiliki kisaran diameter kawat yang berbeda. Huruf yang ditetapkan (A, B , C, atau D) ditampilkan di

sudut kiri atas *IQI*. Angka di sudut kiri atas menunjukkan kelompok material.

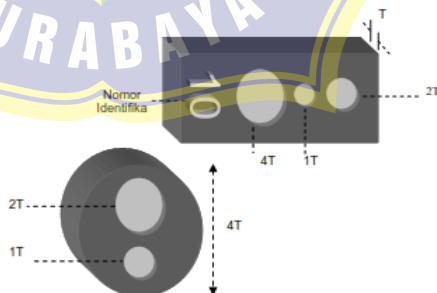


Gambar 2.14 IQI Tipe Kawat (ASTM)

Sumber: Dokumen Prlbadi

2. Pelat - Tipe *Plaque*

IKB tipe plaque atau pelat merupakan rancangan standar ASTM (*American Standard of Testing Material*), yang berupa lempengan material dengan ketebalan serbasama yang diberi lubang. IKB pelat terdiri dari dua macam yaitu IKB pelat persegi dan IKB pelat cakram.

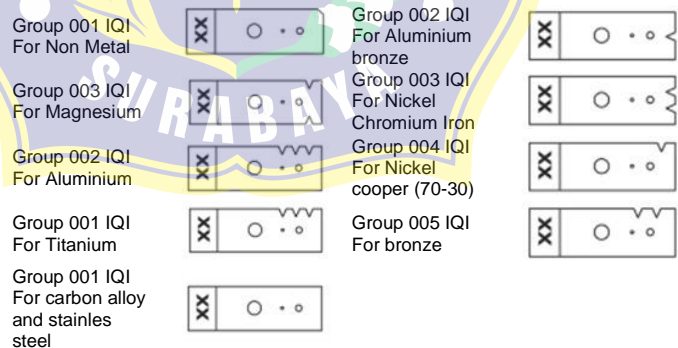


Gambar 2.15 IKB tipe pelat (ASTM)

Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

IKB tipe *plaque* persegi mempunyai ketebalan dari 0,13 mm (0,005 inchi) sampai dengan 4,06 mm (0,160 inchi) dan memiliki 3 lubang dengan diameter T, 2T, dan 4T, dengan T adalah tebal IKB. Image Quality Indicator (IQI) tipe plaque cakram mempunyai ketebalan 4,6 mm (0,180 inchi) sampai 7,11 mm (0,280 inchi) dengan diameter *plaque* 4T, dan mempunyai 2 lubang yaitu lubang T dan 2T.

Setiap IKB diidentifikasi dengan nomor dari bahan Pb yang menunjukkan tebal IKB dalam permil (1permil sama dengan 1/1000 inchi). Misal, IKB dengan ketebalan 0,01 inchi diberi nomor 10. IKB tipe *plaque* ASTM juga diidentifikasi dengan takikan seperti ditunjukkan gambar 2.16. Jumlah dan posisi takikan menunjukkan jenis bahan IKB. IKB dikelompokkan berdasarkan karakteristik penyerapan radiasi menjadi 8 kelompok, yaitu kelompok 03, 02, 01 untuk logam ringan dan kelompok 1,2,3,4,5 untuk kelompok logam berat.



Gambar 2.16 Identifikasi takikan IKB plaque ASTM

Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

Kelompok bahan IQI ASTM dan bahan yang dapat diuji disajikan pada tabel berikut:

Kelompok	Bahan IQI	Bahan Uji
03	Magnesium: Alloy dengan magnesium sebagai material yang dominan	Semua alloy dengan magnesium sebagai material yang dominan
02	Aluminium: Alloy dengan aluminium sebagai material yang dominan	Semua alloy dengan aluminium sebagai material yang dominan
01	Titanium: Alloy dengan Titanium sebagai material yang dominan	Semua alloy dengan Titanium sebagai material yang dominan
1	Carbon Steel: Type 300 series stainless steel	Semua carbon steel, semua low-alloy steel, semua stainless steel; manganese-nickel-aluminium bronze (superston)
2	Aluminium Bronze (perunggu aluminium); Nickel-aluminium bronze	Semua aluminium bronze; Semua nickel-aluminium bronze
3	Inconel (nickel chromium-iron alloy)	Nickel-chromium-iron alloy, 18% nickel-maraging-steel
4	Monel (nickle-copper alloy)	Nickel, cooper, semua seri cooper-nickle alooy, semua brasses (cooper-zinc alloy), leaded brasses
5	Tin Bronze	Tin Bronze, leaded-tin-bronze

Table 2.4 Kelompok bahan IQI
Sumber: Pusdiklat BATAN, 2013

2.8.3 Pemilihan Image Quality Indicator (IQI)

Dalam proses uji radiografi, pemilihan Image Quality Indicator (IQI) merupakan hal yang penting, karena hal tersebut terkait dengan sensitifitas dari film radiografi yang dihasilkan. Image Quality Indicator (IQI) dalam penelitian ini menggunakan tipe kawat atau *wire* dan sesuai teknik yang akan di aplikasikan yaitu teknik *Double Wall Double Image* (DWDI), sehingga IQI diletakkan pada sisi sumber (*source side*). Berdasarkan table 2.3 diketahui produk las dengan tebal 1 dinding las (tebal material +

reinforcement), akan didapatkan nilai atau nomor *wire – type essential wire*

Nominal single Wall Material Thickness	IQI					
	Source Side			Film Side		
	Hole-Type	Essential	Wire-Type	Hole-Type	Essential	Wire-Type
Range, (mm)	Designation	Hole	Essential Wire	Designation	Hole	Essential Wire
≤6,4	12	2T	5	10	2T	4
>6,4 through 9,5	15	2T	6	12	2T	5
>9,5 through 12,7	17	2T	7	17	2T	6
>12,7 through 19,0	20	2T	8	20	2T	7
>19,0 through 25,4	25	2T	9	25	2T	8
>25,4 through 38,1	30	2T	10	30	2T	9
>38,1 through 50,8	35	2T	11	35	2T	10
>50,8 through 63,5	40	2T	12	40	2T	11
>63,5 through 101,6	50	2T	13	50	2T	12
>101,6 through 152,4	60	2T	14	60	2T	13
>152,4 through 203,2	80	2T	16	80	2T	14
>203,2 through 254,0	100	2T	17	100	2T	16
>254,0 through 304,8	120	2T	18	120	2T	17
>304,8 through 406,4	160	2T	20	160	2T	18
>406,4 through 508,0	200	2T	21	200	2T	20

Tabel 2.5 Pemilihan *image quality indicator*
Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

2.8.4 Pemilihan *Wire Identity* dan *Wire Diameter*

Setelah mendapatkan nomor *wire-type essential wire*, maka selanjutnya didapatkan data *wire diameter* berdasarkan tabel 2.4. *Wire diameter* sebagai referensi ukuran cacat atau diskontinuitas terkecil yang dapat terlihat pada film radiografi. *Wire identity* menunjukkan nomor wire minimal yang muncul pada film.

Set A		Set B	
Wire Diameter In. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter In. (mm)	Wire Identity
0.0032 (0.81)	1	0.010 (0.25)	6
0.004 (1.02)	2	0.013 (0.33)	7
0.005 (0.13)	3	0.016 (0.41)	8
0.063 (0.16)	4	0.020 (0.51)	9
0.008 (0.20)	5	0.025 (0.64)	10
0.010 (0.25)	6	0.032 (0.81)	11

Set C		Set D	
Wire Diameter In. (mm)	Wire Identity	Wire Diameter In. (mm)	Wire Identity
0.032 (0.81)	11	0.100 (2.54)	16
0.040 (1.02)	12	0.126 (3.20)	17
0.050 (1.27)	13	0.160 (4.06)	18
0.063 (1.60)	14	0.200 (5.08)	19
0.080 (2.03)	15	0.250 (6.35)	20
0.100 (2.54)	16	0.320 (8.13)	21

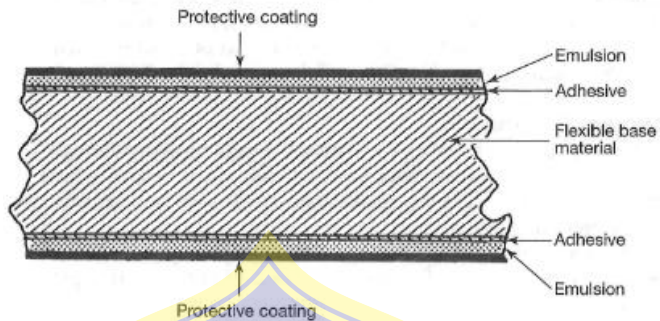
Tabel 2.6 *Wire IQI Designation, Wire diameter, dan Wire Identity*
 Sumber: ASME Section V Edisi Tahun 2025

2.9 Film Radiografi

Film radiografi merupakan media perekam citra yang sangat peka terhadap radiasi sinar-x atau sinar gamma dan digunakan untuk menangkap bayangan internal suatu byek melalui variasi intensitas radiasi yang diteruskan. Film ini menangkap citra laten yang kemudian diolah secara kimia untuk menghasilkan gambar radiografi final yang menunjukkan variasi densitas internal objek. Film radiasi bekerja berdasarkan interaksi radiasi ionisasi dengan kristal perak halida dalam emulsi film yang kemudian membentuk bayangan laten yang dikembangkan menjadi citra.

2.9.1 Komponen Film radiografi

Film radiografi terdiri dari dua bagian utama yaitu bahan dasar dan emulsi. Diantara emulsi dan bahan dasar terdapat lapisan tipis bahan perekat (*adhesive layer*) yang berfungsi menjaga agar emulsi dapat menempel secara merata pada bahan dasar. Bagian luar dari emulsi ditutupi lapisan pelindung (*supercoating*) dari gelatin yang berguna untuk melindungi emulsi dari goresan, tekanan dan kontaminasi selama penggunaan dan pemrosesan.



Gambar 2.17 Penampang lintang film radiografi

Sumber: (Conclin et al., 2023)

2.9.1.1 Bahan Dasar Film

Bahan dasar film berfungsi sebagai kerangka tempat melapiskan emulsi. Beberapa sifat yang harus dimiliki dasar film adalah ringan, tidak mudah patah, lentur tetapi memiliki kekakuan yang cukup, agar mudah dalam penanganan dan pemrosesan agar tidak berkontribusi pada terjadinya distorsi gambar, tidak mudah bereaksi dengan zat lain agar aman dalam penyimpanan, transparan terhadap cahaya agar tidak ada pola atau bayangan yang tidak diinginkan yang disebabkan oleh dasar film. Warna biru muda ditambahkan pada dasar film untuk mengurangi kelelahan mata saat pengamatan.

2.9.1.2 Emulsi

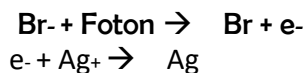
Emulsi terdiri dari campuran homogen bahan aktif dengan gelatin. Interaksi antara bahan aktif film dengan radiasi pengion atau cahaya tampak menghasilkan bayangan laten akan berubah menjadi bayangan tampak ketika diproses dalam larutan developer. Gelatin adalah bahan bening yang

tembus cahaya dan berpori, sehingga memungkinkan bahan kimia menembus ke dalam kristal perak halida dapat tersebar secara merata pada dasar film.

2.9.2 Prinsip pembentukan bayangan pada film

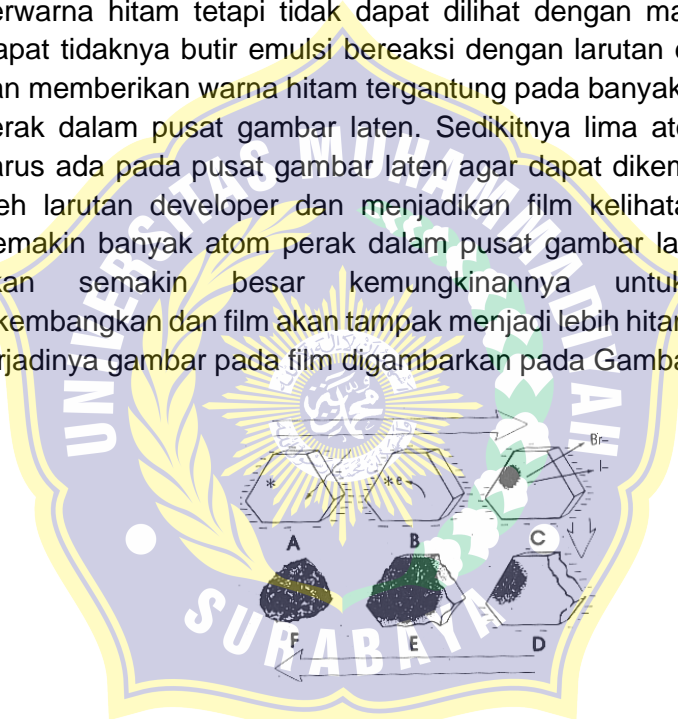
Radiasi yang melewati suatu obyek dan mengenai film radiografi akan berinteraksi dengan kristal perak halida pada emulsi film. Interaksi yang dominan adalah efek fotolistrik yang selanjutnya menghasilkan suatu pola atau gambar yang mewakili obyek yang terkena radiasi. Pola atau gambar tersebut tidak dapat terlihat dengan mata biasa sebelum film diproses secara kimia dan disebut sebagai bayangan laten.

Proses terjadinya bayangan laten, yaitu kristal perak halida, dimana perak bermuatan ion positif sedangkan halida (Br dan I) adalah ion negatif. Ion bromida akan melepaskan elektron jika berinteraksi dengan radiasi yang mempunyai energi cukup tinggi. Elektron yang lepas akan bergerak bebas di dalam kristal dengan jarak yang relatif jauh, dan akan terperangkap jika menjumpai ketidaksempurnaan kristal seperti adanya dislokasi atau adanya pengotor. Sedangkan ion bromida yang telah kehilangan elektron berubah menjadi gas dan diserap oleh gelatin. Dalam setiap kristal terdapat pengotor dari bahan AgS (silver sulfida) yang disebut "sensitivity speck". Sensitivity speck menangkap elektron dan menjadi bermuatan negatif sehingga dapat menarik ion perak. Di dalam sensitivity speck tersebut ion perak dinetralkan menjadi sebuah atom perak. Prosesnya dapat ditulis sebagai berikut:



Satu atom perak yang dihasilkan akan bertindak sebagai penangkap elektron berikutnya. Atom perak itu berubah menjadi

ion perak yang bermuatan negatif, sehingga menyebabkan ion perak lain (yang bermuatan positif) bergerak ke arahnya dan kedua ion perak ini menjadi dua atom perak. Proses ini terjadi terus menerus sehingga terjadi pertumbuhan atom perak pada tempat tersebut dan membentuk kelompok kecil. Kelompok kecil atom perak ini disebut pusat gambar laten. Pusat gambar laten berwarna hitam tetapi tidak dapat dilihat dengan mata biasa. Dapat tidaknya butir emulsi bereaksi dengan larutan developer dan memberikan warna hitam tergantung pada banyaknya atom perak dalam pusat gambar laten. Sedikitnya lima atom perak harus ada pada pusat gambar laten agar dapat dikembangkan oleh larutan developer dan menjadikan film kelihatan hitam. Semakin banyak atom perak dalam pusat gambar laten maka akan semakin besar kemungkinannya untuk dapat dikembangkan dan film akan tampak menjadi lebih hitam. Proses terjadinya gambar pada film digambarkan pada Gambar 2.15



Gambar 2.18 Proses terjadinya bayangan laten dalam kristal perak halida

Sumber: Pusklat BATAN, 2013

Keterangan Gambar 2.15 :

A :interaksi radiasi dengan kristal perak bromida melepaskan elektron

- B : elektron-elektron ini berpindah (migrasi) ke 'sensitivity speck'
- C : pada „sensitivity speck” terbentuk atom – atom perak
- D : proses ini terus berulang, menyebabkan hilangnya permukaan listrik negatif dan membentuk atom-atom perak
- E : sisa perak halida dihilangkan saat proses
- F : pembentukan butir-butir perak

2.9.3 Klasifikasi Jenis Film

Klasifikasi film berguna untuk membandingkan kesetaraan beberapa produk film, misalkan AGFA D7 setara dengan film FUJI 100XD, karena keduanya memiliki klasifikasi kelas II ASTM

Kelas	Kecepatan	Kontras	Graininess
I	Rendah	Sangat tinggi	Sangat rendah
II	Sedang	Tinggi	Rendah
III	Tinggi	Sedang	Tinggi

Tabel 2.7 Klasifikasi film menurut standar ASTM

Jenis Film	Faktor Paparan Relatif					Kelas ISO	Kelas DIN	Kelas ASTM
	100 kV	200 kV	Ir-192	Co-60	LINAC/ 8MeV			
D2	10.6	8.7	9.0	10.0	10.0	G1	G1	Special
D3 se	10.6	8.7	-	-	-	G1	G1	I
D3	4.1	4.2	5.0	5.1	5.1	G1	G1	I
D4	3.1	2.8	3.0	3.1	3.1	G1	G2	I
D5	1.8	1.6	1.5	1.5	1.5	GII	G2	I
D7	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	GII	G3	II
D8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	GII	G4	II
D6R	2.0	1.7	1.8	1.7	1.3	GII	-	II

Tabel 2.8 Jenis Film AGFA

Film	Features and Major Applications	Relative Exposure Factors*				Film System Classification**		
		100 kV	200 kV	Ir-192	Co-60	ISO 11699-1	ASTM E1815	JIS K7627
IX50XD	Ultra fine grain film with very high contrast and medium speed <ul style="list-style-type: none"> • Aerospace components • Weldings (low to medium atomic number metal) • Castings (low to medium atomic number metal) • Electronic Components 	2.3	2.4	2.2	2.2	C3	I	T2
IX80XD	Very fine grain film with very high contrast and medium speed <ul style="list-style-type: none"> • Weldings (low to medium atomic number metal) • Castings (low to medium atomic number metal) • Aerospace components 	1.6	1.5	1.5	1.0	C4	I	T2
IX100XD	Fine grain film with high contrast and high speed <ul style="list-style-type: none"> • medium atomic number metal) • Castings (low to medium atomic number metal) • Aerospace components 	1.0	1.0	1.0	1.0	CS	II	T3

Tabel 2.9 Jenis Film FUJI

2.9.4 Pemilihan Film

Pemilihan film radiografi tergantung pada kepentingan antara kecepatan penyinaran yang tinggi atau kualitas radiografi yang tinggi. Jika kecepatan penyinaran yang tinggi lebih penting, maka dapat digunakan film lebih cepat. Jika kualitas radiografi yang tinggi diinginkan maka film lebih lambat (butiran halus) dapat menggantikan film lebih cepat. Hasil radiografi yang baik ditentukan oleh kombinasi yang paling efektif antara teknik radiografi dan jenis film. Banyak faktor yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan teknik radiografi maupun jenis

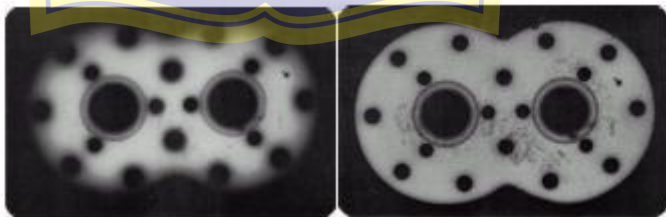
film. Untuk radiografi benda uji tertentu, pemilihan film tergantung pada jenis material, tebal material, dan energi radiasi.

Tebal Material (inchi)		Sumber dan Jenis Film yang disarankan		
		Ir-192	Cs-137	Co-60
Mg	0.5 – 1	D2 – D4		
	1.0 – 2.0	D4		
	2.0 – 4.0	D4-D5-D7		
	Over 4	D7		
Al	0.5 – 1	D2 – D4		
	1.0 – 2.0	D4 – D5		
	2.0 – 4.0	D7		
	Over 4	D7		
Steel	0 – 0.25	D2 – D4		
	0.25 – 0.5	D2-D4-D5-D7	D2-D4	
	0.5 – 1	D4-D5-D7	D4-D5-D7	D4
	1.0 – 2.0	D4-D5-D7	D7	D4-D5-D7
	2.0 – 4.0	D7	D7	D5-D7
	Over 4			D7

Tabel 2.10 Pedoman pemilihan Film Agfa untuk radiografi industri dengan sumber gamma

2.10 Skrin

Pada penelitian kali ini menggunakan skrin timbal (Pb). Dimana skrin berupa lembaran tipis berbahan timbal yang ditempatkan mengapit film radiografi yang berfungsi mengintensifkan penyinaran dan juga menahan radiasi utama serta radiasi hamburan, sehingga dapat mengurangi efek *edge undercutting*.



Gambar 2.19 Pengaruh skrin terhadap efek *edge undercutting*

Sumber: (Conklin et al., 2023)

Bagian kiri pada gambar 2.20 Menunjukkan sebuah film dengan efek edge undercutting yang besar akibat tidak menggunakan skrin, bagian kanan menunjukkan efek edge undercutting yang kecil akibat menggunakan skrin.

2.11 Kaset

Kaset atau *exposure holder*, merupakan wadah yang berfungsi melindungi film dari cahaya sekitar, dan juga untuk mendapatkan kontak yang baik antara skrin dengan film.



Gambar 2.20 Kaset / *Exposure holder*
Sumber: Dokumen Pribadi



Gambar 2.21 Kaset kaku
Sumber: Pusdiklat BATAN,2013

Kaset lentur umumnya terbuat dari karton, plastik PVC hitam, atau karet. Kaset kaku terbuat dari aluminium yang dilengkapi dengan penekan berlapis busa dan penjepit pegas untuk mendapatkan kontak film – skrin yang baik (Gambar 2.21)

