

Pengenalan Pengujian Tidak Merusak

Dr. Ir. Dody Prayitno, M.Eng.



Haura Utama

Prakata

Buku *Pengenalan Pengujian Tidak Merusak (Non-Destructive Test (NDT))* ini disusun dalam bahasa Indonesia untuk memudahkan mahasiswa dan praktisi memahami konsep dasar pengujian tidak merusak. Buku ini diharapkan mampu menjembatani teori dan praktik, sekaligus menumbuhkan kesadaran akan pentingnya kualitas, keamanan, dan keselamatan kerja.

Kelebihan buku ini antara lain penggunaan bahasa Indonesia yang sederhana dan mudah dipahami, penyajian contoh-contoh aplikasi nyata di lapangan, serta dukungan referensi yang tidak hanya berasal dari buku teks, tetapi juga dari berbagai sumber multimedia resmi yang diterbitkan oleh institusi berkompeten.

Sasaran utama buku ajar ini meliputi mahasiswa, praktisi industri, serta pelaku usaha di bidang teknik.

- Bagi mahasiswa, buku ini dapat digunakan sebagai sumber belajar untuk memahami dasar-dasar uji tidak merusak.
- Bagi praktisi, buku ini dapat menjadi panduan dalam memperdalam pemahaman teknis sekaligus berfungsi sebagai referensi cepat dalam pekerjaan sehari-hari.
- Bagi pelaku usaha atau pengusaha, buku ini dapat menjadi acuan untuk memahami urgensi penerapan *NDT* guna menjaga kualitas produk, meningkatkan daya saing, serta memastikan keamanan dan keselamatan operasi.

Buku ini merupakan langkah awal dalam memahami pengetahuan uji tidak merusak yang cakupannya sangat luas. Oleh karena itu, aspek terpenting yang perlu dimiliki mahasiswa

Pengenalan Pengujian Tidak Merusak,
karya Dr. Ir. Dody Prayitno, M.Eng.,
diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Haura Utama, 2026

14 x 20 cm, viii + 161 hlm

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang mereproduksi atau memperbanyak seluruh
maupun sebagian dari buku ini dalam bentuk dan
cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit

Editor dan Penata isi: Salsa
Perancang sampul: Nita



CV. Haura Utama

• Anggota IKAPI Nomor 375/JBA/2020
• Nagrak, Benteng, Warudoyong, Sukabumi
• +62877-8193-0045 ✉ haurautama@gmail.com

Cetakan I, Juni 2026

ISBN: 978-634-208-625-4



sebelum mempelajarinya adalah rasa ingin tahu. Rasa ingin tahu tersebut akan mendorong mahasiswa mengeksplorasi teori yang melandasi setiap metode pengujian. Meskipun demikian, penguasaan ilmu dasar seperti fisika dan ilmu material tetap diperlukan sebagai penunjang agar pemahaman menjadi lebih menyeluruh.

Metode uji tidak merusak yang dibahas dalam buku ini meliputi: *Visual Testing*, *Ultrasonic Testing (UT)*, *Radiographic Testing (RT)*, *Magnetic Particle Testing (MT)*, *Penetrant Testing (PT)*, *Eddy Current Testing (ECT)* dan *Leak Testing*.

Bagi dosen, buku ini dapat berfungsi sebagai panduan dasar dalam memperkenalkan konsep-konsep uji tidak merusak kepada mahasiswa sebelum masuk ke metode yang lebih kompleks. Dosen juga diharapkan dapat mengaitkan isi buku dengan pengalaman praktis, baik melalui studi kasus industri maupun kegiatan laboratorium, sehingga mahasiswa memperoleh gambaran nyata tentang hubungan antara teori dan aplikasi. Selain itu, mendorong diskusi, pemikiran kritis, serta menekankan aspek keselamatan dan etika profesi sangat penting mengingat penerapan NDT berkaitan langsung dengan kualitas produk, keamanan, dan pencegahan kecelakaan.

Penulis menyampaikan penghargaan dan rasa terima kasih kepada Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti atas dukungan pendanaan yang memungkinkan buku ajar ini dapat dipublikasikan. Dukungan tersebut merupakan wujud komitmen dalam mendorong pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing*), serta dalam menyediakan sumber belajar yang bermanfaat bagi mahasiswa, dosen, praktisi, dan pelaku industri teknik di Indonesia.

Jakarta, 3 Januari 2026
Dody Prayitno

Daftar Isi

Prakata..... iii

Daftar Isi v

BAB 1 Pengantar Metode Uji Tidak Merusak..... 1

1.1 Pendahuluan..... 1

1.2 Uji Merusak 1

1.3 Pengujian Tidak Merusak 2

1.4 Hubungan Pengujian Tidak Merusak Dengan Pengujian Merusak. 3

1.5 Penerapan Uji Tidak Merusak?..... 4

1.6 Tahapan Pengujian Tidak Merusak Dan Evaluasi Benda Uji 6

1.7 Faktor Yang Mempengaruhi Keandalan Uji Tidak Merusak 7

1.8 Diskontinuitas dan Cacat Material..... 8

1.9 Latihan Soal 8

Daftar Pustaka 9

BAB 2 Metode Inspeksi Visual 11

2.1 Pengertian Umum 11

2.2 Prosedur Kerja Inspeksi Visual..... 13

2.3 *Visual Inspection Standards* (Ame, 2024)..... 15

2.5 Latihan Soal 15

Daftar Pustaka 16

BAB 3 Metode Uji Penetran Cair..... 18

3.1. Pengertian Umum 18

3.2 Teori Pendukung: Prinsip Kapilaritas 18

3.3 Prinsip Kerja Uji Penetran Cair. 21

3.4 Penetran 22

3.5 Prosedur Uji Penetran Cair 24

3.6 Standar Metode Uji Penetran Cair 33

3.7	Demonstrasi Video Metode Inspeksi Visual	33
3.8	Latihan Soal	34
	Daftar Pustaka	35
BAB 4	Metode Uji Ultrasonik.....	38
4.1	Pengertian Umum	38
4.2	Teori Pendukung: Prinsip Perambatan Gelombang..	38
4.3	Prinsip Dasar Kerja.....	43
4.4	Peralatan Uji Ultrasonik.....	43
4.5	Metode Pengujian Ultrasonik	54
4.6	Pengukuran Dan Kalibrasi.	61
4.7	Metode Kalibrasi.....	63
4.8	Kelebihan Dan Kekurangan.....	63
4.9	Standar:	65
4.10	Video Demo Pengujian Ultrasonik	65
4.11	Latihan Soal	66
	Daftar Pustaka	67
BAB 5	Metode <i>Magnetic Particle</i>	71
5.1	Pengertian Umum	71
5.2	Teori Pendukung.....	71
5.3	Prinsip Kerja	75
5.4	Prosedur Kerja Pengujian <i>Magnetic Particle</i>	77
5.5	Peralatan Yang Digunakan	83
5.6	Tempat dan Alat Bantu	86
5.7	Kelebihan Dan Kekurangan Metode <i>Magnetic Particle</i>	88
5.8	Standar	89
5.9	Latihan soal.....	89
	Daftar Pustaka	90
BAB 6	<i>Eddy Current</i>.....	94
6.1	Pengertian Umum	94
6.2	Teori Pendukung.....	94
6.3	Prinsip Kerja	105

6.4	Peralatan dan Prosedur Kerja Pengujian (Henry, 2021).....	105
6.5.	<i>Eddy Current Calibration Standards</i>	108
6.6	Kelebihan Dan Kekurangan.....	109
6.7	Latihan Soal	110
	Daftar Pustaka	112
BAB 7	Radiografi.....	115
7.1	Pengertian Umum	115
7.2	Prinsip Kerja	115
7.3.	Sumber Radiasi	116
7.4	Objek Atau Benda Uji Radiografi	127
7.5	Jenis Hasil Radiografi pada Pengujian Tidak merusak.....	128
7.6	Prosedur Umum Radiografi	130
7.6	Kelebihan Dan Kekurangan Radiografi.....	139
7.7	Standar Radiografi	139
7.8	Latihan Soal	140
	Daftar Pustaka	142
BAB 8	Pengujian Kebocoran	144
8.1	Pengertian Umum Pengujian Kebocoran (<i>Leak Test</i>)	144
8.2	Teori Pendukung Pengujian Kebocoran.	145
8.3	Metode dan Prinsip Pendeteksian Kebocoran.	148
8.4	Standar	151
8.5	Latihan Soal	151
	Daftar Pustaka	153
BAB 9	Kode Etik Insinyur Indonesia.....	155
9.1	Pendahuluan.....	155
9.2	Kode Etik Insinyur Kei-2021	156
9.3	Pelanggaran Kode Etik Profesi	159
9.4	Kesimpulan	159
9.5	Latihan soal.....	159
	Daftar Pustaka.	161

BAB 1

Pengantar Metode Uji Tidak Merusak

1.1 Pendahuluan

Logam merupakan material yang banyak digunakan dalam bidang teknik, seperti konstruksi, manufaktur, transportasi, dan energi. Dalam penggunaannya, produk logam harus memiliki kualitas dan keandalan yang baik agar aman saat digunakan. Kegagalan pada produk logam dapat menimbulkan kecelakaan, kerugian ekonomi, serta dampak lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan metode pengujian untuk memastikan bahwa produk logam memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan.

Secara umum, metode pengujian material logam dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu uji merusak dan uji tidak merusak. Kedua metode ini memiliki tujuan dan peranan yang berbeda, namun saling melengkapi dalam menjamin kualitas dan keselamatan produk logam.

1.2 Uji Merusak

Uji merusak adalah metode pengujian yang dilakukan dengan cara memberikan beban atau perlakuan tertentu hingga spesimen mengalami perubahan bentuk permanen atau bahkan patah. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik material secara kuantitatif.

Beberapa sifat mekanik yang dapat diperoleh dari uji merusak antara lain kekuatan tarik, keuletan, kekerasan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap beban kejut. Data hasil uji merusak sangat penting dalam tahap perancangan, karena

digunakan sebagai dasar dalam menentukan kemampuan material untuk menahan beban kerja.

Selain itu, uji merusak juga digunakan untuk mengevaluasi pengaruh proses manufaktur, seperti perlakuan panas dan pengelasan, terhadap sifat material. Namun, karena spesimen uji mengalami kerusakan, metode ini hanya dapat dilakukan pada contoh material dan tidak dapat diterapkan pada seluruh produk yang akan digunakan.

1.3 Pengujian Tidak Merusak

Uji tidak merusak adalah metode pengujian yang dilakukan tanpa merusak atau mengubah fungsi produk logam yang diuji. Tujuan utama dari uji ini adalah untuk mendeteksi cacat atau ketidaksempurnaan material, baik yang berada di permukaan maupun di bagian dalam.

Uji tidak merusak sangat penting dalam pengendalian mutu, karena memungkinkan pemeriksaan dilakukan pada produk jadi maupun pada komponen yang sedang beroperasi. Dengan metode ini, potensi cacat seperti retak, porositas, dan korosi dapat diketahui lebih awal sebelum menyebabkan kegagalan.

Keunggulan utama uji tidak merusak adalah efisiensinya, karena produk yang diuji tetap dapat digunakan setelah pengujian. Oleh sebab itu, metode ini banyak digunakan dalam inspeksi rutin dan perawatan berkala pada komponen teknik.

Pengujian tidak merusak (*Non Destructive Test*) secara umum dapat dikatakan sebagai proses inspeksi, pengujian atau evaluasi dari sebuah objek berupa komponen, struktur rakitan (*assembling*) atau cacat sebuah produk tanpa menyebabkan kerusakan pada objek tersebut [Indraloka, 2023]. Objek setelah diinspeksi atau diuji masih dapat digunakan. Pengujian tidak

merusak dapat dilakukan pada berbagai jenis material, namun yang akan dibahas disini hanya material logam. Oleh karena itu diberi nama uji logam tidak merusak.

Beberapa metode pengujian tidak merusak yang akan dibahas adalah inspeksi visual, *dye penetrant*, *eddy current*, *magnetic particle*, *ultrasonic*, *radiografi* dan *leak test*. Metode-metode tersebut akan dibahas pada bab selanjutnya.

1.4 Hubungan Pengujian Tidak Merusak Dengan Pengujian Merusak.

Uji merusak dan uji tidak merusak memiliki fungsi yang berbeda tetapi saling mendukung. Uji merusak digunakan untuk mengetahui kemampuan dasar material, sedangkan uji tidak merusak digunakan untuk memastikan bahwa produk tidak memiliki cacat yang berbahaya.

Hasil uji merusak sering dijadikan acuan dalam menafsirkan hasil uji tidak merusak. Sebaliknya, temuan cacat pada uji tidak merusak dapat menjadi alasan untuk dilakukan uji merusak lebih lanjut, terutama dalam analisis kegagalan. Dengan demikian, kombinasi kedua metode ini memberikan jaminan kualitas yang lebih baik.

Pada pengujian merusak, benda uji yang telah dievaluasi akan mengalami kerusakan permanen, seperti patah (*failure*), sehingga tidak dapat digunakan kembali. Perbedaan utama antara pengujian tidak merusak dan pengujian merusak disajikan pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Karakteristik Pengujian tidak merusak dan Pengujian Merusak (Venuprasad, 2024)

Item	Pengujian Tidak Merusak	Pengujian Merusak
Apa tujuan pengujian?	Menemukan cacat pada objek.	Menemukan sifat

		mekanik objek
Apa ada pemberian beban pada objek?	Tidak ada	Ada
Apa ada kerusakan pada objek setelah pengujian dilakukan	Objek tidak rusak	Objek rusak
Apa memerlukan peralatan khusus?	Tidak memerlukan	Memerlukan
Biaya?	Relatif murah	Relatif mahal
Apa tingkat ketrampilan khusus (skill) yang harus diperlukan?	Cukup terampil	Sangat terampil
Apa contoh pengujian?	<i>Dye penetrant, ultrasonic, magnetic particle, eddy current dll</i>	Uji tarik, uji fatik, uji impak, creep test,

1.5 Penerapan Uji Tidak Merusak?

Pengujian tidak merusak pada material logam diaplikasikan pada berbagai sektor industri, mulai dari tahap perancangan, proses produksi, hingga kegiatan perawatan. Beberapa contoh penerapan pengujian tidak merusak tersebut ditunjukkan pada Gambar 1.1

Pada tahap perancangan, arsip dan dokumentasi hasil pengujian tidak merusak dimanfaatkan sebagai bahan pertimbangan dalam mendesain suatu komponen atau struktur. Pada tahap proses produksi, pengujian tidak merusak pada material logam digunakan untuk memeriksa dan mengendalikan kualitas, sehingga produk yang dihasilkan memenuhi standar mutu yang telah ditetapkan. Selanjutnya, pada tahap perawatan (*maintenance*), pengujian tidak merusak berperan dalam

memberikan informasi mengenai perlu atau tidaknya dilakukan perbaikan maupun penggantian komponen sebelum terjadi kegagalan. Secara keseluruhan, pengujian tidak merusak membantu memastikan tingkat keamanan komponen, produk, atau struktur melalui pendeteksian cacat, sehingga aspek keselamatan dan keandalan tetap terjaga.



(a)



(b)



(c).



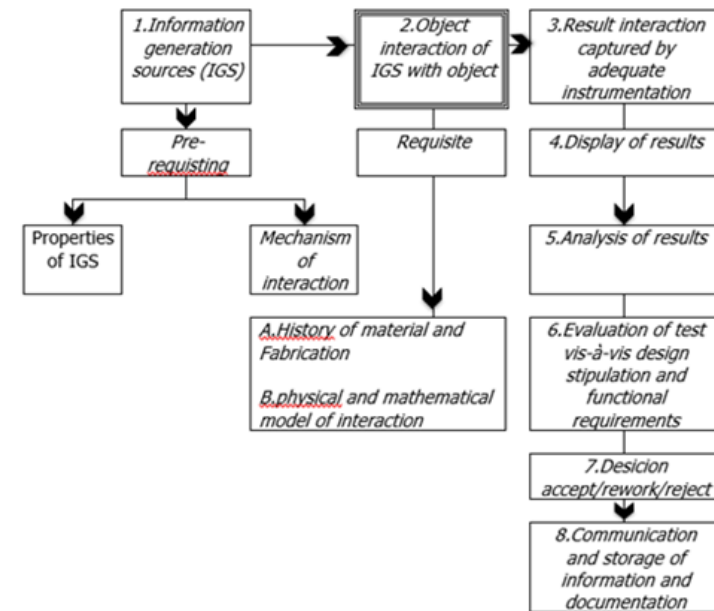
(d).

Gambar 1.1 Contoh aplikasi Pengujian tidak merusak pada beberapa sector. (a).Pengujian Tidak merusak pada struktur jembatan (Thomas 2020); b).Pengujian tidak merusak pada sector produksi (indiamart, 2024); (c) Pengukuran ketebalan dengan metode ultrasonic (dir.indaimart, 2024); (d) Pengujian tidak merusak pada sektor fabrikasi pipa (indiamart,2024).

1.6 Tahapan Pengujian Tidak Merusak Dan Evaluasi Benda Uji

Tahapan pengujian tidak merusak berikut evaluasinya (Gambar 1.2) adalah sebagai berikut.

- Persiapan perangkat atau peralatan yang dapat menghasilkan informasi bila berinteraksi dengan objek atau benda uji.
- Adanya objek atau benda uji yang ingin diketahui informasinya (seperti retak, catat atau diskontinuitas)
- Adanya Hasil informasi sebagai luaran bentuk interaksi antara perangkat dengan objek atau benda uji .
- Tampilan hasil informasi.
- Tahap berikutnya adalah menganalisa Hasil informasi yang di peroleh baik yang ditampilkan atau direkam.
- Evaluasi objek atau benda uji berdasark hasil informasi yang di peroleh.
- Membuat keputusan untuk menerima atau memperbaiki atau menolak.
- Hasil informasi selanjut didokumentai diarsipkan untuk digunakana pada masa depan.



Gambar 1.2. Tahapan – Tahapan Pengujian Tidak Merusak (J Prasad And CG K Nair,2008)

1.7 Faktor Yang Mempengaruhi Keandalan Uji Tidak Merusak

Faktor yang dapat mempengaruhi keandalan hasil pengujian tidak merusak diantaranya adalah sebagai berikut :

- Faktor Manusia: pendidikan; keikutsertaan pada pelatihan uji tidak merusak; atau pengalaman kerja dalam bidang uji tidak merusak.
- Metode Pengujian: teknik spesifik standar, standar pengujian dan lainnya.
- Benda Uji (objek): Kompleksitas dari bentuk, aksesibilitas dalam kasus assemblies, karakteristik pasangan, kondisi permukaan

- d. Sifat cacat atau diskontinuitas: Lokasi, nature, ukuran, bentuk, volume disperse.
- e. Pengetahuan Dasar dan fasilitas : Pemahaman tentang mekanisme interaksi antara tes dan informasi, menghasilkan alat, kecukupan *hardware* dan lembut keterampilan penyajian data.

1.8 Diskontinuitas dan Cacat Material

Dalam konteks pengujian tidak merusak, istilah diskontinuitas dan cacat sering digunakan. Diskontinuitas adalah setiap ketidakaturan atau penyimpangan dari struktur material yang ideal. Tidak semua diskontinuitas bersifat merugikan. Diskontinuitas disebut sebagai cacat (*defect*) apabila ukurannya, jenisnya, atau lokasinya melebihi batas yang diizinkan oleh standar atau spesifikasi.

Berdasarkan lokasinya, diskontinuitas dapat dibedakan menjadi:

- a. Diskontinuitas permukaan, seperti retak permukaan, porositas terbuka, dan *undercut* pada las.
- b. Diskontinuitas bawah permukaan, seperti retak internal, inklusi terak, dan porositas tertutup.

1.9 Latihan Soal

Jawablah pertanyaan di bawah ini untuk meningkatkan pemahaman materi.

- a. Apa definisi dari pengujian tidak merusak?
- b. Apa perbedaan pengujian tidak merusak dengan pengujian merusak?
- c. Apa faktor-faktor yang mempengaruhi hasil pengujian tidak merusak?
- d. Sebuah jembatan baja telah beroperasi selama 15 tahun. Pemeriksaan visual menunjukkan adanya karat pada

beberapa bagian, namun belum diketahui apakah telah terjadi retak di dalam material. Metode pengujian tidak merusak (NDT) apakah yang paling tepat digunakan untuk mendeteksi retak internal? Jelaskan alasan pemilihannya.

Daftar Pustaka

- Indraloka Gusthia, ,” Memahami Tentang Non Destructive Test (Pengujian Tidak Merusak)”, 27 September 2023. <https://www.garudasystrain.co.id/memahami-tentang-non-destructive-test-pengujian-tidak-merusak/>
- Thomas R. Hay, Jul 24, 2020, “*Non-destructive Testing Inspector Performance Variations*”, <https://www.techknowserv.com/post/non-destructive-testing-inspector-performance-variations>
- Indiamart, 2024,” NDT Testing For Mechanical Engineering”, <https://www.indiamart.com/proddetail/ndt-testing-20632785688.html> (diunduh 20 feb 2024)
- Die. Indiamart. 2024. <https://dir.indiamart.com/impcat/non-destructive-testing-services.html> . diunduh 20 feb 2024
- Indiamart, 2024 .. Industrial X Ray And Radiographic Testing Services <https://www.indiamart.com/proddetail/industrial-x-ray-and-radiographic-testing-services-25324400688.html?pos=3&pla=n> . diunduh 20 feb 2024
- J Prasad and CG K Nair,2008. “*Non-Destructive Test and Evaluation Of Materials*”, Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2008. ISBN (13): 978-0-07-062084-1. ISBN (10) : 0-07-062084-9
- Venuprasad, A. Anudeep Kumar, 2024, “*Non-Destructive Testing*”, *Lecture Note, Tech Vi Semester (Iar16)*. A

BAB 2

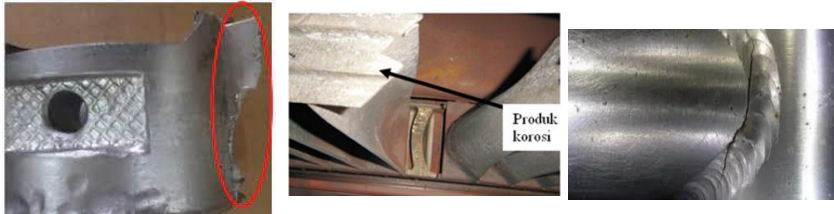
Metode Inspeksi Visual

2.1 Pengertian Umum

Pengujian tidak merusak dengan metode inspeksi visual merupakan metode yang relatif sederhana, cepat, dan paling banyak digunakan. Inspeksi visual dilakukan dengan memanfaatkan cahaya dan pengamatan langsung oleh mata untuk memeriksa suatu objek, baik berupa komponen maupun struktur. Pemeriksaan ini dapat dilakukan dengan atau tanpa bantuan peralatan pendukung

Metode inspeksi visual pada dasarnya menggunakan mata sebagai alat utama pengamatan. Namun, dalam praktik di lapangan, inspeksi visual terkadang juga melibatkan indera pendengaran, perabaan, dan bahkan penciuman terhadap objek yang diperiksa. Seiring dengan perkembangan teknologi komputer serta hadirnya peralatan deteksi yang semakin canggih, metode inspeksi visual saat ini dapat dilakukan secara otomatis.

Metode inspeksi visual umumnya diaplikasikan untuk mengidentifikasi karakteristik permukaan suatu objek, seperti adanya retak permukaan, goresan, perubahan warna, maupun indikasi korosi. Beberapa contoh hasil inspeksi visual ditunjukkan pada Gambar 2.1. Perbandingan kelebihan dan kekurangan metode inspeksi visual ditunjukkan pada Tabel 2.1.



(a).

(b).

(c)

Gambar 2.1 Contoh Objek Pengujian Tidak Merusak Metode Inspeksi Visual. a). Cacat Sirip Pada Produk Pengecoran (Aang, 2013); (b). Korosi Pada Sudu Turbin, (c). Korosi Pada Sudu Turbin (Tarmizi, 2011)

Tabel 2.1 Keuntungan Dan Kelemahan Metode Inspeksi Visual.

No	Item	Keuntungan	Kelemahan
1	Apa metode ini <i>simple</i> dan mudah untuk diaplikasikan?	Ya	
2	Apa metode ini relatif tidak mahal?	Ya	
3	Apa waktu pengerjaan metode inspeksi relatif cepat?	Ya	
4	Apa bisa hasil inspeksi direkam ?	Bisa	
5	Apa hasil inspeksi sangat tergantung pada <i>skill</i> dan pengetahuan penguji?		Ya
6	Apa hanya cacat permukaan saja yang dapat diinspeksi?		Ya

7	Apa kelemahan metode inspeksi visual adalah lemahnya resolusi mata?		Ya
8	Apa kelelahan mata merupakan kelemahan metode inspeksi visual?		Ya

2.2 Prosedur Kerja Inspeksi Visual

Penglihatan merupakan indera utama yang dapat diandalkan dalam metode inspeksi visual dan menjadi inti dari pengujian tidak merusak dengan metode ini. Pengujian atau inspeksi visual memerlukan pencahayaan yang memadai untuk menerangi objek yang diperiksa, selain kemampuan penglihatan dari penguji itu sendiri. Oleh karena itu, permukaan benda uji atau objek, seperti komponen maupun struktur, harus disinari terlebih dahulu sebelum dilakukan proses inspeksi atau pengamatan. Pengamatan dapat dilakukan secara langsung tanpa alat bantu atau dengan menggunakan peralatan pendukung sesuai kebutuhan

Peralatan bantu pada metode inspeksi visual, seperti kaca pembesar (kanta), kamera video, mikroskop, boroskop, serta sistem penglihatan berbasis komputer, ditunjukkan pada Gambar 2.2.

Secara prinsip, prosedur inspeksi visual terdiri atas lima langkah utama, yaitu:

- Penyusunan petunjuk pengoperasian, pedoman, serta daftar objek yang akan diperiksa.
- Pembersihan dan persiapan objek untuk dilakukan inspeksi visual.
- Pemeriksaan visual dilakukan terhadap seluruh bagian objek.

- d. Cacat yang ditemukan diidentifikasi dan dicatat dalam dokumen inspeksi.
- e. Hasil inspeksi visual ditinjau kembali untuk menentukan keputusan, yaitu menerima atau menolak objek



Microscope



Boroscope



Remote Visual Inspection



Kaca Pembesar

Gambar 2.2 Alat Bantu Inspeksi Visual

2.3 *Visual Inspection Standards (Ame, 2024)*

Standar merupakan pedoman (*guidelines*) bagi pengguna sebagai jaminan terhadap keberfungsian dan kualitas suatu objek, baik material maupun komponen. Selain itu, standar juga berperan dalam menjamin keselamatan pekerja dan pengguna.

Berikut ini disajikan beberapa contoh standar untuk metode inspeksi visual yang dikeluarkan oleh International Organization for Standardization (ISO).

- a. *ISO 17637:2003 Non-destructive testing of welds – Visual testing of fusion-welded joints (covers the visual testing of fusion welds in metallic materials)*
- b. *ISO 19828:2017 Welding for aerospace applications – Visual inspection of welds (specifies the requirements for visual inspection of welds in metallic materials and requirements for qualification and certification of personnel for visual weld inspection)*
- c. *ISO 3058:1998 Non-destructive testing — Aids to visual inspection — Selection of low-power magnifiers (specifies the characteristics of certain types of low-power magnifiers and gives recommendations for their selection for the inspection of surfaces)*

2.4 **Demonstrasi Video Metode Inspeksi Visual.**

Tata cara pelaksanaan inspeksi visual ditunjukkan pada tautan video berikut.:

1. <https://www.youtube.com/watch?v=JdfR-dJd6JE>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=EMj-y7ZFVNM>

2.5 **Latihan Soal**

Jawablah pertanyaan di bawah ini untuk meningkatkan pemahaman materi.

- a. Jelaskan pengertian metode inspeksi visual dalam pengujian tidak merusak serta tujuan utama penggunaannya!.
- b. Sebutkan dan jelaskan peran pencahayaan dalam pelaksanaan inspeksi visual?.
- c. Apa saja jenis cacat permukaan yang dapat dideteksi menggunakan metode inspeksi visual? Berikan contohnya!.
- d. Jelaskan tahapan utama prosedur inspeksi visual mulai dari persiapan hingga pengambilan keputusan hasil inspeksi.
- e. Sebutkan kelebihan dan keterbatasan metode inspeksi visual dibandingkan dengan metode pengujian tidak merusak lainnya

Daftar Pustaka

- Aang Kurniawan, Susilo Adi Widyanto, Yusuf Umardhani, 2013, “Pengaruh Temperatur Cetakan Pada Cacat Visual Produk Piston Dengan Metode Die Casting”, Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 1, No. 3, Tahun 2013 Online: <https://Media.Neliti.Com/Media/Publications/141861-Id-Pengaruh-Temperatur-Cetakan-Pada-Cacat-V.Pdf> . Diunduh 21 Februari 2024,
- Tarmizi , 2011, “Analisa Kerusakan Sudu Turbin Gas Material Udimet 500 Kapasitas 50 Mw”, *M.I. Mat. Kons. Vol. 11 No. 2 Desember 2011 : 98 – 104* Diunduh 21 Februari 2024
- Logam ceper, 2023, “Penyebab Dan Pencegahan Cacat Las”, <https://logamceper.com/penyebab-dan-pencegahan-cacat-las/> Diunduh 21 Februari 2024
- Venuprasad, A. Anudeep Kumar, 2024, “Non-Destructive Testing”, *Lecture Note, Tech Vi Semester (Iarer16). A Department Of Mechanicalengineering*, Institute Of

Aeronautical Engineering, (Autonomous), Dundigal, Hyderabad -500043b

Asset Management Engineers (AME), 2024, “*Visual NDT Inspection Explained*”, <https://www.asseteng.com.au/blog/visual-inspection-ndt/> , diunduh 21 feb 2024

Yakinmaju, 2024, “Alat Inspeksi Visual Pada Industri”, https://www.yakinmaju.com/en/news/detail/apa_saja_jenis_alat_inspeksi_visual, diunduh 21 Feb 2024

Perusahaan Jasa Inspeksi Teknik, 2018, ”Remote Visual Inspection:”, <https://perusahaanjasainspeksiteknik.blogspot.com/2018/11/jasa-remote-visual-inspection-borescope.html>

BAB 3

Metode Uji Penetran Cair

3.1. Pengertian Umum

Metode uji penetran cair (*dye penetrant test*) merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak yang digunakan untuk mendeteksi cacat terbuka pada permukaan material, seperti retak halus dan pori-pori. Metode ini memanfaatkan kemampuan cairan penetran untuk meresap ke dalam celah-celah permukaan melalui aksi kapiler. Setelah cairan penetran dibersihkan dari permukaan benda uji, keberadaan cacat akan ditunjukkan oleh indikasi yang muncul melalui penggunaan pengembang (*developer*), sehingga lokasi, bentuk, dan karakteristik cacat dapat diidentifikasi dengan jelas.

3.2 Teori Pendukung: Prinsip Kapilaritas

Prinsip kerja metode uji penetran cair didasarkan pada fenomena kapilaritas cairan. Namun, sebelum membahas kapilaritas, perlu dipahami terlebih dahulu konsep kohesi dan adhesi. Kohesi adalah gaya tarik-menarik antara molekul sejenis, sedangkan adhesi merupakan gaya tarik-menarik antara molekul yang berbeda jenis.

Pada kaca yang dicelupkan ke dalam air, terlihat bahwa air membasahi permukaan kaca. Fenomena ini menunjukkan bahwa gaya adhesi antara molekul air dan kaca lebih besar dibandingkan gaya kohesi antar molekul air, sehingga air cenderung menyebar di permukaan kaca (Gambar 3.1a).

Sebaliknya, air pada permukaan daun talas tampak membentuk cembungan dan tidak membasahi permukaannya. Hal ini terjadi karena gaya kohesi antar molekul air lebih besar

daripada gaya adhesi antara air dan permukaan daun talas, sehingga air cenderung mempertahankan bentuknya sendiri dan tidak menyebar (Gambar 3.1b).



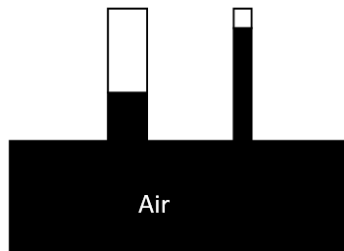
(a)

(b)

Gambar 3.1 (a) Air di atas Kaca (Id.Pikbest, 2024);
(b) Air di atas Daun Talas (amongguru, 2024)

Gaya adhesi yang lebih besar dibandingkan gaya kohesi menyebabkan cairan, seperti air, dapat naik di dalam tabung kaca berdiameter sangat kecil (pipa kapiler) yang tercelup dalam air. Fenomena ini dikenal sebagai kapilaritas (Gambar 3.2). Berdasarkan pengamatan ini, dapat dipahami bahwa cairan memiliki kecenderungan untuk menyusup atau berpindah ke dalam celah-celah sempit, seperti retakan halus pada permukaan material, akibat gaya kapiler.

Fenomena kapilaritas juga dapat diamati pada merkuri dalam pipa kapiler yang tercelup dalam merkuri, di mana bentuk permukaan cairan berbeda. Pada merkuri, gaya kohesi antar molekul lebih besar daripada gaya adhesi antara merkuri dan kaca, sehingga cairan tidak naik ke atas dinding tabung, melainkan menurun atau membentuk cekungan.



Gambar 3.2 Fenomena Kapilaritas

Fenomena kapilaritas dapat diamati ketika cairan naik di dalam pipa kapiler yang tercelup dalam air (Gambar 3.2). Ketinggian kenaikan air berbanding terbalik dengan diameter pipa kapiler semakin kecil diameter pipa, semakin tinggi permukaan air yang naik. Dalam kondisi nyata pada permukaan material, retakan atau lobang kecil dapat diasumsikan sebagai pipa kapiler berdiameter kecil, sehingga prinsip yang sama berlaku.

Adanya kohesi dan adhesi terlihat dari sudut kontak yang dibentuk antara cairan (misalnya air atau merkuri) dengan permukaan benda padat (misalnya kaca). Sudut kontak air dengan kaca adalah 0° , sehingga air membasahi permukaan kaca. Sebaliknya, sudut kontak merkuri dengan kaca sebesar 140° , sehingga merkuri tidak membasahi kaca.

Beberapa parameter penting yang mempengaruhi kinerja cairan penetran antara lain: sudut kontak yang rendah, tegangan permukaan cairan yang tinggi, dan viskositas yang rendah. Kombinasi parameter ini akan menghasilkan cairan penetran yang efektif untuk menembus retakan halus atau cacat terbuka pada permukaan material.

Sebagai gambaran mengenai cairan pada metode uji penetran (*dye penetrant*), cairan yang digunakan umumnya mengandung alkohol alifatik teroksialkilasi dan unsur pewarna (Paten USA). Sebuah penelitian yang dilakukan pada kelompok alkohol, yaitu metanol, etanol, dan propanol, menggunakan permukaan daun talas, menunjukkan bahwa pada konsentrasi 50%, sudut kontak yang terbentuk secara berurutan adalah 0° , 83° , dan 109° . Parameter fisik cairan ini juga dicatat, misalnya viskositas metanol sebesar $0,59 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ pada suhu 20°C (Wikipedia, 2024), dan tegangan permukaan metanol pada suhu 20°C adalah $22,3546 \text{ mN/m}$ (DDB, 2024).

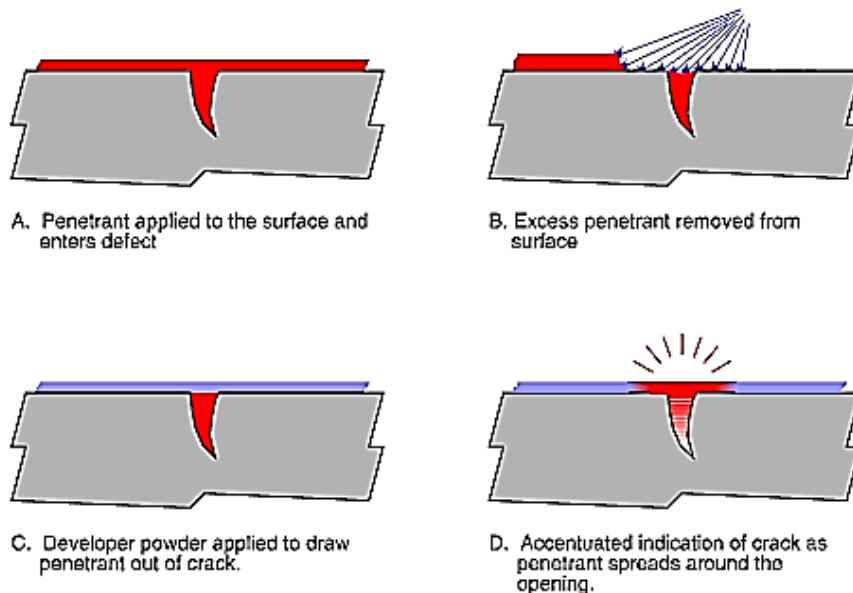
Data ini memberikan gambaran bahwa sifat fisik cairan, seperti sudut kontak, viskositas, dan tegangan permukaan, sangat memengaruhi kemampuan cairan penetran untuk menyusup ke dalam celah atau retakan halus pada permukaan material, sehingga keberhasilan deteksi cacat terbuka sangat bergantung pada karakteristik cairan penetran yang digunakan.

3.3 Prinsip Kerja Uji Penetran Cair.

Metode uji penetran cair (*dye penetrant test*) diterapkan untuk mendeteksi diskontinuitas (ketidaksinambungan) pada permukaan benda uji, seperti retak, lubang/pori, atau cacat lainnya. Metode ini tidak dapat digunakan untuk mendeteksi cacat di bawah permukaan atau di dalam material. Diskontinuitas yang dapat dideteksi dengan metode ini tidak terbatas pada ukuran, bentuk, arah, struktur bahan, maupun komposisi material, namun metode ini tidak mampu mengukur kedalaman cacat.

Permukaan benda uji harus bebas dari kontaminan, seperti kotoran, minyak, atau oli, karena dapat mengganggu penetrasi cairan. Diskontinuitas memungkinkan cairan penetran masuk ke retakan, pori, atau cacat lain melalui fenomena kapilaritas selama waktu tertentu yang disebut *dwelling time*.

Setelah periode penetrasi, cairan penetran yang tersisa di permukaan dibersihkan menggunakan pelarut atau air, kemudian permukaan dikeringkan. Selanjutnya, cairan pengembang (*developer*) diaplikasikan ke seluruh permukaan benda uji. Pengembang akan menarik cairan penetran yang tersisa di dalam diskontinuitas ke permukaan, sehingga membentuk indikasi yang terlihat seperti “goresan tinta”. Goresan ini menandakan adanya diskontinuitas, seperti retak, pori, atau cacat lain. Gambar 3.3 mengilustrasikan prinsip kerja metode uji penetran cair.



Gambar 3.3. Ilustrasi Prinsip Kerja Metode Uji Penetran Cair
(Luis S. Rosado, 2019)

3.4 Penetran

Cairan penetran, ketika diaplikasikan pada permukaan benda uji, akan menembus retakan, lubang (pori), atau cacat

terbuka pada permukaan material. Berdasarkan karakteristiknya, cairan penetran dapat dikelompokkan sebagai berikut:

- a. Berdasarkan zat warna :
 - *Visible dye penetrants* (merah). Warna merah tampak jelas dibawah kondisi dengan pencahayaan normal
 - *Fluorescent penetrants* (hijau-kuning). Warna hijau-kuning akan terpancar bila diterangi dengan lampu ultraviolet.
 - *Dual sensitivity penetrants*, mengandung kombinasi kedua zat pewarna, *visible* dan *fluorescent*. Warna akan tampak pada kondisi pencahayaan normal, namun bila indikasinya masih meragukan maka pencahayaan ultraviolet diperlukan.
- b. Berdasarkan proses pembersihan sisa penetrant dari permukaan benda uji (objek).
 - *Water-washable penetrants*. Pembersihan penetrant sisa (penetrant yng tidak masuk kedalam retak, lubang (pori) atau cacat dihilangkan dengan cara dibilas dengan air.
 - *Post-emulsifiable penetrants*. Pembersihan penetran sisa dilakukan memberikan bahan pengemulsi terpisah terlebih dulu baru di dibilas dengan air.
 - *Solvent removable penetrants*. Pembersihan penetrant sisa dengan *solvent* khusus.

Pengujian dengan metode uji penetran cair tergolong pengujian yang fleksibel, karena dapat dilakukan secara *portable* maupun *stasioner*. Pengujian *portable* berarti dapat dilakukan di lokasi yang berpindah-pindah, misalnya langsung di lapangan. Sebaliknya, pengujian *stasioner* dilakukan di tempat yang tetap, seperti laboratorium atau fasilitas inspeksi

husus. Pengujian *stasioner* biasanya memerlukan meja atau area kerja khusus, yang dirancang untuk mengikuti tahapan pelaksanaan uji penetrasi cair secara sistematis, mulai dari persiapan permukaan, aplikasi penetrasi, pembersihan, hingga penggunaan pengembang dan interpretasi indikasi cacat.

Visible dye penetrants maupun *fluorescent penetrants* yang bersifat *portable* (dapat digunakan untuk pemeriksaan di lokasi terbuka) biasanya dikemas dalam kaleng semprot bertekanan. Penetrasi *portable* ini juga memudahkan pemeriksaan pada benda uji yang berukuran besar, karena tidak memerlukan peralatan laboratorium khusus (Gambar 3.4).



Gambar 3.4 Aerosol Dye Penetrant (Tabung, Cleaner, Tabung Penetrant, Tabung Developer) Dan Contoh Hasil Pengujiannya

3.5 Prosedur Uji Penetrasi Cair

Prosedur pengujian uji penetrasi cair (*dye penetrant*) sebagai berikut :

1. Pembersihan permukaan benda uji (objek)
2. Pemberian/pengolesan cairan penetrasi pada permukaan benda uji (objek)
3. Pembuangan cairan penetrasi sisa (yang tidak meresap ke dalam retak)
4. Pemberian pengembang (*developer*)
5. Penginspeksian
6. Pembuatan Keputusan

3.5.1 Pembersihan Permukaan Benda Uji (Objek)

Pembersihan permukaan benda uji merupakan langkah awal dalam pengujian dengan metode uji penetrasi cair. Permukaan benda uji harus dibersihkan dari kotoran, minyak, oli, cat, atau kontaminan lain yang dapat menghalangi penetrasi cairan. Setelah pembersihan, permukaan harus dikeringkan agar bersih dan cairan penetrasi dapat menyusup ke dalam retakan atau cacat dengan efektif.

3.5.2 Pemberian/Pengolesan Cairan Penetrasi Pada Permukaan Benda Uji (Objek)

Tahapan pembersihan permukaan dilanjutkan ke tahap kedua, yaitu pemberian atau pengolesan cairan penetrasi. Pemberian cairan penetrasi dapat dilakukan dengan beberapa cara, antara lain: perendaman (*dip*), pengolesan atau penyapuan (*brush*), penyemprotan (*spray*), maupun penumpahan (*pour*), seperti yang terlihat pada Gambar 3.4.



(a). Perendaman
(<https://www.vjp.in>)

(b). Penyapuan
(<https://www.ndtgroup.co.uk>)

(c). Penyemprotan
(<https://utmss.com>)

Gambar. 3.4 Pemberian Cairan Penetrasi.

Perendaman (*dip*) dilakukan dengan cara membenamkan benda uji ke dalam tangki berisi cairan penetran, kemudian diangkat dan ditiriskan.

Penyapuan (*brush*) diaplikasikan menggunakan kuas atau kain lap, dan biasanya digunakan untuk memeriksa area kecil pada permukaan benda uji.

Penyemprotan (*spray*) dilakukan dengan alat penyemprot bertekanan rendah atau tabung semprot bertekanan, sehingga cairan penetran dapat merata pada permukaan benda uji, termasuk permukaan yang sulit dijangkau.

Setelah cairan penetran diaplikasikan, cairan tersebut dibiarkan meresap ke dalam setiap retakan atau cacat selama waktu tertentu, yang dikenal sebagai *dwell time*. Menurut ASME Section V, Article 6 (2010), durasi minimum *dwell time* adalah 5 menit untuk material logam hasil pengecoran atau pengelasan. Namun demikian, *dwell time* dapat diperpanjang hingga 30 menit atau bahkan 60 menit, tergantung pada beberapa faktor, antara lain: viskositas cairan penetran (cairan dengan viskositas tinggi membutuhkan waktu penetrasi lebih lama), jenis bahan uji, dan ukuran cacat (cacat yang lebih kecil memerlukan waktu penetrasi lebih lama). Produsen cairan penetran biasanya memberikan rekomendasi durasi *dwell time* yang sesuai untuk produk mereka.

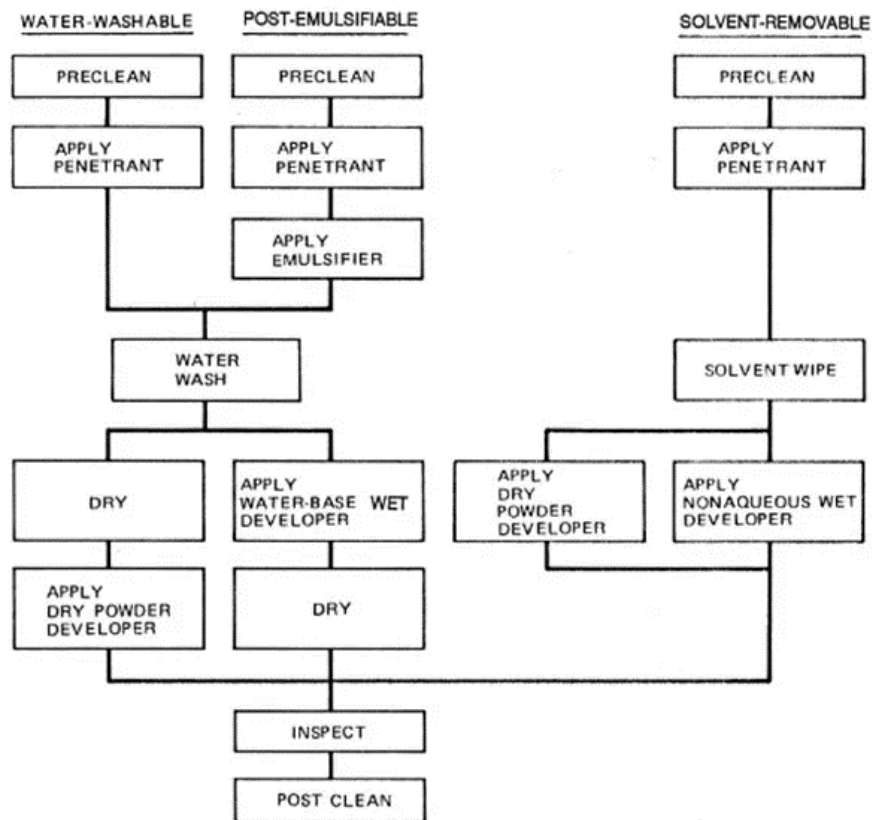
3.5.3 Pembuangan Cairan Penetran Sisa

Pembuangan cairan penetran yang tidak meresap ke dalam retakan atau cacat, yang dikenal sebagai penetran sisa, dilakukan untuk menghindari terjadinya indikasi palsu, yaitu munculnya indikasi yang tidak berasal dari cacat. Metode penghilangan penetran sisa sangat bergantung pada jenis penetran yang digunakan (lihat Subbab 3.2, Jenis Penetran Berdasarkan Proses Pembersihan Penetran Sisa). Proses

pembersihan penetran, seperti *water-washable*, *post-emulsifiable*, dan *solvent-removable* (Gambar 3.5).

Metode pencucian dengan air (*water-washable*) merupakan metode yang ekonomis dan efektif. Pada metode ini, sisa penetran dapat terlepas dari permukaan benda uji melalui proses pembilasan dengan air, karena air mampu melarutkan unsur-unsur yang terkandung dalam penetran dalam waktu tertentu. Metode ini relatif mudah diterapkan dan memiliki tingkat sensitivitas yang baik.

Selain itu, alat bantu berupa kain dapat digunakan untuk menghapus cairan penetran dari permukaan benda uji. Kain yang digunakan harus dalam kondisi kering, bersih, dan tidak berbulu, serta terlebih dahulu disemprot dengan cairan pembersih (*cleaner*) sebelum digunakan. Penghapusan dilakukan hingga seluruh sisa cairan penetran pada permukaan benda uji benar-benar hilang. Metode penghapusan menggunakan kain umumnya diterapkan pada area inspeksi yang relatif kecil, karena kurang efisien apabila digunakan pada area yang luas.



Gambar 3.5 Ilustrasi perbedaan proses pembersihan penetrasi pada metode uji penetrasi cair, yaitu water-washable (sisa penetrasi dibersihkan dengan bilasan air), post-emulsifiable (sisa penetrasi dibersihkan menggunakan emulsi sebelum dibilas), dan solvent-removable (sisa penetrasi dihilangkan menggunakan pelarut khusus) (Detech, 2021)

3.5.4. Pemberian Pengembang (*Developer*)

Pemberian pengembang (*developer*) bertujuan untuk menarik cairan penetrasi yang masih berada di dalam cacat ke permukaan benda uji, sehingga indikasi cacat menjadi lebih jelas dan mudah diamati.

Berdasarkan standar AMS 2644 dan MIL-I-25135, pengembang (*developer*) diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis sebagai berikut:

- From a - Dry Powder
- Form b - Water Soluble
- Form c - Water Suspensible
- Form d - Nonaqueous Type 1 Fluorescent (Solvent Based)
- Form e - Nonaqueous Type 2 Visible Dye (Solvent Based)
- Form f - Special Applications

Berdasarkan Buku Informasi Melakukan Penetrant Test (PT) C.24LAS01.034.01, 2018 dari Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, klasifikasi pengembang (*developer*) diperlihatkan pada Gambar 3.6.



Kain

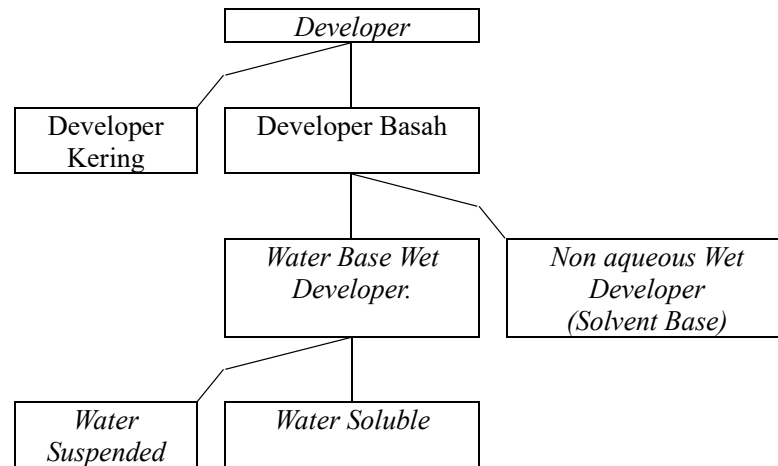


Water Spray (IOWA, 2024)

Gambar 3.6 Air dan Kain Digunakan untuk Membuang Penetrasi Sisa

Pengembang kering tersedia di pasaran dalam bentuk serbuk putih yang halus. Jenis pengembang ini hanya dapat diaplikasikan pada permukaan benda uji yang benar-benar kering. Beberapa metode pengaplikasian pengembang kering antara lain sebagai berikut:

- Perendaman, yaitu benda uji dicelupkan ke dalam wadah yang berisi pengembang kering, kemudian diangkat dan ditiup atau diketuk secara perlahan agar serbuk pengembang menempel secara merata pada permukaan.
- Lemari khusus, yaitu benda uji ditempatkan di dalam lemari pengembang, kemudian permukaannya ditiup dengan pengembang kering hingga serbuk menempel secara merata.
- Alat penyemprot bubuk elektrostatis, yaitu pengembang kering disemprotkan secara elektrostatis sehingga serbuk pengembang dapat menempel pada seluruh area inspeksi, termasuk pada permukaan yang sulit dijangkau, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Klasifikasi Pengembang (developer).



Gambar 3.7 Aplikasi Developer kering (IOWA,2024)

Pengembang basah (*wet developer*) dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *non-aqueous wet developer* dan *water-based wet developer*. *Non-aqueous wet developer* terikat dalam suspensi pelarut (*solvent*) dan umumnya dikemas dalam kaleng semprot bertekanan. Ketika pelarut menguap, proses ini membantu menarik cairan penetran dari dalam diskontinuitas ke permukaan benda uji.

Water-based wet developer dibuat dengan mencampurkan serbuk pengembang dengan air. Jenis pengembang ini digunakan pada kondisi permukaan benda uji yang masih basah setelah proses pembilasan. Metode aplikasinya meliputi perendaman, penuangan, atau penyemprotan. Proses ini mengacu pada *Nondestructive Testing Handbook (1982)*.

3.5.5 Penginspeksian

Penginspeksian dilakukan beberapa menit setelah pemberian cairan pengembang (*developer*) pada permukaan benda uji. Waktu tunggu ini bertujuan untuk memberikan kesempatan bagi cairan penetran yang tertarik ke permukaan

oleh pengembang sehingga dapat membentuk indikasi cacat yang jelas dan mudah diamati.

Tingkat pencahayaan yang diperlukan selama proses inspeksi bergantung pada jenis penetrant yang digunakan:

- a. *Visible dye penetrant*: penginspeksian dapat dilakukan dengan menggunakan cahaya biasa.
- b. *Fluorescent penetrant*: penginspeksian harus dilakukan di ruangan gelap dengan lampu ultraviolet (UV) berintensitas memadai agar indikasi cacat dapat terlihat jelas.

Dalam proses inspeksi, diperlukan interpretasi terhadap indikasi atau tanda-tanda yang muncul pada permukaan benda uji. Indikasi yang ditemukan dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu indikasi palsu, indikasi tidak relevan, dan indikasi relevan.

Indikasi palsu merupakan tanda-tanda yang muncul bukan akibat adanya diskontinuitas, seperti retak, pori, atau cacat lainnya, melainkan disebabkan oleh faktor lain, misalnya proses pembersihan yang kurang sempurna atau kondisi pemrosesan yang tidak sesuai.

Indikasi tidak relevan adalah tanda-tanda yang muncul bukan akibat retak, pori, atau cacat, tetapi disebabkan oleh ketidakraturan permukaan atau konfigurasi benda uji itu sendiri, seperti kerak lepas pada benda cor atau hasil proses pengelasan. Indikasi tidak relevan tidak memengaruhi fungsi maupun keselamatan benda uji.

Indikasi relevan merupakan tanda-tanda yang benar-benar disebabkan oleh adanya diskontinuitas pada permukaan benda uji dan bukan termasuk indikasi palsu maupun tidak relevan. Indikasi relevan perlu dianalisis lebih lanjut untuk

mengetahui penyebab diskontinuitas serta pengaruhnya terhadap umur pakai dan kinerja benda uji.

Dalam evaluasi indikasi, penggunaan standar yang berlaku sangat penting untuk memastikan hasil inspeksi yang objektif dan konsisten. Kriteria keberterimaan terhadap permukaan yang diuji mengacu pada standar ASME. Menurut Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia (2018), penerapan standar tersebut bertujuan untuk menjamin kualitas, keandalan, dan keselamatan komponen yang diperiksa :

- a. Indikasi *linier* yang relevan adalah lebih besar dari 1,5 mm (>1,5 mm).
- b. Indikasi *rounded* yang relevan bila ukuran diameternya lebih besar dari 5 mm (>5 mm).
- c. Empat atau lebih indikasi *rounded* yang relevan berjajar dalam satu garis dan terpisah satu sama lainnya dengan jarak lebih kecil 1,5 mm (1,5 mm) dari ujung keujung.

3.6 Standar Metode Uji Penetrant Cair

Salah satu standar yang digunakan dalam metode uji penetrant cair adalah ASTM E165 – Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2018)

3.7 Demonstrasi Video Metode Inspeksi Visual

Demo penggunaan metode uji penetrant cair dapat dilihat pada video melalui tautan berikut:

1. <https://www.youtube.com/watch?v=xEK-c1pkTUI>
2. <https://www.youtube.com/watch?v=bHTRmTQDZzg>
3. <https://www.youtube.com/watch?v=Kj8zn2mHMQg>
4. <https://www.youtube.com/watch?v=zow14e0KuQw>

3.8 Latihan Soal.

Inspeksi visual adalah metode NDT yang digunakan untuk mengecek permukaan material atau sambungan las dari cacat atau ketidaksesuaian. Latihan soal berikut membantu untuk memahami konsep dasar, jenis cacat, alat bantu, dan faktor yang memengaruhi inspeksi visual. Pilih jawaban yang paling tepat untuk tiap soal.

- a. Apa tujuan utama dari metode inspeksi visual dalam pengujian tidak merusak (NDT) pada material logam?
 - A. Mengukur kekerasan material
 - B. Menentukan komposisi kimia material
 - C. Mendeteksi cacat permukaan atau ketidaksesuaian visual
 - D. Menentukan laju korosi secara kuantitatif
- b. Seorang inspeksi visual menemukan retakan kecil pada permukaan las baja karbon. Cacat ini tampak seperti garis halus berwarna gelap. Jenis cacat ini termasuk dalam kategori:
 - A. Porositas
 - B. Retak (*Crack*)
 - C. Inklusi non-logam
 - D. Underfill
- c. Dalam inspeksi visual, penggunaan alat bantu seperti borescope atau endoskop terutama digunakan untuk:
 - A. Mengukur dimensi benda uji secara akurat
 - B. Mengakses area yang sulit dijangkau dan mengamati secara visual
 - C. Mengukur ketebalan lapisan cat
 - D. Mendeteksi perubahan komposisi kimia permukaan
- d. Menurut standar NDT seperti ASME Section V, kriteria keberterimaan cacat pada sambungan las harus berdasarkan:
 - A. Pendapat subjektif inspeksi
 - B. Ukuran, lokasi, dan jenis cacat sesuai standar
 - C. Warna dan tekstur material
 - D. Waktu inspeksi dan pengalaman operator
- e. Seorang teknisi inspeksi visual menggunakan pencahayaan yang buruk saat memeriksa permukaan tangki baja. Beberapa retakan halus mungkin terlewat. Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas inspeksi visual sangat dipengaruhi oleh faktor:
 - A. Temperatur lingkungan
 - B. Keterampilan operator, pencahayaan, dan kondisi permukaan
 - C. Ketebalan material dan jenis baja
 - D. Waktu inspeksi saja

Daftar Pustaka

- <https://id.pikbest.com/?m=download&id=9970911&flag=1>
<https://www.amongguru.com/pengertian-gaya-adhesi-dan-kohesi-serta-contohnya-dalam-kehidupan/>
Paten US4191048A Amerika Serikat,
<https://patents.google.com/patent/US4191048A/en>
diunduh 22 feb 2024.
Amar Ma'ruf Irfan M, Dra. Eko Tri Sulistyani, M.Sc. ; Prof. Kuwat Triyana, M.Si., Ph.D., 2020, “Analisis Sudut Kontak Pada Larutan Metanol, Etanol, Dan Propanol Dengan Variasi Konsentrasi Di Atas Permukaan Daun Talas”, Skripsi, Fisika, Universitas Gajah Mada, <https://Etd.Repository.Ugm.Ac.Id/Penelitian/Detail/193796>

Metanol, 2024, <https://id.wikipedia.org/wiki/Metanol>
 DDB, 2024, "Surface Tension",
<http://ddbonline.ddbst.de/DIPPR106SFTCalculation/DIPPR106SFTCalculationCGI.exe?component=Methanol>
 diunduh 22 feb 24

Luis S. Rosado, 2019," IoT ready eddy current testing structural health monitor", Thesis November 2019, University of Lisbon; DOI: 10.13140/RG.2.2.20924.16002

Magnaflux , 2024 ,"The Ultimate Guide to Visible Dye Penetrant Testing",
<https://magnaflux.com/Magnaflux/Blog/Dye-Penetrant-Infographic>, diunduh 24 feb 2024.

Indiamart, 2024, "*Liquid Penetrant Testing*",
<https://www.indiamart.com/proddetail/liquid-penetrant-testing-6364500473.html>, diunduh 24 feb 2024,

IOWA State University, NDE ED. Org, Penetrant Removal Process, 2024, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/PenetrantTest/MethodsTech/removal.xhtml> Diunduh 24 Feb 2024.

Jim Worman, Liquid Penetrant Examination,
<https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=164&ID=374>
<https://www.vjp.in/blog/fluorescent-penetrant-inspection>
<https://www.ndtgroup.co.uk/latest-news/dye-penetrant-inspection-guide/>
<https://utmss.com/dye-penetrant-inspection/>

Nondestructive Testing Handbook, Vol. 2, Liquid Penetrant Tests, Robert McMaster, et al., American Society for Nondestructive Testing, , 1982, pp. 283-319.

Onestopndt,"Exploring Dye Penetration Testing: A Comprehensive Guide" 08 feb

2024,<https://www.onestopndt.com/ndt-articles/dye-penetration-testing> diunduh 28 feb 2024

Admin_Detech April 3, 2021, Material Testing Penetrant Test , <https://Www.Detech.Co.Id/Penetrant-Test/> Diunduh 28 Februari 2024

Buku Informasi Melakukan Penetrant Test (Pt) C.24las01.034.01, 2018 Kementerian Ketenagakerjaan R.I. Direktorat Jenderal Pembinaan Pelatihan Dan Produktivitas Direktorat Bina Standardisasi Kompetensi Dan Pelatihan Kerja Jl. Jend. Gatot Subroto Kav. 51 Lt. 6.A Jakarta Selatan 2018,
<https://Blkserang.Kemnaker.Go.Id/Digilib/Index.Php?P=Fstream-Pdf&Fid=251&Bid=78>, Diunduh 28 Feb 2024

BAB 4

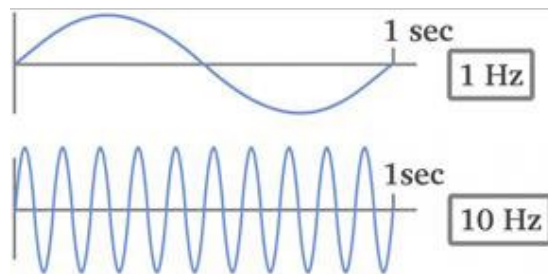
Metode Uji Ultrasonik

4.1 Pengertian Umum

Uji ultrasonik merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak yang populer untuk mendeteksi diskontinuitas, seperti retak, porositas, atau cacat lainnya. Metode ini menggunakan energi gelombang suara berfrekuensi tinggi untuk mengidentifikasi cacat pada bagian dalam benda uji. Karena memiliki kemampuan penetrasi yang baik, uji ultrasonik sangat efektif digunakan untuk menginspeksi benda uji dengan ketebalan yang relatif besar.

4.2 Teori Pendukung: Prinsip Perambatan Gelombang

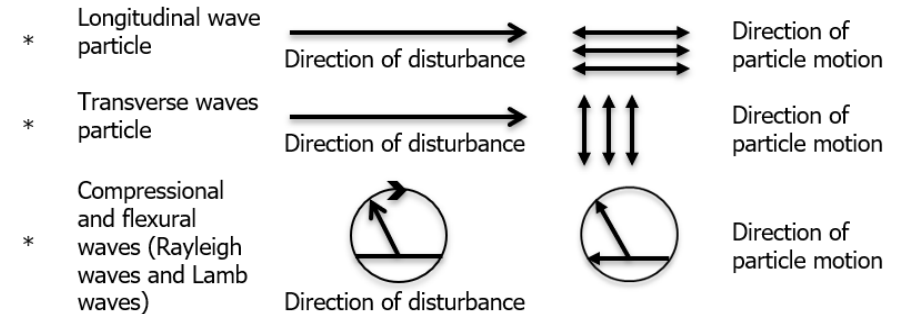
Hertz merupakan satuan frekuensi dalam Sistem Internasional (SI). Besaran frekuensi dinyatakan dalam satuan hertz (Hz), sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.1. Bunyi yang dapat didengar oleh manusia, seperti musik atau ucapan, berada pada kisaran frekuensi 20 hingga 20.000 Hz. Sementara itu, bunyi ultrasonik memiliki frekuensi di atas 20.000 Hz.



Gambar 4.1 Pengertian Herzt (Hz)

4.2.1 Wave Propagation

Berdasarkan arah perpindahan partikel medium, gelombang ultrasonik diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.2. Salah satu di antaranya adalah gelombang Rayleigh yang dikenal sebagai gelombang permukaan (*surface wave*).



Gambar 4.2 Wave Propagation (J Prasad And CG K Nair, 2008)

Gelombang longitudinal adalah gelombang ultrasonik di mana arah osilasi partikel medium sejajar dengan arah rambat gelombang. Gelombang ini merambat melalui mekanisme tekanan dan regangan secara bergantian. Dalam uji ultrasonik, gelombang longitudinal paling sering digunakan karena memiliki daya penetrasi yang tinggi dan dapat merambat pada media gas, cair, dan padat. Gelombang ini efektif untuk mendeteksi cacat internal pada benda uji yang relatif tebal.

Gelombang transversal atau gelombang geser memiliki arah osilasi partikel medium tegak lurus terhadap arah rambat gelombang. Gelombang ini hanya dapat merambat pada benda padat karena memerlukan gaya geser antarpartikel. Dalam uji ultrasonik, gelombang geser banyak digunakan untuk mendeteksi retak yang orientasinya sejajar dengan permukaan, khususnya pada inspeksi sambungan las. Gelombang geser

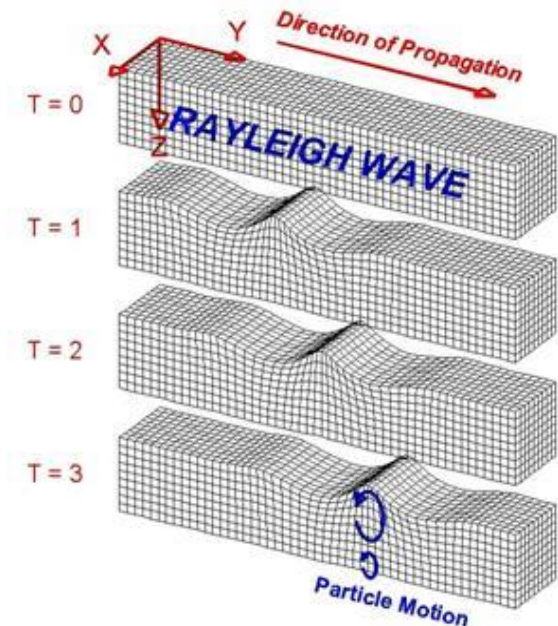
umumnya memiliki kecepatan lebih rendah dibandingkan gelombang longitudinal, namun lebih sensitif terhadap cacat tertentu.

Selain gelombang longitudinal dan gelombang geser, gelombang Rayleigh (*Rayleigh wave*) dan gelombang Lamb (*Lamb wave*) juga memiliki peranan penting dalam uji ultrasonik.

Gelombang Rayleigh merupakan gelombang ultrasonik yang merambat di sepanjang permukaan benda uji, sehingga sering disebut sebagai gelombang permukaan (*surface wave*). Pada gelombang ini, partikel medium bergerak membentuk lintasan elips dengan amplitudo terbesar di permukaan dan menurun secara eksponensial seiring bertambahnya kedalaman. Dalam uji ultrasonik, gelombang Rayleigh sangat efektif untuk mendeteksi cacat yang berada di dekat atau pada permukaan, seperti retak permukaan dan retak dangkal. Kedalaman penetrasi gelombang Rayleigh umumnya sekitar satu panjang gelombang, sehingga penggunaannya terbatas pada inspeksi area permukaan.

Gelombang Rayleigh, atau disebut juga gelombang permukaan, merupakan gelombang ultrasonik yang merambat di sepanjang permukaan benda uji. Gelombang ini hanya menembus material hingga kedalaman sekitar satu panjang gelombang. Gelombang Rayleigh terbentuk dari kombinasi gelombang longitudinal dan gelombang geser, sehingga partikel-partikel di permukaan bergerak membentuk lintasan elips, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.3. Arah utama gerakan elips tegak lurus terhadap permukaan material. Semakin jauh dari permukaan, gerakan partikel semakin kecil. Gelombang Rayleigh terjadi ketika gelombang longitudinal datang ke permukaan dengan sudut yang lebih besar dari sudut kritis. Dalam praktik uji ultrasonik, gelombang Rayleigh

digunakan untuk mendeteksi retak atau cacat yang berada pada atau dekat permukaan benda uji..

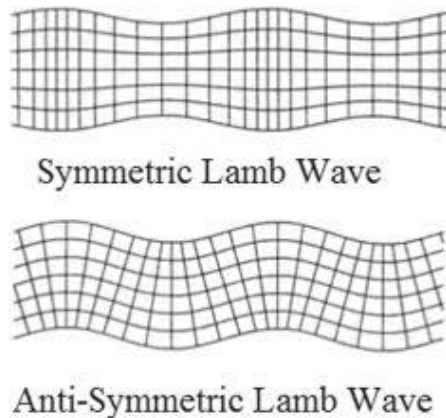


Gambar 4.3 Rayleigh wave. (Prof Lawrence, 2006)

Gelombang Lamb merupakan gelombang ultrasonik yang merambat pada pelat tipis, dengan ketebalan yang sebanding dengan panjang gelombang. Gelombang ini bersifat dispersif, artinya kecepatan rambatnya bergantung pada frekuensi dan ketebalan material. Dalam praktik UT, gelombang Lamb sering digunakan untuk inspeksi pelat, pipa berdinding tipis, dan struktur lembaran, terutama untuk mendeteksi korosi, delaminasi, dan cacat pada area yang luas.

Gelombang Lamb memiliki kemiripan dengan gelombang Rayleigh, namun gelombang ini hanya dapat

terbentuk pada benda uji yang tipis, yaitu ketika ketebalan material sebanding dengan panjang gelombang. Gelombang Lamb bersifat lebih kompleks karena merambat sejajar dengan permukaan benda uji dan menyebar ke seluruh ketebalan material. Gelombang ini dihasilkan ketika gelombang ultrasonik mengenai permukaan dengan sudut tertentu sehingga kecepatan komponen gerak sejajar permukaan dari gelombang sama dengan kecepatan rambat gelombang di dalam benda uji. Pada material baja, gelombang Lamb umumnya hanya dapat merambat sejauh beberapa meter. Dalam uji ultrasonik, gelombang Lamb digunakan untuk pemindaian (*scanning*) pelat, kawat, dan tabung berdinding tipis. Gelombang Lamb memiliki dua mode utama, yaitu mode simetris (*symmetric Lamb wave*) dan mode asimetris (*asymmetric Lamb wave*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.4. Pada mode simetris, perpindahan partikel bersifat kompresional di sepanjang sumbu netral, sedangkan di permukaan partikel bergerak membentuk lintasan elips.



Gambar 4.4 Symmetric Lamb Waves (a); Asymmetric Lamb Waves (b) (Shahab, 2014)

4.3 Prinsip Dasar Kerja

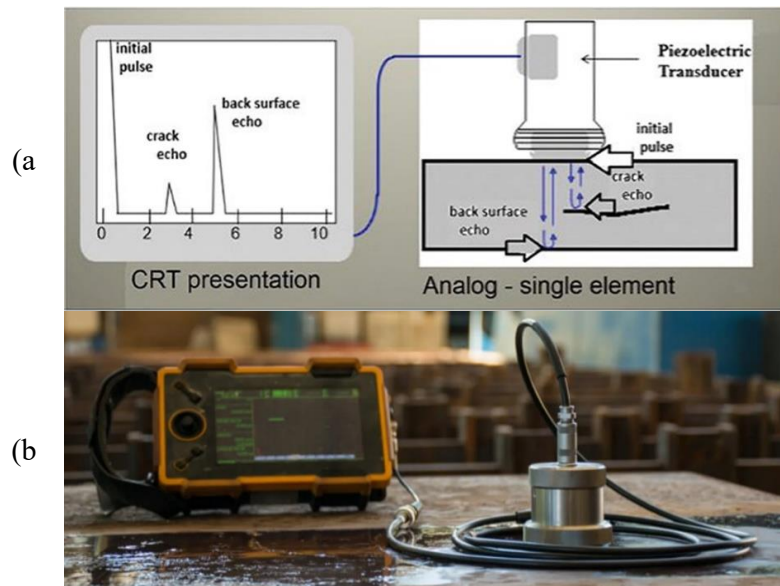
Peralatan inspeksi ultrasonik tipe pulse-echo terdiri atas tiga unit utama, yaitu pulser/receiver, transducer, dan monitor. Pulser/receiver berfungsi untuk menghasilkan pulsa listrik bertegangan tinggi. Pulsa listrik tersebut kemudian dikonversi oleh transducer menjadi energi ultrasonik berfrekuensi tinggi. Energi ultrasonik selanjutnya masuk dan merambat ke dalam benda uji dalam bentuk gelombang suara. Apabila terdapat diskontinuitas, seperti retak, pori, atau cacat lainnya pada jalur rambat gelombang, sebagian energi ultrasonik akan dipantulkan kembali dari diskontinuitas tersebut. Gelombang pantul ini diterima oleh transducer dan dikonversi kembali menjadi sinyal listrik. Sinyal listrik tersebut kemudian diproses oleh pulser/receiver dan ditampilkan pada monitor. Dengan mengetahui kecepatan rambat gelombang ultrasonik dan waktu tempuh sinyal, jarak atau posisi diskontinuitas di dalam benda uji dapat ditentukan. Berdasarkan karakteristik sinyal yang ditampilkan, informasi mengenai keberadaan, lokasi, dan ukuran cacat dapat diperoleh.

4.4 Peralatan Uji Ultrasonik

Peralatan dan bahan utama yang digunakan pada uji ultrasonik ditunjukkan pada Gambar 4.5.

4.4.1. Pulser/Receivers

Perangkat ini memiliki beberapa fungsi dalam pengujian ultrasonik. Dalam penggunaannya, perangkat ini dihubungkan dengan transducer dan oscilloscope (monitor), seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Perangkat ini digunakan untuk mendeteksi retak serta mengukur ketebalan benda uji, seperti material logam, plastik, keramik, dan material lainnya. Pada peralatan khusus yang bersifat portabel, perangkat ini umumnya menggunakan sumber daya berupa baterai berukuran kecil.



Gambar 4.5 Prinsip kerja pengujian tidak merusak dengan metode ultrasonik: (a) prinsip kerja metode ultrasonik (Contributed Content, 2023); (b) contoh peralatan uji ultrasonik (GIT, 2023)



Gambar 4.6 Koneksitas Antara Unit Pulser-Receiver; Transducer' Computer Or (Scope Display)

a. Pulser section.

Bagian pulser berfungsi menghasilkan pulsa listrik pendek dengan amplitudo tinggi (*pulse voltage*) ketika pemacu diaktifkan. Pulsa listrik ini kemudian ditransmisikan ke transduser ultrasonik, yang mengonversinya menjadi pulsa ultrasonik berdurasi pendek. Dalam pengoperasiannya, pulser dapat mengatur beberapa parameter pulsa sesuai dengan kebutuhan aplikasi, antara lain: (1) memperpanjang atau meredam pulsa, (2) mengatur waktu atau durasi pulsa yang diterapkan ke transduser, serta (3) memvariasikan besar tegangan pulsa (*pulse voltage*) dalam kisaran standar tertentu, umumnya antara 100 hingga 800 volt.

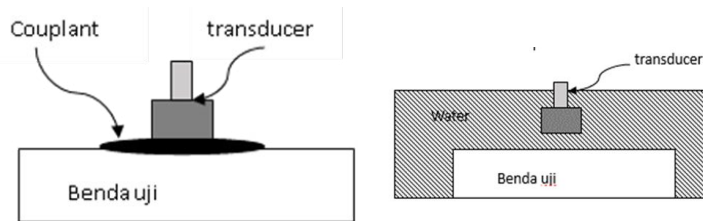
b. Receiver section.

Bagian ini berfungsi menerima dan memperkuat sinyal tegangan yang dihasilkan oleh transduser, yang merepresentasikan pulsa ultrasonik pantul. Sinyal tegangan yang telah diperkuat kemudian dikeluarkan untuk ditampilkan pada monitor atau ditangkap lebih lanjut untuk keperluan pemrosesan sinyal menggunakan komputer.

4.4.2. Couplant.

Couplant adalah material, umumnya berupa air atau cairan sejenis, yang diletakkan di antara transduser dan permukaan benda uji. Fungsi couplant adalah, pertama, memaksimalkan transfer energi ultrasonik dari transduser ke dalam benda uji, dan kedua, memperoleh kembali sebanyak mungkin energi ultrasonik yang dipantulkan oleh cacat atau diskontinuitas ke transduser. Dengan demikian, couplant berperan sebagai “jembatan” yang menghubungkan transduser dengan benda uji padat, sekaligus menghilangkan celah udara yang dapat menghambat perambatan gelombang ultrasonik.

Pada pengujian ultrasonik metode kontak, digunakan lapisan tipis *couplant*, seperti oli, gliserin, atau air, yang ditempatkan di antara transduser dan permukaan benda uji, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7(a). Sementara itu, pada pengujian ultrasonik metode terendam (*immersion testing*), *couplant* yang digunakan adalah air, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.7(b).



Gambar 4.7 Couplant

4.4.3 Piezoelectric Transducers

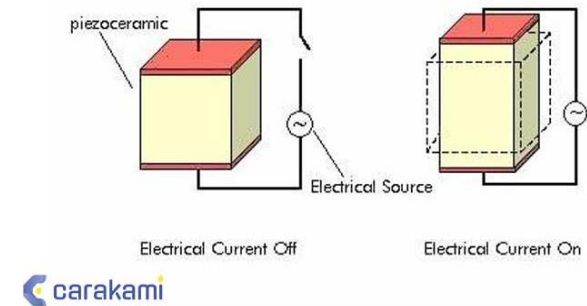
Transduser berfungsi untuk mengonversi pulsa listrik (*electrical pulses*) menjadi getaran mekanik yang selanjutnya merambat sebagai gelombang ultrasonik ke dalam benda uji. Selain itu, transduser juga berfungsi mengonversi gelombang ultrasonik yang dipantulkan dari dalam benda uji menjadi getaran mekanik, yang kemudian diubah kembali menjadi pulsa listrik (*electrical pulses*).

Material penyusun transduser adalah material piezoelektrik. Pada material piezoelektrik, ketika elektroda ditempatkan pada kedua sisinya dan diberikan medan listrik, material tersebut akan mengalami polarisasi, yaitu terbentuknya muatan positif pada satu sisi dan muatan negatif pada sisi lainnya. Ketika medan listrik melintasi material ini, susunan molekul akan mengalami perubahan atau perenggangan searah dengan medan listrik, sehingga menyebabkan perubahan

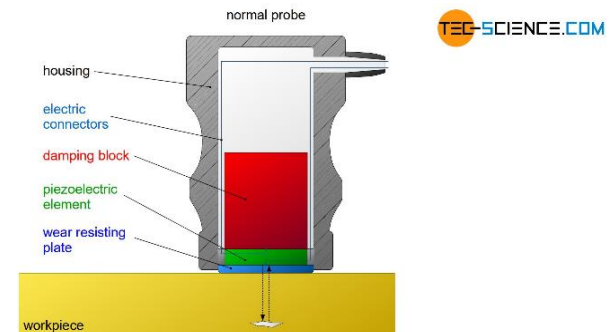
dimensi pada material piezoelektrik, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Selain itu, material yang memiliki polarisasi permanen, seperti kuarsa (SiO_2) atau barium titanat (BaTiO_3), akan menghasilkan medan listrik ketika mengalami perubahan dimensi akibat tekanan mekanik. Fenomena timbal balik antara medan listrik dan deformasi mekanik ini dikenal sebagai efek piezoelektrik.

Transduser piezoelektrik yang digunakan dalam uji ultrasonik disebut probe. Komponen penyusun probe diperlihatkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.8 Piezoelektrik (Carakami, 2024)

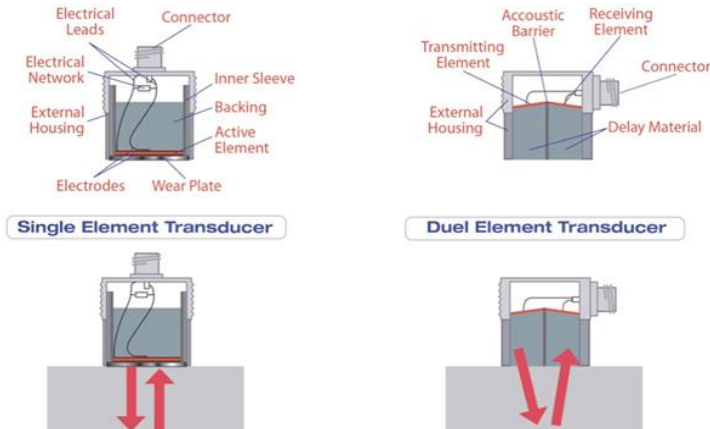


Gambar 4.9 Ilustrasi Komponen Pada Sebuah Piezoelectric Transducers (Probe). Tipe single element (Tecs, 2024)

a. Dual Element Transducers

Transduser ini terdiri atas dua elemen kristal yang ditempatkan dalam satu wadah dan dipisahkan oleh penghalang akustik, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.10. Satu elemen berfungsi sebagai pemancar gelombang ultrasonik, sedangkan elemen lainnya berfungsi sebagai penerima gelombang pantul. Selain itu, transduser jenis ini memiliki beberapa aplikasi umum lainnya, antara lain:

- Inspeksi pengelasan *overlay* dan *cladding bond/disbond*.
- Deteksi porositas, inklusi, retakan, dan laminasi pada pengecoran dan penempaan.
- Deteksi keretakan pada baut dan benda silinder lainnya.
- Aplikasi suhu tinggi



Gambar 4.10. Typical Single Element And Dual Element Transducer Construction (Tom Nelligan, 2024)

b. Contact Transducers

Transduser ini digunakan untuk inspeksi dengan metode kontak langsung, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.11. Transduser elemen tunggal ini dilengkapi dengan permukaan yang tahan aus sehingga memiliki ketahanan yang baik meskipun digunakan secara langsung pada sebagian besar material logam. Transduser kontak banyak diaplikasikan untuk:

- Deteksi cacat sinar lurus
- Pengukur ketebalan
- Mendeteksi dan mengukur delaminasi
- Pengukuran kecepatan



Gambar 4.11 Contact Transducer

c. Transduser sinar sudut (*Angle Beam Transducers*)

Transduser ini digunakan bersama irisan (*wedge*) untuk memasukkan gelombang geser yang dibiaskan atau gelombang longitudinal ke dalam benda uji, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.12. Transduser sudut ini memancarkan gelombang ultrasonik ke dalam benda uji dengan sudut tertentu. Dalam praktiknya, inspektur menggunakan transduser ini untuk menguji integritas sambungan las, karena gelombang suara dapat diarahkan

pada sudut yang sesuai dengan orientasi cacat. Aplikasi industri umum lainnya meliputi deteksi cacat serta teknik pengukuran dan karakterisasi retakan.



Gambar 4.12 Angle Beam Transducers

d. *Delay Line Transducers*

Transduser ini memberikan jeda waktu antara pembentukan gelombang ultrasonik dan datangnya gelombang pantul, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.13 sehingga dapat meningkatkan resolusi pada daerah dekat permukaan. Transduser ini umumnya memiliki frekuensi yang tinggi, sehingga sesuai digunakan untuk pemeriksaan atau pengukuran material tipis, serta untuk mendeteksi cacat berukuran kecil ketika digunakan pada metode kontak langsung. Aplikasi umum transduser ini meliputi:

- Deteksi cacat pada material tipis



Gambar 4.13 Delay Line Transducers

e. *Immersion Transducers*

Immersion transducers dirancang untuk beroperasi di dalam air, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14. Transduser tipe ini menggunakan air sebagai couplant untuk mentransmisikan energi gelombang ultrasonik ke dalam benda uji yang akan diinspeksi. Dengan demikian, transduser ini tidak melakukan kontak langsung dengan permukaan benda uji.



Gambar 4.14. Delay Line Transducers (rebbeca, 2020)

Transduser perendaman sering digunakan untuk pengujian *in-line* atau *in-process* pada komponen yang bergerak, pemindaian otomatis, serta untuk mengoptimalkan penggandengan gelombang ultrasonik ke dalam radius, alur, atau saluran yang tajam pada benda uji dengan geometri yang kompleks.

Aplikasi transduser ini meliputi:

- Pengukuran ketebalan *in-line*
- Deteksi cacat berkecepatan tinggi
- Analisis material dan pengukuran kecepatan

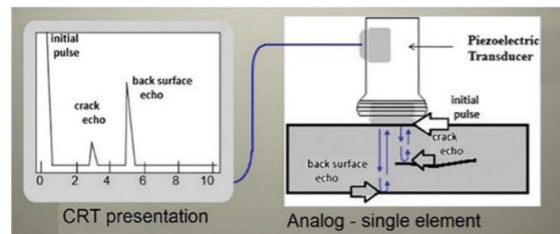
4.4.4 *Pulser/receiver*

Transduser yang sama yang menghasilkan gelombang ultrasonik juga berfungsi sebagai penerima gelombang pantulan. Sinyal pantulan yang diterima kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi keberadaan cacat, karakteristik diskontinuitas, atau perubahan sifat material pada benda uji.

4.4.5 *Tampilan Data (Data Presentation)*

Data hasil inspeksi uji ultrasonik dikumpulkan dan disajikan dalam beberapa format tampilan. Salah satu bentuk tampilan data tersebut pada Gambar 3.15 untuk memudahkan pemahaman.

Tampilan A-scan memperlihatkan besarnya energi ultrasonik yang diterima sebagai fungsi waktu. Energi yang diterima ditampilkan pada sumbu vertikal dalam bentuk amplitudo sinyal, sedangkan waktu rambat gelombang ditampilkan pada sumbu horizontal. Pada tampilan A-scan, ukuran relatif suatu diskontinuitas seperti retak, lubang (pori), atau cacat lainnya dapat diperkirakan dengan membandingkan amplitudo sinyal pantulan yang berasal dari reflektor yang tidak diketahui dengan amplitudo sinyal dari reflektor yang telah diketahui. Kedalaman reflektor dapat ditentukan berdasarkan posisi sinyal pada sumbu horizontal yang merepresentasikan waktu tempuh gelombang ultrasonik.



Gambar 4.15 Tampilan Data.

Gambar 4.15 memperlihatkan ilustrasi pelaksanaan pengujian tidak merusak menggunakan metode ultrasonik.

1. Probe berada di sisi kanan benda uji. Pada posisi ini, probe memancarkan pulsa awal (*initial pulse*) yang kemudian merambat ke dalam material sebagai gelombang ultrasonik.
2. Probe digeser ke arah kiri. Pada waktu ke-3 pada layar monitor muncul gema kecil (*crack echo*), sedangkan pada waktu ke-5 terlihat gema dengan amplitudo yang mendekati gema permukaan belakang (*back surface echo*).
3. Kemunculan gema (*echo*) pada waktu ke-3 mengindikasikan adanya diskontinuitas pada benda uji, yang dapat berupa retak, porositas, atau cacat lainnya.
4. Gema (*echo*) pada waktu ke-5 merupakan pantulan dari permukaan belakang benda uji dan digunakan untuk menentukan ketebalan objek yang diperiksa.

Cara membaca tampilan data pada pengujian ultrasonik dapat dipahami melalui contoh pada Gambar 4.15. Gambar tersebut digunakan sebagai ilustrasi untuk mempelajari interpretasi sinyal hasil inspeksi. Pada tampilan ini, sumbu horizontal menunjukkan waktu rambat gelombang ultrasonik, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan amplitudo sinyal pantulan yang diterima oleh transduser. Setiap puncak sinyal (*echo*) merepresentasikan pantulan gelombang ultrasonik dari batas material, diskontinuitas, atau permukaan belakang benda uji. Posisi puncak sinyal pada sumbu waktu digunakan untuk menentukan kedalaman atau jarak reflektor dari permukaan, sedangkan tinggi amplitudo sinyal memberikan informasi mengenai ukuran relatif atau tingkat reflektivitas diskontinuitas tersebut. Dengan membandingkan pola dan karakteristik sinyal yang muncul, inspektur dapat mengidentifikasi keberadaan

cacat, memperkirakan ukurannya, serta menentukan lokasinya di dalam benda uji.

4.5 Metode Pengujian Ultrasonik

Terdapat beberapa metode dalam pengujian ultrasonik (UT) yang umum digunakan. Uraian berikut menjelaskan prinsip dan karakteristik dari masing-masing metode tersebut.

4.5.1. Pulse Echo

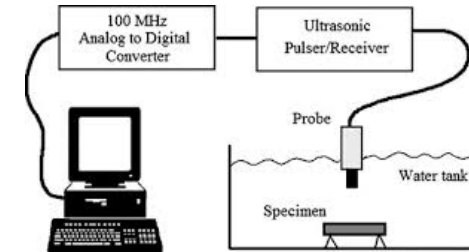
Metode pulse-echo adalah metode UT yang paling banyak digunakan. Prinsip kerjanya didasarkan pada pemancaran dan penerimaan kembali gelombang ultrasonik oleh transduser. Analisis waktu tempuh gelombang pantul digunakan untuk menentukan keberadaan, posisi, dan ukuran cacat, serta ketebalan material.

4.5.2. Through Transmission

Through Transmission adalah metode pengujian ultrasonik (UT) yang menggunakan dua transduser, yaitu satu sebagai pemancar gelombang ultrasonik dan yang lain sebagai penerima gelombang yang merambat melalui material. Jika terdapat cacat atau diskontinuitas di dalam material, gelombang ultrasonik akan dipantulkan atau diserap, sehingga amplitudo sinyal yang diterima oleh transduser penerima berkurang. Metode ini efektif untuk mendeteksi cacat pada material tebal, namun memerlukan akses ke kedua sisi benda uji.

4.5.3 Immersion Ultrasonic Testing (Immersion UT)

Metode *immersion UT* (Gambar 4.16) menggunakan transduser yang ditempatkan di dalam media cair, biasanya air, yang berperan sebagai couplant antara transduser dan benda uji. Dengan cara ini, gelombang ultrasonik dapat dipancarkan ke dalam benda uji tanpa kontak langsung dengan permukaan material.

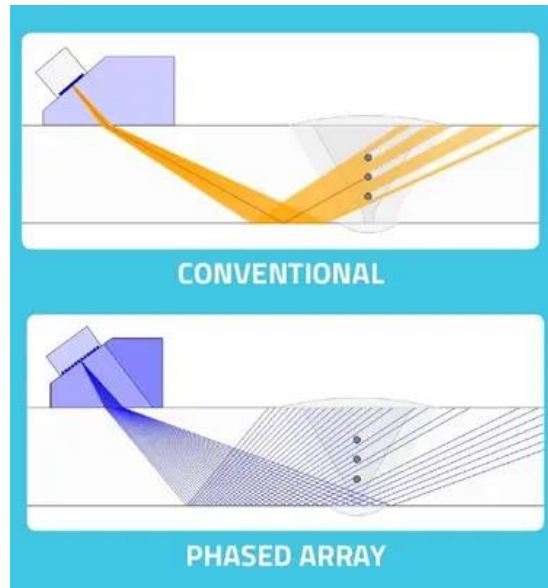


Gambar 4.16. Immersion Ultrasonic Testing

Metode ini memungkinkan pemeriksaan material dengan geometri kompleks dan mendukung pemindaian otomatis (automated scanning). Immersion UT efektif untuk mendeteksi cacat internal, memeriksa ketebalan material tipis maupun tebal, serta mempermudah pengukuran pada bagian yang sulit dijangkau oleh metode kontak langsung.

4.5.4 Phased Array Ultrasonic Testing (PAUT)

Phased Array UT (Gambar 4.17) adalah pengembangan dari metode pulse-echo yang menggunakan beberapa elemen transduser dalam satu probe. Gelombang ultrasonik yang dipancarkan oleh masing-masing elemen dapat dikontrol secara elektronik sehingga sudut, fokus, dan arah gelombang dapat diubah tanpa menggerakkan probe secara mekanik.



Gambar 4.17. Phased Array Ultrasonic Testing (Zengrayquality)

Metode ini memungkinkan pemindaian area yang luas dengan cepat, meningkatkan resolusi deteksi cacat, serta menghasilkan tampilan data dalam bentuk A-scan, B-scan, dan C-scan. PAUT banyak digunakan pada inspeksi sambungan las, pipa, dan material dengan geometri kompleks karena fleksibilitas dan keakuratannya yang tinggi.

Data pengujian ultrasonik umumnya ditampilkan pada layar monitor atau osiloskop dalam beberapa bentuk penyajian, antara lain A-scan, B-scan, dan C-scan.

A-scan (*Amplitude Scan*) merupakan bentuk tampilan data yang paling umum digunakan. Pada tampilan ini, sumbu horizontal menunjukkan waktu tempuh gelombang ultrasonik atau kedalaman material, sedangkan sumbu vertikal

menunjukkan amplitudo sinyal pantulan. Puncak sinyal (*echo*) menunjukkan adanya refleksi dari permukaan belakang benda uji atau dari suatu diskontinuitas. Berdasarkan tinggi amplitudo dan posisi puncak sinyal, operator dapat memperkirakan lokasi dan ukuran relatif cacat.

B-scan (*Brightness Scan*) menyajikan data dalam bentuk penampang dua dimensi. Pada tampilan ini, kedalaman cacat ditampilkan pada satu sumbu, sedangkan posisi pemindaian ditampilkan pada sumbu lainnya. Intensitas pantulan ditampilkan dalam bentuk tingkat kecerahan, sehingga memberikan gambaran penampang internal benda uji.

C-scan (*Contour Scan*) menampilkan data dalam bentuk peta dua dimensi dari area permukaan benda uji. Tampilan ini memberikan informasi mengenai ukuran dan bentuk cacat secara planar, sehingga sering digunakan pada pengujian otomatis dan inspeksi material dengan area luas.

4.5.5 Time-of-Flight Diffraction (TOFD)

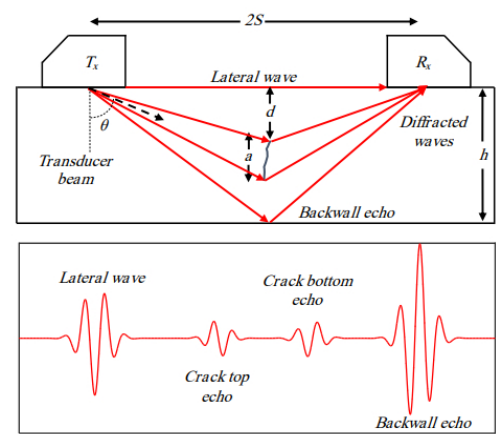
Metode TOFD (Gambar 4.18) memanfaatkan fenomena difraksi gelombang ultrasonik pada ujung retakan atau diskontinuitas. Dua transduser digunakan: satu sebagai pemancar dan satu sebagai penerima. Gema difraksi yang diterima memberikan informasi mengenai posisi, ukuran, dan orientasi cacat.

TOFD (*Time of Flight Diffraction*) berbeda dari metode ultrasonik lainnya. Alih-alih hanya mengukur gelombang kuat yang dipantulkan dari bagian belakang material, TOFD mengukur waktu tempuh gelombang lemah yang terdifraksi pada ujung retak.

Metode ini menggunakan pemancar dan penerima terpisah yang dipasang tetap pada jarak tertentu, lalu digeser sepanjang permukaan sampel uji. Di setiap posisi, pulsa

ultrasonik dikirim (A-Scan), gelombang merambat ke dalam material, tersebar oleh cacat, dan diterima kembali. Difraksi menyebabkan energi gelombang menyebar ke berbagai arah. TOFD fokus mendeteksi gelombang difraksi lemah dari ujung retak, sehingga cacat dapat diukur secara akurasi tinggi, tanpa terganggu pantulan kuat yang biasa menutupi gelombang lemah.

TOFD sangat efektif untuk deteksi retakan vertikal atau retakan las pada material logam, dan sering digunakan sebagai metode kuantifikasi cacat karena memberikan hasil yang lebih akurat dibandingkan metode pulse-echo tradisional.



Gambar 4.18 Time-of-Flight Diffraction (Fernando Brando)

Tabel 4.1 Perbandingan Metode Ultra Sonik

Metode UT	Prinsip Kerja	Kelebihan	Kekurangan	Aplikasi Umum
Pulse-Echo	Gelombang ultrasonik dipancarkan ke material dan pantulan dari cacat atau permukaan diterima kembali oleh transduser.	Dapat mudah digunakan; Dapat mendeteksi cacat permukaan dan internal; Dapat mengukur ketebalan material	Sensitivitas terbatas pada cacat kecil; Membutuhkan akses ke satu sisi material	Inspeksi sambungan las, ketebalan plat, cacat internal
Through Transmission	Satu transduser memancarkan gelombang, transduser lain menerima gelombang yang melewati material. Amplitudo sinyal menurun jika terdapat cacat.	Efektif untuk mendeteksi cacat internal pada material tebal	Membutuhkan akses ke kedua sisi material; Tidak dapat menentukan lokasi cacat secara tepat	Material tebal, pipa, sambungan besar
Immersion UT	Transduser ditempatkan	Cocok untuk	Sangat membutuh-	Pemindai-an

	dalam media cair (air) untuk memancarkan gelombang ke benda uji tanpa kontak langsung.	geometri kompleks; Dapat mendukung pemindaian otomatis; Mudah dalam pemeriksaan area sulit dijangkau	kan media cair; Lebih kompleks dan mahal dibanding metode kontak	otomatis, inspeksi pipa, pengecekan material tipis & tebal
Phased Array UT (PAUT)	Beberapa elemen transduser dipancarkan secara terkontrol untuk mengubah sudut dan fokus gelombang secara elektronik.	Resolusi tinggi, Cepat dan fleksibel; Dapat menghasilkan tampilan A-scan, B-scan, C-scan	Biaya tinggi; Memerlukan operator berpengalaman	Inspeksi sambungan las, material dengan geometri kompleks
Time-of-Flight Diffraction (TOFD)	Gelombang ultrasonik terdifraksi pada ujung retakan atau diskontinuitas, diterima oleh transduser penerima.	Akurat untuk kuantifikasi cacat; Dapat mendeteksi retakan vertikal dan mendalam	Lebih mahal; Membutuhkan pengaturan transduser yang presisi	Inspeksi retakan las, penentuan ukuran cacat internal

4.6 Pengukuran Dan Kalibrasi.

4.6.1 Normal Beam Inspection

Metode *pulse-echo ultrasonic* biasa digunakan untuk menentukan lokasi diskontinuitas, seperti cacat, lubang (pori), atau retak. Jarak diskontinuitas dari permukaan benda uji dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$d = \frac{Vt}{2} \quad [4.1]$$

Dimana d ; jarak cacat/retak/lubang
 V ; kecepatan gelombang suara didalam material
 t = waktu

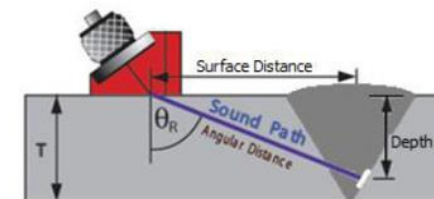
Sebuah plat baja diuji menggunakan metode ultrasonic pulse-echo dengan data sebagai berikut: waktu echo sebesar 0,0000001 detik, frekuensi gelombang 1 MHz (biasanya berada dalam rentang 500 kHz hingga 100 MHz), panjang gelombang dalam material baja 5,85 mm, dan kecepatan gelombang ultrasonik dalam baja 5850 m/s. Berdasarkan data tersebut, tentukan lokasi cacat jika diukur dari permukaan benda uji.

Jawab.

$$d = \frac{Vt}{2} \quad [4.1]$$

$$d = (5850 \times 0.0000001)/2 = 0.0002925 \text{ m} = 0.2925 \text{ mm}$$

4.6.2 Angle Beam Inspection



Gambar 4.19 Ilustrasi angle beam inspection

Jika pemantulan terjadi sebelum gelombang ultrasonik mencapai permukaan belakang (*backwall*) benda uji (Gambar 4.19), maka pantulan tersebut dikenal sebagai *first leg reflection*. Jarak sudut (*angular distance*), yang juga dikenal sebagai *sound path*, dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Sound path} = \frac{V_t t}{2} \quad [4.2]$$

Dimana :

V_t = the shear sound velocity in the material

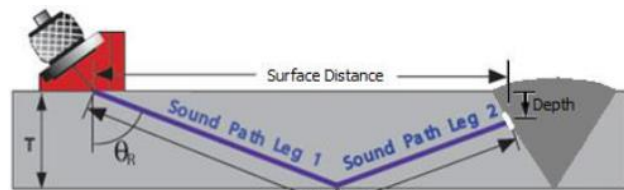
t = waktu

Dengan mengetahui sudut pembiasan (angle of refraction) terhadap transduser, panjang permukaan (surface distance) ke lokasi cacat serta kedalaman cacat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{surface distance} = \text{sound path} \times \sin \theta_R \quad [4.3]$$

$$\text{Depth}_{1st \text{ leg}} = \text{sound path} \times \cos \theta_R \quad [4.4]$$

Dimana θ_R adalah angle of refraction.



Gambar 4.20.

Jika sebuah cacat menghasilkan pantulan setelah gelombang ultrasonik terlebih dahulu mengenai dan dipantulkan dari permukaan belakang (*backwall*), maka pantulan tersebut dikenal sebagai second leg reflection (Gambar 4.20). Dalam kasus ini, sound path merupakan total jarak gelombang untuk kedua leg tersebut. Kedalaman cacat dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Depth}_{2nd \text{ leg}} = 2T - (\text{sound path} \times \cos \theta_R) \quad [4.5]$$

4.7 Metode Kalibrasi

Interpretasi indikasi hasil pengujian ultrasonik dilakukan berdasarkan standar referensi yang sesuai. Standar referensi dibuat dari material yang memiliki sifat serupa dengan benda uji yang diperiksa. Beberapa contoh standar referensi dapat dilihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21. Contoh Block Standar

Tujuan kalibrasi dalam pengujian ultrasonik bahan adalah sebagai berikut:

- Memastikan kinerja instrumen pengujian ultrasonik tetap konsisten.
- Memeriksa sensitivitas, resolusi, dan karakteristik penyelidikan ultrasonik (*probe* atau unit pencari).
- Mengevaluasi cacat berdasarkan ukuran dan lokasinya.
- Menilai homogenitas material serta distribusi lokal atau volumetrik tekanan dalam benda uji.
- Memberikan dasar umum untuk mengekspresikan hasil pengujian secara akurat dan konsisten.

4.8 Kelebihan Dan Kekurangan.

Kelebihan dan kekurang metode ultrasonic disajikan pada Tabel 4.2.

*Tabel 4.2 Kelebihan Dan Kekurangan Metode Ultrasonic
(Ala Hijazi, 2024)*

No	Kelebihan (Advantages)	Kekurangan (Disadvantages)
1	Metode ini sangat sensitive pada diskontinuitas (retak, lubang (pori) yang terletak diatas permukaan dan subsurface.	Permukaan yang hendak di inspeksi harus memiliki akses bagi transmitter (probe)
2	Dapat mengukur atau menjangkau cacat yang berada didalam dengan sangat baik	Isnpektor harus memiliki skill dan pelatihan yang instensif
3	Membutuhkan persiapan yang minimal.	Metode ultrasonic harus memiliki media antara (coupling medium) agar energy suara dapat ditransfer masuk kedalam benda uji (objek)
4	Hasil pengujian dapat segera di ketahui .	Benda uji (objek) dengan permukaan yang kasar , bentuk tidak beraturan, sangat kecil atau tipis serta tidak homogen sangat sukar untuk diinspeksi
5	Metode ini tidak membahayakan operator atau orang yang berada disekitar operator dan juga memberikan apa-apa efek terhadaap benda uji (objek) .	Besi tuang dan material dengana butiran yang kasar sangat sulit diinspeksi dengan metode ultrasonic.

6	Metode ultrasonic dapat juga digunakan untuk mengukur ketebalan .	Memerlukan standar untuk mengkalibrasi peralatan itu sendiri serta karakterisasi cacat.
7	Peralatan uji ultrasonic bersifat portable	
8	Permukaan harus mudah diakses oleh transmitter	

4.9 Standar:

Salah satu standar yang digunakan untuk aplikasi metode ultrasonik adalah BS EN ISO 17640 (standar Inggris dan ISO). Standar yang berlaku di Australia terkait pengujian ultrasonik antara lain (AME, 2022):

- AS 1710-2007, REC:2017: Pengujian non-destruktif – Pengujian ultrasonik pada pelat baja karbon dan paduan rendah serta bagian universal; mencakup metode pengujian dan klasifikasi kualitas.
- AS 2083-2005, REC:2017: Blok kalibrasi dan metode penggunaannya dalam pengujian ultrasonik

4.10 Video Demo Pengujian Ultrasonik

Untuk lebih memahami prosedur pengujian ultrasonik, peralatan yang digunakan, serta cara membaca indikasi hasilnya, pembaca dapat menonton video demo yang tersedia secara daring. Video ini memperlihatkan langkah-langkah pengujian ultrasonik secara nyata, mulai dari persiapan benda uji, penggunaan transduser, hingga interpretasi data. Link video demo pada tautan berikut:

- <https://www.youtube.com/watch?v=UM6XKvXWVFA>
- <https://www.youtube.com/watch?v=RmtHmtOozic>

- <https://www.youtube.com/watch?v=1fwkDgtryA4&list=PL5EkKh2ndqm1LGHmS6ItL1aKsN6XOnbIb>

4.11 Latihan Soal

Metode ultrasonik (Ultrasonic Testing/UT) adalah teknik pengujian tidak merusak yang menggunakan gelombang suara frekuensi tinggi untuk mendeteksi cacat internal pada material, seperti retak, porositas, atau inklusi. Latihan soal berikut dirancang untuk menguji pemahaman Anda tentang prinsip kerja, jenis metode, aplikasi, dan faktor yang memengaruhi efektivitas UT. Pilih jawaban yang paling tepat untuk setiap pertanyaan.

- Apa prinsip kerja utama metode ultrasonik dalam mendeteksi cacat pada material?
 - Mengukur suhu material secara akurat
 - Memantulkan gelombang ultrasonik dari permukaan atau cacat internal
 - Mendeteksi perubahan warna permukaan material
 - Mengukur komposisi kimia material
- Manakah dari berikut ini yang termasuk metode ultrasonik:
 - Pulse-echo
 - Dye penetrant
 - Magnetic particle
 - Visual inspection
- Dalam UT, alat yang mengubah energi listrik menjadi gelombang ultrasonik disebut:
 - Receiver
 - Transducer (Transducer)
 - Amplifier
 - Oscilloscope

- Penggunaan UT untuk memeriksa sambungan las baja karbon biasanya merujuk pada standar internasional:
 - ASTM E 165
 - ASME Section V
 - ISO 9001
 - ISO 14001
- Seorang teknisi UT tidak menggunakan *couplant* saat memeriksa pelat logam. Akibatnya:
 - Hasil pengukuran tetap akurat
 - Gelombang ultrasonik tidak masuk ke material dengan baik, cacat mungkin terlewat
 - Material akan mengalami korosi
 - Alat UT akan rusak

Daftar Pustaka

- Ala Hijazi, 2024, "Introduction to Non-Destructive Testing Techniques: Ultrasonic",
<https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>
- BS EN ISO 17640 (STANDAR INGGRIS DAN ISO).
<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/50438/985ad2a40a3a494985e3796562dc003b/ISO-17640-2010.pdf>)
- Inspeksi, 2024, "Ultrasonic Testing: Pengertian, Prinsip Kerja, Dan Aplikasinya",
<https://www.inspeksi.co.id/ultrasonic-testing-pengertian-prinsip-kerja-dan-aplikasinya/> , diunduh 1 maret 2024.
- AME, 2022, Panduan Komprehensif pengujian Ultrasonik,
<https://www.asseteng.com.au/blog/ultrasonic-testing-ut/>
 diunduh 1 maret 2024

Wikipedia., 2024, Generator Sapu, https://en.wikipedia.org/wiki/Sweep_generator diunduh 1 maret 2024.

Contributed Content, 2023, Understanding Ultrasonic Examination in the Power.” Power, May 1 2023, Industry<https://www.powermag.com/understanding-ultrasonic-examination-in-the-power-industry/> diunduh 1 maret 2024

GIT, 2023, Apa itu ultrasonic testing (NDT), <https://giteknindo.id/ultrasonic-testing-ndt/>) diunduh 1 maret 2024

Geochem Survey,” untuk menguji ketebalan bahan, korosi hingga kecacatan pada suatu benda,” <https://geochemsurvey.com/ultrasonic-testing-ut/#> diunduh 5 maret 2024

Carakami, 2024, “Piezoelektrik Adalah: Pengertian, Sejarah, Prinsip Kerja dan Kegunaan”, <https://carakami.com/piezoelektrik-adalah-pengertian-sejarah-prinsip-kerja-dan-kegunaan/> diunduh 6 maret 2024

TECS, <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/ultrasonic-testing-ut/>

By Rebecca Chandler - 10 March, 2020, “What Are the Different Types of Ultrasonic Transducers?”, <https://www.olympus-ims.com/en/insight/what-are-the-different-types-of-ultrasonic-transducers/> <https://eis.hu.edu.jo/ACUuploads/10526/Ultrasonic%20Testing.pdf>

inspeksi, 2024, “Ultrasonic Testing: Pengertian, Prinsip Kerja, Dan Aplikasinya, <https://www.inspeksi.co.id/ultrasonic-testing-pengertian-prinsip-kerja-dan-aplikasinya/>) diunduh 1 maret 2024.

Tom Nelligan, Olympus Industrial Resources An Introduction to Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing <https://www.olympus-ims.com/en/resources/white-papers/intro-ultrasonic-transducers-ndt-testing/> diunduh 22 maret 2024

Block Standart <https://www.ndt-service.no/kalibreringsblokker>

Shahab Torkamani, Samit Roy, Mark E. Barkey, Edward Sazonov, Susan Burkett, Sushma Kotru, 2014, “A Novel Damage Index For Damage Identification Using Guided Waves With Application In Laminated Composites”, August 2014, Smart Materials and Structures 23(9):095015. DOI: 10.1088/0964-1726/23/9/095015.

Prof. Lawrence W. Braile , 2006, Seismic Waves And The Slinky, The IRIS Consortium, Purdue University , <https://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/slinky/slinky4.htm>, 13 Januari 2026, jam 15.00 wib

Zengrayquality,” Phased Array Services: How Phased Array Works”. ,<https://zengaryquality.com/materials-engineering/phased-array-ultrasonic-testing-paut/> diunduh 1 Januari 2026

Fernando Brandao, “TOFD – Time of Flight Diffraction”, Posted December 16, 2021, Updated December 16, 2021, <https://pragmandt.com/blog-and-knowledge-base/tofd-time-of-flight-diffraction/> diunduh 16 Janurai 2026.

M. Aghaie-KhafriM. Aghaie-KhafriFarhang HonarvarFarhang HonarvarSteven ZanganehSteven Zanganeh, Characterization of Grain Size and Yield Strength in AISI 301 Stainless Steel Using Ultrasonic Attenuation Measurements, September 2012, Journal of Nondestructive Evaluation 31(3), DOI: 10.1007/s10921-012-0134-z

J Prasad and CG K Nair, 2008. "Non-Destructive Test and Evaluation Of Materials", Tata Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi, 2008. ISBN (13): 978-0-07-062084-1. ISBN (10) : 0-07-062084-9

BAB 5

Metode *Magnetic Particle*

5.1 Pengertian Umum

Magnetic Particle Testing (MT) merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak (*non-destructive testing*) yang digunakan untuk mendeteksi cacat pada permukaan (*surface*) maupun di dekat permukaan (*sub-surface*) material ferromagnetik. Metode ini memanfaatkan partikel halus yang bersifat magnetik untuk mengungkap dan menandai keberadaan diskontinuitas pada material yang diuji.

5.2 Teori Pendukung

5.2.1 Bahan Magnet

Bahan ferromagnetik memiliki sifat magnetik yang kuat dan dapat dikendalikan oleh medan magnet. Contoh bahan ferromagnetik antara lain baja (*steel*), besi (*iron*), nikel, dan kobalt. Metode *magnetic particle testing* sangat efektif digunakan untuk mendeteksi cacat pada material ferromagnetik.

Bahan paramagnetik, seperti aluminium, memiliki sifat magnetik yang sangat lemah sehingga tidak memberikan respons yang cukup terhadap medan magnet. Oleh karena itu, metode *magnetic particle* tidak dapat diaplikasikan untuk mendeteksi cacat pada bahan paramagnetik.

Bahan diamagnetik, seperti tembaga, memiliki sifat menolak medan magnet dan tidak dapat dikendalikan oleh medan magnet eksternal. Karena sifat magnetiknya sangat lemah, material diamagnetik juga tidak dapat diuji

menggunakan metode magnetic particle (Anne Helmenstine, 2022).

5.2.2 Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan jenis magnet yang memiliki medan magnet tetap atau permanen. Magnet ini tidak memerlukan sumber energi eksternal, seperti arus listrik pada elektromagnet, untuk menghasilkan medan magnet. Medan magnet pada magnet permanen muncul akibat sifat intrinsik material feromagnetik, di mana struktur atomnya mampu mempertahankan sifat kemagnetan setelah mengalami proses magnetisasi. Kekuatan medan magnet pada magnet permanen bersifat relatif tetap dan tidak dapat diubah selama magnet tersebut tidak mengalami proses demagnetisasi atau pengaruh eksternal yang signifikan.

5.2.3. Elektromagnet

Elektromagnet merupakan jenis magnet yang medan magnetnya dihasilkan oleh aliran arus listrik yang melalui lilitan kawat. Pada elektromagnet, keberadaan medan magnet dapat dikendalikan dengan menghidupkan atau mematikan arus listrik. Medan magnet hanya terbentuk selama arus listrik mengalir dan akan menghilang ketika arus listrik dihentikan. Besarnya kekuatan medan magnet pada elektromagnet dapat diatur dengan mengubah besar arus listrik yang mengalir atau dengan menambah dan mengurangi jumlah lilitan kawat.

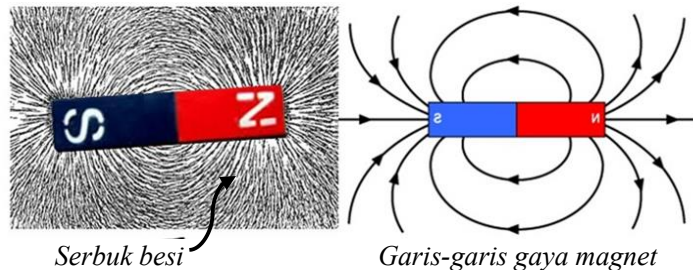
5.2.4 Magnetisasi Bahan

Magnetisasi merupakan proses di mana suatu bahan menjadi magnet permanen atau magnet sementara ketika dikenai medan magnet. Dalam proses ini, bahan mengalami perubahan sifat sehingga menunjukkan perilaku magnetik akibat pengaruh medan magnet eksternal.

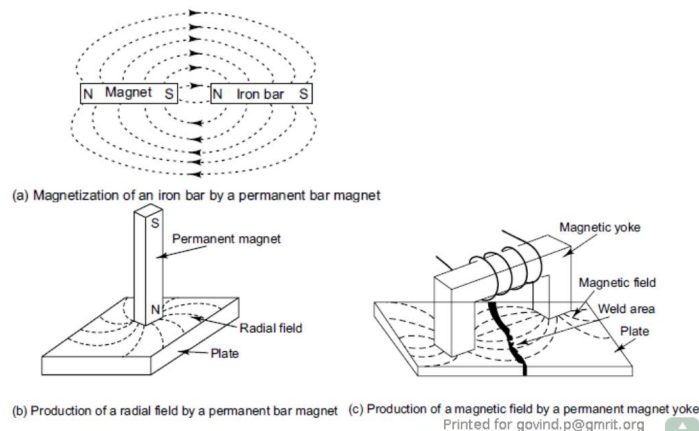
Medan magnet dapat diamati secara visual dengan menggunakan serbuk besi. Pola jejak serbuk besi yang terbentuk dikenal sebagai garis-garis gaya magnet (Gambar 5.1). Garis-garis gaya magnet merupakan representasi grafis yang digunakan untuk menggambarkan arah dan kekuatan medan magnet di sekitar magnet atau penghantar yang dialiri arus listrik. Kerapatan dan arah garis-garis ini menunjukkan distribusi serta intensitas medan magnet pada setiap titik di ruang sekitarnya.

Garis-garis gaya magnet memiliki beberapa ciri utama yang penting untuk dipahami dalam kajian kemagnetan. Pertama, garis-garis gaya magnet selalu keluar dari kutub utara magnet dan masuk ke kutub selatan magnet, sehingga membentuk lintasan tertutup. Kedua, garis-garis gaya magnet tidak pernah saling berpotongan satu sama lain. Ketiga, kerapatan garis-garis gaya magnet menunjukkan kuat atau lemahnya medan magnet; semakin rapat garis-garis tersebut, semakin kuat medan magnet pada daerah tersebut, dan sebaliknya. Keempat, arah garis gaya magnet pada suatu titik menunjukkan arah gaya magnet yang bekerja pada kutub utara magnet uji yang diletakkan di titik tersebut.

Pola garis-garis gaya magnet di dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen dan elektromagnet ditunjukkan pada Gambar 5.2



Gambar 5.1 Medan magnet dan Garis gaya magnet [Silabus.com]



Gambar 5.2 Garis-garis gaya medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen dan elektromagnet (Access Engineering, 2024).

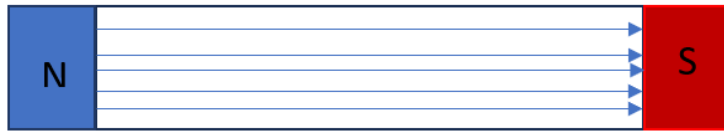
Pemahaman mengenai garis-garis gaya magnet sangat penting dalam proses magnetisasi pada Magnetic Particle Testing (MT). Pada pengujian MT, material ferromagnetik dimagnetisasi sehingga garis-garis gaya magnet mengalir di dalam material. Apabila material berada dalam kondisi utuh

tanpa cacat, garis-garis gaya magnet akan mengalir secara kontinu dan merata di dalam material. Namun, apabila terdapat diskontinuitas seperti retak atau pori yang berada di permukaan maupun dekat permukaan, maka aliran garis-garis gaya magnet akan terganggu.

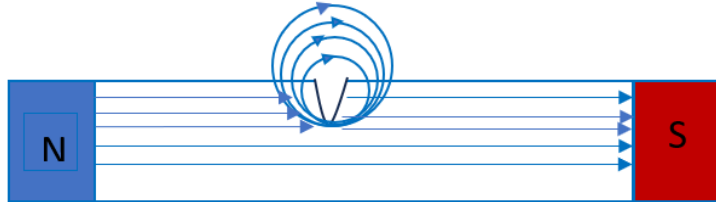
Gangguan aliran medan magnet tersebut menyebabkan terjadinya kebocoran fluks magnet (*magnetic flux leakage*) di sekitar lokasi cacat. Kebocoran fluks inilah yang menarik partikel magnetik halus yang diaplikasikan pada permukaan benda uji, sehingga partikel-partikel tersebut berkumpul dan membentuk indikasi visual yang menunjukkan lokasi, bentuk, dan arah cacat. Oleh karena itu, keberhasilan pengujian Magnetic Particle sangat bergantung pada proses magnetisasi yang tepat serta pemahaman terhadap perilaku garis-garis gaya magnet di dalam material ferromagnetik.

5.3 Prinsip Kerja

Magnetisasi merupakan proses ketika suatu objek ferromagnetik ditempatkan di dalam medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen atau elektromagnet. Pada kondisi ini, fluks atau aliran medan magnet akan merambat melalui objek tersebut. Garis-garis gaya magnet keluar dari kutub utara (*north pole*), melewati material, dan masuk kembali ke kutub selatan (*south pole*), sehingga membentuk suatu lintasan tertutup atau sirkuit magnetik (Gambar 5.3a). Namun, apabila pada permukaan (*surface*) atau dekat permukaan objek terdapat cacat, retak, atau diskontinuitas, maka aliran garis-garis gaya magnet akan terganggu. Garis-garis gaya magnet akan dibelokkan dan sebagian keluar dari permukaan material, melintasi daerah cacat, kemudian masuk kembali ke dalam material. Fenomena ini dikenal sebagai kebocoran medan magnet (*magnetic flux leakage*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.3b.



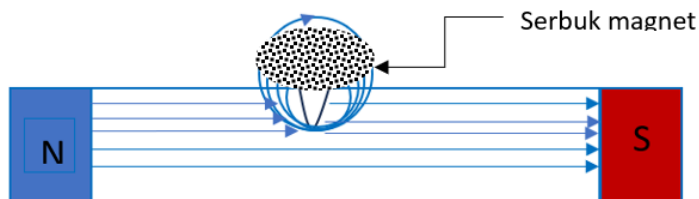
(a) *Garis gaya magnet pada objek tanpa cacat*



(b) *Garis Gaya magnet (medan magnet) “dibelokkan” oleh cacat permukaan objek*

Gambar 5.3. Garis gaya magnet pada objek

Partikel atau serbuk magnet. Setelah objek feromagnetik dimagnetisasi, partikel atau serbuk magnet, misalnya serbuk besi, diaplikasikan atau ditaburkan di atas permukaan benda uji. Partikel magnet tersebut memiliki sifat feromagnetik sehingga akan merespons medan magnet yang terbentuk pada objek. Partikel magnet akan tertarik dan terkumpul pada area yang mengalami kebocoran garis-garis gaya magnet (*magnetic flux leakage*). Akumulasi partikel magnet ini membentuk indikasi visual yang menunjukkan lokasi, bentuk, dan orientasi cacat atau diskontinuitas pada permukaan maupun dekat permukaan benda uji, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.4



Gambar 5.4 Serbuk magnet terkumpul pada area dimana medan magnet “dibelokkan” oleh cacat permukaan objek

Pengamatan. Partikel atau serbuk magnet, seperti serbuk besi, yang terkumpul di sekitar cacat permukaan akan membentuk pola indikasi yang dapat diamati secara kasat mata. Pola ini menjadi petunjuk adanya retak, porositas, atau jenis cacat permukaan dan dekat permukaan lainnya pada benda uji.

Pembersihan. Setelah proses inspeksi selesai, dilakukan tahap pembersihan. Pembersihan meliputi penghilangan serbuk magnet dari permukaan benda uji serta proses demagnetisasi untuk menghilangkan sisa medan magnet, sehingga benda uji kembali ke kondisi awal dan tidak memiliki sifat kemagnetan residual.

5.4 Prosedur Kerja Pengujian *Magnetic Particle*

Pengujian *Magnetic Particle Testing* (MT) dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis untuk memastikan hasil inspeksi yang akurat dan dapat diandalkan. Prosedur kerja dimulai dari persiapan benda uji, proses magnetisasi, aplikasi partikel magnet, pengamatan indikasi cacat, hingga tahap pembersihan dan demagnetisasi. Setiap tahapan harus dilakukan sesuai dengan standar yang berlaku agar indikasi yang muncul benar-benar merepresentasikan kondisi aktual material yang diuji .

Prosedur pengujian *Magnetic Particle Testing* (MT) mengacu pada standar internasional ASTM E709, ASTM E1444, dan ISO 9934 yang mengatur persyaratan teknis, metode pelaksanaan, serta evaluasi hasil pengujian.

1. Persiapan Benda Uji

Benda uji harus dibersihkan terlebih dahulu dari kotoran, minyak, lemak, cat, kerak, atau material lain yang dapat mengganggu proses magnetisasi dan pergerakan partikel magnet. Permukaan yang akan diuji

harus cukup halus agar indikasi cacat dapat terlihat dengan jelas, (ASTM E709 dan ISO 9934).

2. Pemilihan Metode Magnetisasi

Metode magnetisasi dipilih berdasarkan bentuk, ukuran, dan orientasi cacat yang ingin dideteksi. Magnetisasi dapat dilakukan menggunakan magnet permanen atau elektromagnet dengan metode:

- Magnetisasi langsung (*direct magnetization*). Arus listrik dialirkan langsung melalui benda uji sehingga medan magnet terbentuk di dalam material tersebut
- Magnetisasi tidak langsung (*indirect magnetization*). medan magnet dihasilkan tanpa mengalirkan arus listrik langsung melalui benda uji, melainkan melalui alat bantu seperti kumparan atau yoke magnetik.

Arah medan magnet harus tegak lurus terhadap arah kemungkinan cacat untuk menghasilkan kebocoran medan magnet yang optimal (ASTM E1444).

3. Proses Magnetisasi

Benda uji dimagnetisasi dengan menerapkan medan magnet menggunakan peralatan yang sesuai. Besarnya arus listrik atau kekuatan magnet harus cukup untuk menghasilkan medan magnet yang memadai tanpa menyebabkan *over-magnetization*. Standar ASTM E1444 dan ISO 9934 menekankan pentingnya kontrol intensitas medan magnet selama pengujian.

4. Aplikasi Partikel Magnet

Partikel magnet diaplikasikan ke permukaan benda uji baik dalam kondisi:

- Kering (*dry magnetic particles*), atau

- Basah (*wet magnetic particles*)

Partikel magnet dapat berupa partikel tampak (*visible*) atau fluoresen. Aplikasi partikel dilakukan selama atau segera setelah proses magnetisasi agar partikel dapat tertarik ke area kebocoran medan magnet akibat adanya diskontinuitas.

5. Pengamatan dan Interpretasi Indikasi

Permukaan benda uji diamati secara visual. Untuk partikel tampak, pengamatan dilakukan dengan pencahayaan yang memadai. Untuk partikel fluoresen, pengamatan dilakukan di ruang gelap dengan menggunakan sinar ultraviolet (UV-A). Akumulasi partikel magnet yang membentuk pola tertentu menunjukkan adanya diskontinuitas pada material. Evaluasi indikasi dilakukan berdasarkan kriteria penerimaan yang mengacu pada standar yang digunakan (ASTM E709, ASTM E1444, atau ISO 9934).

6. Evaluasi dan Pencatatan Hasil

Indikasi yang teramati dievaluasi untuk menentukan jenis, ukuran, dan orientasi cacat. Hasil pengujian dicatat secara sistematis. Pencatatan hasil ini penting sebagai dokumentasi teknis dan bukti kualitas pengujian.

7. Demagnetisasi

Setelah pengujian selesai, benda uji harus didemagnetisasi untuk menghilangkan sisa magnetisme yang dapat memengaruhi fungsi atau proses lanjutan. Proses demagnetisasi dilakukan sesuai prosedur yang direkomendasikan dalam ASTM E1444 dan ISO 9934.

8. Pembersihan Akhir

Tahap terakhir adalah pembersihan benda uji dari sisa partikel magnet dan media pengujian lainnya. Benda uji kemudian dikembalikan ke kondisi awal dan siap untuk digunakan atau diproses lebih lanjut.

Berikut beberapa metode magnetik partikel testing (MT) yang umum digunakan:

- **Metode Basah (*Wet Method*):** Metode ini menggunakan serbuk magnetik berukuran sekitar 10–50 μm . Serbuk magnetik tersebut terlebih dahulu dicampur dengan media cair, seperti air atau minyak, sehingga membentuk suspensi, kemudian diaplikasikan dengan cara disemprotkan ke permukaan benda uji yang telah mengalami proses magnetisasi. Metode ini sangat efektif untuk mendeteksi cacat permukaan maupun cacat dekat permukaan, khususnya pada permukaan yang luas, karena distribusi partikel magnetik dapat berlangsung secara merata (lihat Gambar 5.6).



Gambar 5.6. Hasil penyemprotan wet magnetic particle keatas permukaan lasan. Terlihat adanya garis retak dengan panjang sekitar 2 cm. (Anmol birring, 2013)

- **Metode Kering (*Dry Method*):** etode ini menggunakan serbuk magnetik kering yang terbuat dari bahan feromagnetik. Selama proses magnetisasi, serbuk magnetik kering ditaburkan secara merata di atas permukaan benda uji. Selanjutnya, serbuk magnetik tersebut ditiupkan atau disemprotkan secara perlahan menggunakan alat penyemprot agar partikel dapat bergerak bebas mengikuti garis gaya magnet. Terbentuknya tumpukan atau akumulasi serbuk magnetik pada area tertentu mengindikasikan adanya retak atau diskontinuitas pada material (Gambar 5.7). Partikel magnetik kering umumnya berwarna abu-abu, hitam, atau merah. Metode serbuk kering ini lebih sesuai digunakan pada kondisi lingkungan kering atau tidak lembap.



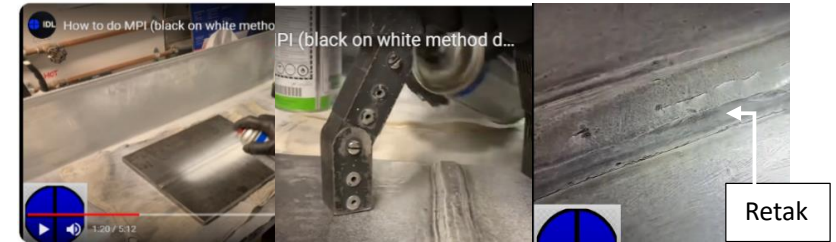
Gambar 5.7. Penumpukan partikel magnetik kering yang mengindikasikan adanya retak atau diskontinuitas pada permukaan benda uji. (Anmol birring, 2013)

- **Metode Fluoresen (Fluorescent Method):** Metode ini menggunakan serbuk magnetik yang mengandung bahan fluoresen. Adanya cacat, retak, atau diskontinuitas pada permukaan benda uji dapat diamati secara jelas ketika pengujian dilakukan di bawah cahaya ultraviolet (UV), karena partikel magnetik fluoresen akan memancarkan cahaya pada area terjadinya kebocoran fluks magnet



Gambar 5.8 Aplikasi Fluorescent Method. (Raymond Joubert, 2022,

- **Metode Kontras (Contrast Method):** Penggunaan serbuk magnetik dengan warna yang berbeda bertujuan untuk meningkatkan kontras antara indikasi cacat dan permukaan material, sehingga cacat lebih mudah diamati secara visual.



(a) (b) (c)

Gambar 5.9 Penyemprotan cat putih (a), aplikasi serbuk magnetik (b), dan indikasi retak (c). (IDL Inspection Ltd., 27 Januari 2021)

5.5 Peralatan Yang Digunakan

Pada pengujian magnetic particle testing (MPT), beberapa peralatan utama yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Sumber Magnet, berupa mesin uji magnetic partikel, magnet permanen atau electromagnet (yoke) (Gambar 5.10).



Gambar 5.10. Yoke memakai magnet permanen (a). electromagnet Yoke (b). (matco.com; magnaflux.com).

Magnet permanen umumnya digunakan di lapangan, terutama pada kondisi yang memiliki keterbatasan penggunaan elektromagnet atau sumber listrik.

Sementara itu, magnet yang berasal dari elektromagnet lebih sering digunakan di laboratorium, sekolah, maupun lingkungan pabrik, karena mampu menghasilkan medan magnet yang lebih terkontrol. Meskipun demikian, elektromagnet juga dapat digunakan di lapangan apabila tersedia sumber listrik yang memadai.

- **Serbuk Magnetik**, baik yang Fluorescent atau Non-Fluorescent: Partikel magnetik merupakan partikel halus yang terbuat dari bahan feromagnetik, yang dapat berupa serbuk kering atau serbuk yang dicampur dengan media cair sebagai pengikat. Partikel magnetik fluoresen akan memancarkan cahaya ketika diamati di bawah cahaya ultraviolet (UV), sehingga memudahkan identifikasi cacat atau diskontinuitas pada permukaan benda uji.



Gambar 5.11 Dry Magnetic Particle (Iowa state University)

- Lampu ultraviolet (UV), diperlukan apabila pengujian menggunakan serbuk magnetik fluoresen, karena partikel fluoresen akan memancarkan cahaya di bawah penyinaran UV sehingga retak, cacat, atau diskontinuitas dapat terdeteksi dengan lebih jelas.



Gmabar 5.12 Magnetic particle inspection fluorescent lamp. (vi.aliexpress.com)

- Perangkat pembersih, digunakan untuk membersihkan permukaan material sebelum dan setelah pengujian..
- Demagnetisasi, proses penghilangan sisa medan magnet pada material dengan menggunakan medan magnet bolak-balik (AC).



Gambar 5.13. Tunnel Type Demagnetizers. (Indiamart.com)

- Perlengkapan Keselamatan Kerja, seperti sarung tangan, kaca mata pelindung, dan masker.

5.6 Tempat dan Alat Bantu

Tempat pelaksanaan *magnetic particle testing* (MPT) harus memiliki sistem ventilasi dan sirkulasi udara yang baik untuk mencegah gangguan pernapasan akibat partikel atau uap bahan pendukung pengujian. Selain itu, pencahayaan di area pengujian harus memadai agar interpretasi hasil pengujian dapat dilakukan secara akurat. Intensitas pencahayaan yang disyaratkan adalah lebih dari 1000 lux, yang diukur menggunakan lux meter (Gambar 5.14a).

Penggunaan lampu ultraviolet (UV) diperlukan apabila pengujian menggunakan partikel magnetik fluoresen. Dalam kondisi ini, lokasi pengujian harus berupa ruangan gelap agar indikasi fluoresen dapat terlihat dengan jelas.

Yoke magnetik (Gambar 5.14b) sebagai alat utama dalam pengujian MPT harus memenuhi ketentuan standar yang berlaku. Yoke dinyatakan layak digunakan apabila mampu mengangkat beban 4,5 kg ASTM Test Block (MPT) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.14c.

Selain itu, digunakan *Burmah-Castrol Strips* atau *NDT Castrol Strips – Field Flux Strips*, yaitu potongan bahan feromagnetik dengan permeabilitas tinggi dan variasi lebar celah (slot) (Gambar 5.15d). Pada tahap awal pengujian, strip ini diletakkan di atas permukaan benda uji, kemudian diberikan medan magnet menggunakan yoke dan selanjutnya diaplikasikan partikel magnetik (Gambar 5.14e). Inspeksi dilakukan terhadap indikasi yang muncul pada strip tersebut. Hasil pengujian awal menggunakan strip ini memberikan gambaran umum kepada inspektur mengenai kekuatan medan magnet di lokasi pengujian.

Adapun peralatan dan bahan yang digunakan untuk kalibrasi yoke meliputi: yoke magnetik, digital lux meter, ASTM Test Block 4,5 kg (MPT), NDT Castrol Strips – Field Flux Strips, serta magnetic particle inspection contrast white paint (Gambar 5.14). (QHSE Concepts, Welding & NDT, 2022).



(a). Digital Lux Meter, (indiamart.com)



(b). Yoke



(c). 4,5 kg ASTM Test block (MPT) (ndetech.org.in)



(d). NDT Castrol Strips - Field Flux Strips (ndtsupply.com)



(e). Magnetic particle inspection (MPI) white contrast paint (shopee.co.id)

Gambar 5.14 Alat bantu uji magnetic particle.

5.7 Kelebihan Dan Kekurangan Metode *Magnetic Particle*

Berikut adalah kelebihan dan kekurangan dari uji *magnetic particle testing* (MPT):

Kelebihan:

- Mampu mendeteksi cacat/retak permukaan berukuran sangat kecil.
- Objek yang diuji tidak mengalami kerusakan.
- Waktu yang diperlukan untuk proses pengujian relatif cepat.
- Cacat dapat terlihat dengan jelas sehingga memudahkan analisis.

Kekurangan:

- Metode magnetic particle hanya mampu diterapkan pada material ferromagnetic, tetapi tidak dapat diaplikasikan pada material non-ferromagnetik seperti aluminium.
- Proses pengujian selalu diawali dengan membersihkan permukaan objek yang diinspeksi atau uji dari kotoran. Kotoran atau minyak dapat mempengaruhi hasil pengujian.
- Kekuatan medan magnet yang digunakan harus akurat atau tepat, sehingga menghasilkan hasil yang baik.
- Metode magnetic particle hanya mampu mendeteksi cacat di permukaan atau dekat permukaan. Metode ini tidak efektif untuk menginspeksi cacat di dalam material.
- Metode ini dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan dimana objek berada.

5.8 Standar

Beberapa contoh standar yang digunakan dalam pengujian magnetic particle testing (MPT) antara lain sebagai berikut (Frontline Testing and Inspection, 2016):

1. ASTM E1444/E1444M. Standard Practice for Magnetic Particle Testing. Mengatur prosedur umum pengujian, jenis partikel magnetik, teknik magnetisasi, evaluasi indikasi, serta persyaratan peralatan.
2. ASTM E709. *Guide for Magnetic Particle Testing* Memberikan panduan teknis mengenai prinsip dasar, pemilihan metode, interpretasi indikasi, dan praktik terbaik dalam MPT.
3. ISO 9934 Non-destructive testing — Magnetic particle testing
 - ISO 9934-1: Prinsip umum
 - ISO 9934-2: Media pendeteksi (partikel magnetik)
 - ISO 9934-3: Peralatan Standar internasional yang mengatur pelaksanaan MPT secara komprehensif.
4. ASME Section V, Article 7 *Magnetic Particle Examination*. Digunakan terutama pada industri pembangkit, migas, dan bejana tekan, sebagai acuan dalam inspeksi berbasis kode ASME.

5.9 Latihan soal

Latihan soal ini disusun untuk memperdalam pemahaman mengenai metode pengujian tidak merusak magnetik partikel.”

- a. Jelaskan prinsip kerja *Magnetic Particle Testing* dan bagaimana kebocoran fluks magnet dapat digunakan untuk mendeteksi cacat pada material.

- b. Mengapa metode *Magnetic Particle Testing* hanya dapat diterapkan pada material ferromagnetik? Jelaskan dengan mengaitkan sifat kemagnetan material.
- c. Jelaskan pengaruh arah medan magnet terhadap kemampuan deteksi cacat pada pengujian MPT. Mengapa cacat yang tegak lurus terhadap medan magnet lebih mudah terdeteksi?
- d. Uraikan perbedaan antara metode *wet magnetic particle* dan *dry magnetic particle* ditinjau dari media pembawa partikel, sensitivitas, serta aplikasi penggunaannya.
- e. Jelaskan perbedaan penggunaan arus bolak-balik (AC) dan arus searah (DC) dalam pengujian Magnetic Particle Testing, khususnya terhadap jenis dan kedalaman cacat yang dapat dideteksi

Daftar Pustaka

Anne Helmenstine, 2022, Paramagnetic vs Diamagnetic vs Ferromagnetic – Magnetism, This entry was posted on October 19, 2022 by (updated on February 11, 2024) https://sciencenotes.org/paramagnetic-vs-diamagnetic-vs-ferromagnetic-magnetism/#google_vignette diunduh 23 september 2024 jam 10.00 wib

Cerdika.com <https://cerdika.com/wp-content/uploads/2020/01/medan-magnet.jpg> diunduh 23 september 2024 jam 10.52

Medan Magnet, 29 June 2018 <https://www.silabus.web.id/medan-magnet>] diunduh 23 september 2024 jam 11.00 wib.

Access Engineering,2024, magnetic particle test, Ehttps://referenceglobe.com/kpsslp/support/upload_vid_eos/5_magnetic_particle_test_1585743560.pdf, diunduh 23 september 2024 jam 11.27 wib

Frontline, testing and inspection, 2016, Procedure for Magnetic Particle Testing : Document: QMS-P-007,

revision 0, August 08, 2016,”<https://www.frontlinetesting.com/wp-content/uploads/QMS-P-007-Procedure-for-Magnetic-Particle-Testing-revision-0.pdf> diunduh 26 september 2024, jam 8.23 wib.

Constructors, 2024, How To Perform Magnetic Particle Inspection? [PDF], <https://theconstructor.org/practical-guide/ndt/how-to-perform-mpi/43254/> diunduh 26 september 2024 jam 14.04 WIB)

Anmol birring, 2013, “Birring NDT Class 102, Magnetic Particle Testing # 3, Wet Visible Method, <https://www.youtube.com/watch?v=AEBOrri2cB0>, diunduh 30 september 2024 jam 7.10 WIB

Anmol birring, 2013, Birring NDT Class 102, Magnetic Particle Testing # 2, Dry Powder MT,, <https://www.youtube.com/watch?v=BmqkklAAA58>, diunduh 30 september 2024, jam 7.40 WIB

Raymond Joubert, 2022, Fluorescent Magnetic Particle Inspection, <https://www.youtube.com/watch?v=aSLBpnYGdKA>, diunduh 30 september 2024, jam 8.00 WIB),

IDL Inspection Ltd, Jan 27, 2021 How to do MPI (black on white method demonstrated by CGSB Level 3),<https://www.youtube.com/watch?v=Guh4Y44yyk4>. Diunduh 30 september 2024, jam 8.43 WIB

Matcon.com, <https://www.matcon.com/en/product/mat-1-permanent-yoke/>; diunduh 30 september 2024 jam 10.00 wib

Magnaflux.com. <https://magnaflux.com/NA/EN/Products/Magnetic-Particle-Inspection/NA/Y-1.htm>) diunduh 30 september 2024 jam 10.00 WIB

Iowa state University, Center for Nondestructive Evaluation, NDE-Ed org. “Dry Magnetic Particle,”<https://www.nde->

ed.org/NDETechniques/MagParticle/Equipment/Particl
es.xhtml diunduh 30 september jam 13.20 WIB

Indiamart.com,” Tunnel Type Demagnetizers”,
<https://www.indiamart.com/proddetail/tunnel-type-demagnetizer-7906306812.html?pos=4&pla=n> diunduh
30 september 2024, jam 13.49 WIB

Vi.aliexpress.com,”Magnetic particle inspection fluorescent
lamp”,
<https://vi.aliexpress.com/item/1005005936016012.html>
diunduh 30 september 2024 jam 14.00 WIB

QHSE Concepts, Welding & NDT, Jun 23, 2022, How to do
MPI Calibration. (Magnetic Particle Testing),
<https://www.youtube.com/watch?v=YyggpyLVmb0>
diunduh 30 september 2024, jam 17.20 WIB.

Shopee.co.id. Magnaflux-WCP2-white-contrast-paint,
<https://shopee.co.id/Magnaflux-WCP2-white-contrast-paint-i.27590657.7901072878> diunduh 30 september
2024 jam 20.30 WIB.

ndtsupply.com ,”NDT Castrol Strips - Field Flux Strips”,
<https://ndtsupply.com/ndt-castrol-strips-field-flux-strips.html> diunduh 30 september 2024 jam 20.31 WIB.

ndetech.org.in , “ ASTM Test block (MPT)”,
<https://www.ndetech.org.in/Magnetic-Particle-Test-Block> diunduh 30 september 2024 jam 20.32 WIB

indiamart.com ,”Digital Lux Meter”,
<https://www.indiamart.com/proddetail/digital-lux-meter-22977269230.html> diunduh 30 september 2024
jam 20.35 WIB

Kementerian Ketenagakerjaan R.I. Direktorat Jenderal
Pembinaan Pelatihan Dan Produktivitas Direktorat Bina
Standardisasi Kompetensi Dan Pelatihan Kerja 2018
Buku Informasi Melakukan Magnetic Particle Test (Mt)
C.24las01.035.1

ASTM International, ASTM E1444/E1444M-21 Standard
Practice for Magnetic Particle Testing for Aerospace,
West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

ISO, ISO 9934-1:2016 – Non-destructive testing — Magnetic
particle testing — Part 1: General principles, Geneva,
Switzerland: International Organization for
Standardization, 2016.

ISO, ISO 9934-2:2015 – Non-destructive testing — Magnetic
particle testing — Part 2: Detection media, Geneva,
Switzerland: International Organization for
Standardization, 2015.

ISO, ISO 9934-3:2015 – Non-destructive testing — Magnetic
particle testing — Part 3: Equipment, Geneva,
Switzerland: International Organization for
Standardization, 2015

<https://vi.aliexpress.com/item/1005005936016012.html>

BAB 6

Eddy Current

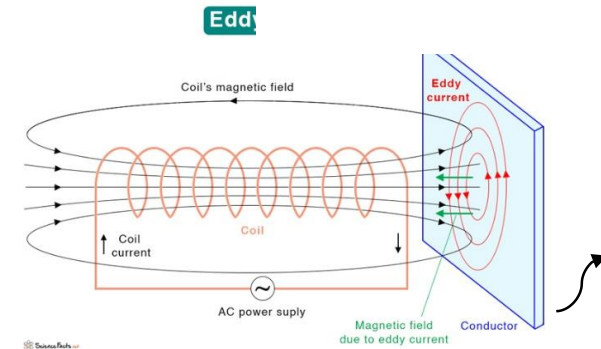
6.1 Pengertian Umum

Fenomena *eddy current* digunakan sebagai salah satu metode pengujian tidak merusak (NDT) yang bertujuan untuk mengidentifikasi keberadaan cacat, retak, serta diskontinuitas material berdasarkan perubahan karakteristik medan elektromagnetik pada material uji.

6.2 Teori Pendukung

6.2.1 Prinsip Eddy Current

Suatu plat konduktor yang terpapar medan magnet akan mengalami induksi elektromagnetik ketika terjadi perubahan medan magnet tersebut. Perubahan medan magnet ini menimbulkan arus listrik induksi yang mengalir membentuk lintasan tertutup atau *eddy current* di dalam material konduktor. Arah aliran arus eddy berada pada bidang yang tegak lurus terhadap arah medan magnet. Dalam aplikasinya, medan magnet dihasilkan oleh sebuah coil yang dialiri arus listrik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.1. Prinsip terjadinya arus eddy ini berkaitan erat dengan Hukum Faraday dan Hukum Lenz.



Gambar 6.2 Terbentuknya arus eddy pada plat konduktor akibat pengaruh medan magnet. Medan magnet dihasilkan oleh coil yang dialiri arus listrik bolak-balik (AC) (*sciencefacts.net*, 2024)

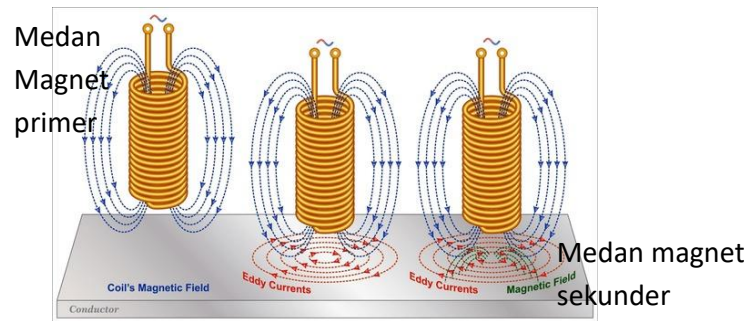
Ketika arus bolak-balik (AC) mengalir di dalam sebuah coil (kumparan), akan terbentuk medan magnet primer di sekitar coil tersebut. Karena arus yang mengalir bersifat bolak-balik, maka medan magnet primer yang dihasilkan juga mengalami perubahan terhadap waktu.

Apabila sebuah logam konduktor didekatkan ke coil tersebut, perubahan medan magnet primer akan menginduksi arus eddy (*eddy current*) di dalam logam konduktor. Arus eddy ini mengalir membentuk lintasan tertutup dengan arah yang berada pada bidang tegak lurus terhadap arah medan magnet primer.

Arus eddy yang terbentuk selanjutnya menghasilkan medan magnet sekunder. Sesuai dengan Hukum Lenz, arah medan magnet sekunder ini berlawanan dengan arah medan magnet primer (Gambar 6.3). Medan magnet sekunder kemudian berinteraksi dengan medan magnet primer sehingga mengubah medan magnet total serta besarnya arus yang mengalir pada coil.

Perubahan kondisi tersebut menyebabkan impedansi koil ikut berubah sebagai akibat dari pengaruh arus eddy. Selain itu, arus eddy yang mengalir di dalam material konduktor juga mengalami hambatan listrik (resistansi), sebagaimana arus listrik pada umumnya.

Impedansi merupakan ukuran total dari resistansi dan reaktansi dalam suatu rangkaian listrik. Besaran ini dinyatakan dalam satuan ohm (Ω) dan umumnya dilambangkan dengan huruf Z. Dalam aplikasi *Eddy Current Testing*, perubahan impedansi koil ditampilkan dan diamati melalui layar monitor atau alat ukur sebagai dasar evaluasi kondisi material.



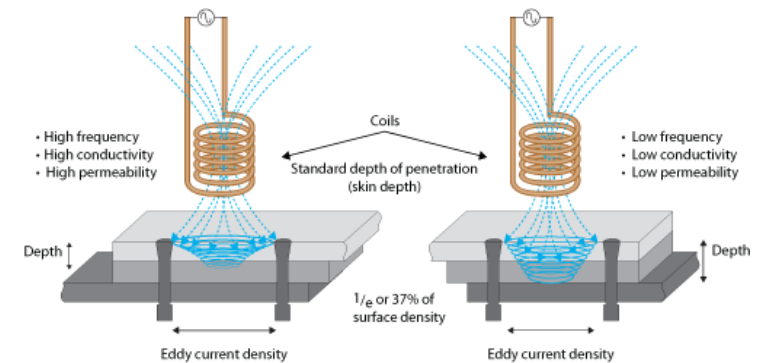
Gambar 6.3. Eddy Current Dan Medan Magnet Sekunder.
(Global intan teknindo, 2024)

6.2.2 Faktor Yang Mempengaruhi Arus Eddy.

Konduktivitas. Pada logam nonmagnetik, nilai konduktivitas listrik merupakan faktor utama yang memengaruhi besarnya arus eddy (*eddy current*). Material dengan konduktivitas tinggi akan menghasilkan arus eddy yang kuat, terutama di daerah permukaan material. Arus eddy yang kuat ini menimbulkan medan magnet sekunder yang besar pada permukaan, sehingga menghambat penetrasi medan magnet

primer ke dalam material. Akibatnya, kedalaman penetrasi arus eddy menjadi relatif dangkal.

Sebaliknya, pada material dengan konduktivitas listrik yang lebih rendah, arus eddy yang terbentuk relatif lebih kecil, sehingga medan magnet sekunder yang dihasilkan juga lebih lemah. Kondisi ini memungkinkan medan magnet primer menembus lebih dalam ke dalam material, sehingga kedalaman penetrasi arus eddy menjadi lebih besar. Fenomena perbedaan kedalaman penetrasi arus eddy pada material dengan konduktivitas tinggi dan rendah ditunjukkan pada Gambar 6.4

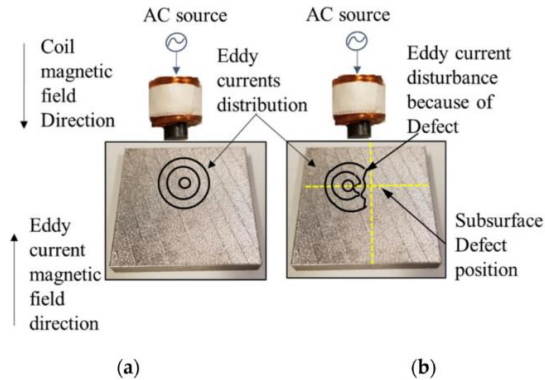


Gamba 6.4. Pengaruh Konduktivias, Frekwensi Dan Permeability Terhadap Kedalam Penetrasi Eddy Current.
(Evident, 2024)

Medan magnet primer merupakan faktor yang menentukan besarnya arus eddy yang terbentuk serta kedalaman penetrasi arus eddy ke dalam material uji.

Variasi geometri material, seperti bentuk dan ketebalan, turut memengaruhi distribusi arus eddy di dalam material.

Cacat, retak, dan diskontinuitas pada material akan memengaruhi distribusi arus eddy (*eddy current*), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.5.



Gambar 6.5 Gangguan Arus Eddy Akibat Cacat.
(Heba E. Farag Eet al, 2022)

6.2.3 Coupling

Coupling pada metode *eddy current* merujuk pada tingkat interaksi antara medan magnet yang dihasilkan oleh koil (kumparan) berarus listrik dengan material konduktif yang diuji. Coupling yang baik menunjukkan bahwa sebagian besar energi medan magnet dari koil dapat diinduksikan menjadi arus eddy yang mengalir di dalam material konduktor. Kondisi ini umumnya tercapai ketika koil berada sangat dekat dengan permukaan material, sehingga kehilangan energi medan magnet akibat jarak (*lift-off*) dapat diminimalkan.

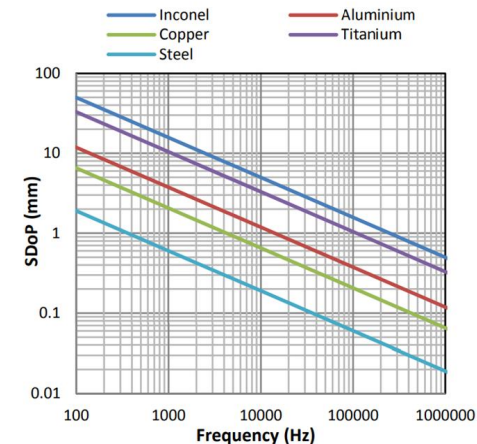
Lift-off merupakan efek yang ditimbulkan oleh jarak antara ujung koil (kumparan) dengan permukaan material uji. Peningkatan nilai *lift-off* umumnya menyebabkan berkurangnya arus eddy yang terbentuk di dalam material. Hal ini terjadi karena medan magnet yang dihasilkan oleh koil semakin melemah seiring bertambahnya jarak dari permukaan material,

sehingga efisiensi coupling antara koil dan material konduktif menurun.

Fill Factor merujuk pada perbandingan antara luas efektif area material yang dialiri arus eddy dengan luas total area koil (kumparan) yang digunakan.

Besarnya arus eddy yang terbentuk di dalam material meningkat seiring dengan bertambahnya frekuensi medan magnet penginduksi. Namun demikian, kedalaman penetrasi arus eddy akan semakin kecil apabila material memiliki konduktivitas listrik dan permeabilitas magnetik yang tinggi.

Kedalaman pada material di mana intensitas arus eddy menurun hingga 37% dari nilai intensitasnya di permukaan didefinisikan sebagai *Standard Depth of Penetration (SDoP)* atau kedalaman standar penetrasi. Hubungan antara SDoP dengan frekuensi arus AC serta sifat material ditunjukkan pada Gambar 6.6, dan memiliki keterkaitan dengan fenomena yang telah dijelaskan pada Gambar 6.4 sebelumnya.



Gambar 6.6 Standart Dept Of Penetration Of Various Frequencies In Various Materials (S.Majidnia, et al, 2016)

6.2.4 Diagram Impedansi

Diagram impedansi merupakan representasi grafis dari perubahan impedansi koil (kumparan) akibat interaksi antara medan magnet koil dan material uji. Diagram ini biasanya ditampilkan pada bidang kompleks dengan dua sumbu utama, yaitu resistansi dan reaktansi.

Komponen Diagram impedansi terdiri dari :

- Sumbu horizontal (X-axis) Menunjukkan resistansi (R), yang berkaitan dengan rugi-rugi energi akibat arus eddy di dalam material.
- Sumbu vertikal (Y-axis) Menunjukkan reaktansi (X), yang berhubungan dengan sifat induktif koil dan interaksi medan magnet.
- Impedansi total (Z) Merupakan kombinasi resistansi dan reaktansi, dinyatakan sebagai:

$$Z = R + jX \quad [6.1]$$

Dimana :

Z = impedansi koil (Ω)

R= resistansi koil (Ω), meningkat akibat arus eddy di material

X= reaktansi induktif koil (Ω), berubah karena medan magnet sekunder dari arus eddy

j= bilangan imajiner ($\sqrt{-1}$)

6.2.5 Lift Off Pada Diagram Impedansi (Impedansi Plane)

Perlu diingat bahwa *lift-off* merupakan jarak antara kumparan/koil dengan permukaan objek atau benda uji. Nilai *lift-off* yang besar akan melemahkan induksi arus eddy di dalam material, sehingga menyebabkan perubahan yang signifikan pada impedansi koil. Sebaliknya, *lift-off* yang kecil memungkinkan terbentuknya arus eddy yang lebih kuat,

sehingga energi medan magnet koil dapat ditransfer lebih efisien ke material.

Ringkasnya. *Lift-off* merupakan jarak koil terhadap permukaan material;

- Besar: arus eddy melemah $\rightarrow$ perubahan impedansi besar.
- Kecil: arus eddy kuat $\rightarrow$ transfer energi lebih efisien.

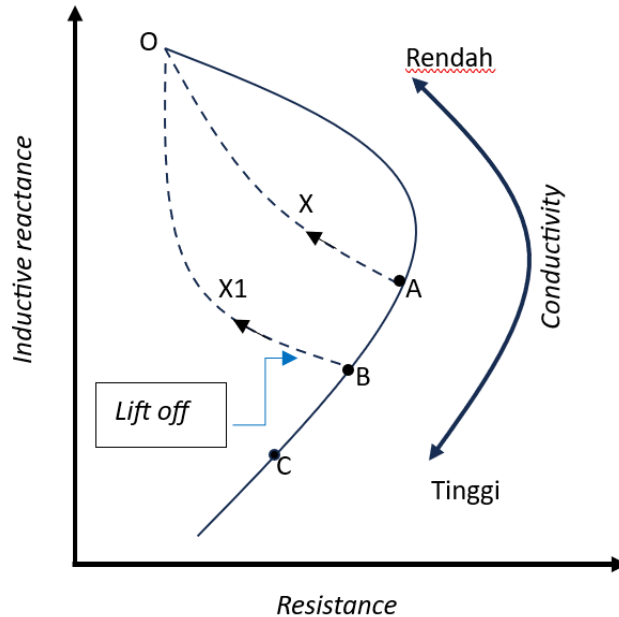
Pada Gambar 6.8, titik-titik A, B, dan C masing-masing mewakili material dengan konduktivitas berbeda, yaitu $\sigma_A < \sigma_B < \sigma_C$. Garis lurus yang menghubungkan titik A, B, C, dan D menggambarkan skala konduktivitas material yang diinspeksi.

Titik 0 menunjukkan nilai impedansi koil/kumparan saat berada di udara, tanpa interaksi dengan material uji. Titik O menunjukkan posisi koil/kumparan pada jarak terjauh dari permukaan objek/benda uji.

Lift-off untuk material A. Ketika koil mendekati permukaan material A, nilai impedansi koil (garis putus-putus) menurun hingga mencapai titik A, yang merepresentasikan nilai impedansi material A. Jika koil kemudian digerakkan menjauh dari permukaan material, terbentuk garis panah putus-putus AX0, yang menunjukkan *lift-off* material A. *Lift-off* ini mencerminkan perubahan impedansi akibat jarak antara koil dan permukaan material.

Lift-off untuk material B. Demikian pula, saat koil mendekati material B, nilai impedansi menurun hingga menyentuh titik B, yang merepresentasikan nilai impedansi material B. Gerakan koil menjauh dari permukaan membentuk garis panah putus-putus BX10, yang dikenal sebagai *lift-off* material B. *Lift-off* ini juga menunjukkan perubahan impedansi akibat jarak koil terhadap permukaan material B.

Prinsip yang sama berlaku untuk material C dan D, masing-masing menghasilkan *lift-off* yang sesuai dengan konduktivitas materialnya.



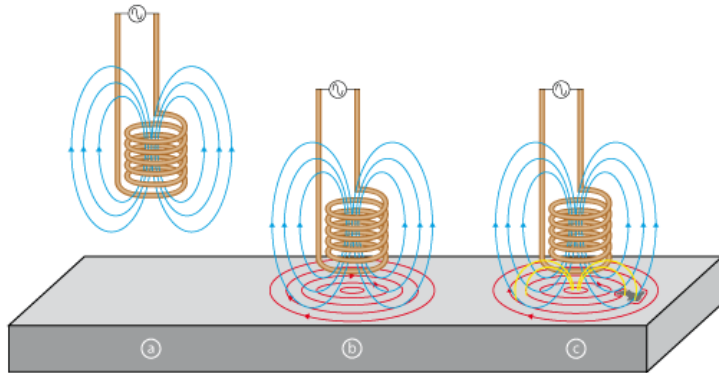
Gambar 6.8 *Lift-off* pada Beberapa Material dengan Konduktivitas Berbeda.

6.2.6 Efek Retak Pada Diagram Impedansi

Prinsip *Eddy Current* dan pengaruh cacat terhadap diagram impedansi diperlihatkan pada Gambar 6.9 dan Gambar 6.10. Kedua gambar ini menjelaskan bagaimana arus eddy terbentuk di dalam material konduktif serta bagaimana adanya cacat atau diskontinuitas memengaruhi distribusi arus eddy dan perubahan impedansi koil/kumparan yang digunakan dalam pengujian.

Pembentukan *Eddy Current*. Pada Gambar 6.9a, koil/kumparan berada di udara dengan jarak jauh dari permukaan objek. Arus listrik bolak-balik (AC) yang mengalir melalui koil membangkitkan medan magnet di sekitar koil (ditunjukkan dengan garis biru). Pada kondisi ini, belum terjadi induksi arus eddy karena koil belum berada dekat dengan material konduktif. Pada Gambar 6.9b, koil/kumparan diletakkan di atas permukaan objek yang tidak memiliki cacat atau retak. Konduktivitas material menyebabkan terbentuknya *eddy current* akibat induksi (garis merah) di dalam material. Arus eddy ini membentuk medan magnet sekunder yang berinteraksi dengan medan magnet koil, menghasilkan perubahan impedansi koil yang dapat diamati pada instrumen pengukur. Pada Gambar 6.9c, koil/kumparan berada di atas permukaan objek yang memiliki retak atau diskontinuitas. Adanya cacat mengganggu jalur aliran arus eddy, sehingga distribusi arus eddy menjadi tidak seragam. Gangguan ini menyebabkan perubahan impedansi yang berbeda dari kondisi normal, sehingga cacat dapat dideteksi.

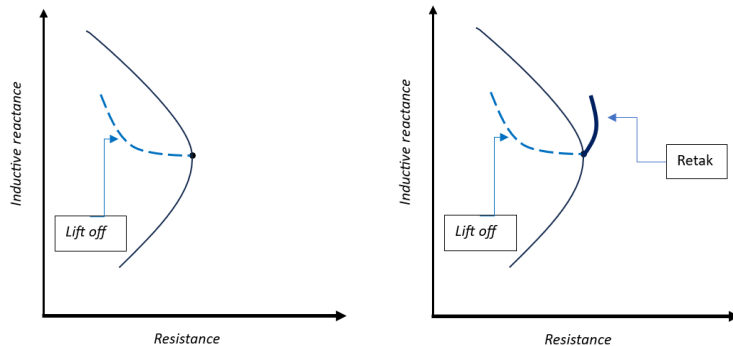
Diagram Impedansi dan *Lift-Off*. Gambar 6.10a memperlihatkan diagram impedansi ketika koil/kumparan bergerak dari udara mendekati permukaan objek tanpa cacat. Garis putus-putus pada diagram menunjukkan *lift-off*, yaitu perubahan impedansi akibat jarak antara koil dan permukaan objek. *Lift-off* ini merepresentasikan kondisi normal interaksi medan magnet koil dengan material konduktif. Gambar 6.10b memperlihatkan diagram impedansi untuk objek yang memiliki cacat, retak, atau diskontinuitas. Pada diagram terlihat garis impedansi yang berbeda dari *lift-off* normal. Perbedaan ini muncul karena cacat mengganggu aliran arus eddy di dalam objek, sehingga medan magnet sekunder yang terbentuk menimbulkan perubahan impedansi yang khas. Dengan demikian, diagram impedansi memungkinkan identifikasi cacat atau retak pada material uji



(sumber; Betsy Kenaston - 7 December, 2021)

(a) (b) (c)

Gambar 6.9 Lokasi koil/kumparan kaitannya dengan eddy current



(a) Objek tidak memiliki retak

(b) Objek memiliki retak

Gambar 6.10. ilustrasi diagram impedansi dalam kaitannya dengan adanya retak pada objek yang memiliki retak

6.3 Prinsip Kerja

Pengujian arus eddy menggunakan koil atau kumparan yang dikenal sebagai probe. Ketika arus listrik bolak-balik (AC) dialirkan ke probe, akan terbentuk medan magnet primer di sekitar kumparan. Saat probe diletakkan di atas permukaan objek uji yang bersifat konduktif, medan magnet primer menembus material dan menginduksi arus listrik lokal di dalam objek uji, yang dikenal sebagai arus eddy. Arus eddy ini kemudian menghasilkan medan magnet sekunder, dengan arah berlawanan terhadap medan magnet primer (hukum Lenz).

Medan magnet sekunder ini memengaruhi medan magnet primer yang berada di probe, sehingga menyebabkan perubahan impedansi koil. Keberadaan cacat, retak, atau diskontinuitas pada objek uji akan mengganggu aliran arus eddy dan membuat perubahan impedansi lebih nyata pada alat ukur atau layar monitor, memungkinkan deteksi cacat pada material (The Welding Institute, 2024).

6.4 Peralatan dan Prosedur Kerja Pengujian (Henry, 2021)

Pengujian *Eddy Current* memerlukan beberapa peralatan utama yang bekerja sama untuk mendeteksi cacat, retak, atau diskontinuitas pada material konduktif. Peralatan utama ditunjukkan pada Gambar 6.11, dan meliputi:

1. Probe (Koil/Kumparan)

- Probe merupakan kumparan yang dialiri arus bolak-balik (AC).
- Fungsinya untuk membangkitkan medan magnet primer di sekitar kumparan dan menginduksi arus eddy di dalam material uji.

- Jenis probe bervariasi, misalnya pancake coil, encircling coil, atau bobbin coil, tergantung bentuk dan lokasi objek uji.

2. Instrumen Pengukur Impedansi

- Digunakan untuk memonitor perubahan impedansi koil akibat arus eddy.
- Perubahan impedansi ini mencerminkan karakteristik material dan adanya cacat atau retak.
- Biasanya dilengkapi layar monitor atau tampilan digital untuk menampilkan sinyal dalam bentuk diagram impedansi atau nilai numerik.

3. Kabel dan Konektor

- Menghubungkan probe dengan instrumen pengukur.
- Kabel harus memiliki isolasi baik dan tidak menimbulkan interferensi yang dapat mempengaruhi pengukuran.

4. Perangkat Pendukung Lain

- Sistem holder atau fixture untuk menahan probe agar stabil selama pengujian.
- Beberapa sistem dilengkapi dengan robotik atau mekanik gerak untuk inspeksi otomatis.
- Perangkat kalibrasi untuk memeriksa sensitivitas alat sebelum pengujian objek uji.



Gambar 6.11 Peralatan Eddy Current Testing.
(<https://www.directindustry.com/>, 2021)

Pengujian keberadaan retak atau diskontinuitas pada sebuah objek, misalnya plat logam, menggunakan metode *Eddy Current Testing (ECT)* harus dilakukan secara cermat dan sistematis. Sebelum digunakan pada objek uji, peralatan *Eddy Current* wajib dikalibrasi untuk memastikan sensitivitas dan akurasi pengukuran. Tahapan pengujian pada blok standar sama dengan yang diterapkan pada objek yang akan diinspeksi, yaitu prosedur yang telah ditetapkan untuk mendeteksi cacat dengan akurat (OneStopNDT, 2023).

- Plat baja sebagai objek uji diletakkan pada meja inspeksi.
- Probe. Instruktur melakukan persiapan probe dalam kondisi prima. Probe merupakan kawat yang dililit sedemikian rupa sehingga membentuk koil/kumpran.
- *Production of a Magnetic Field*. Instruktur menyalakan listrik AC sehingga probe akan menghasilkan medan magnet primer.

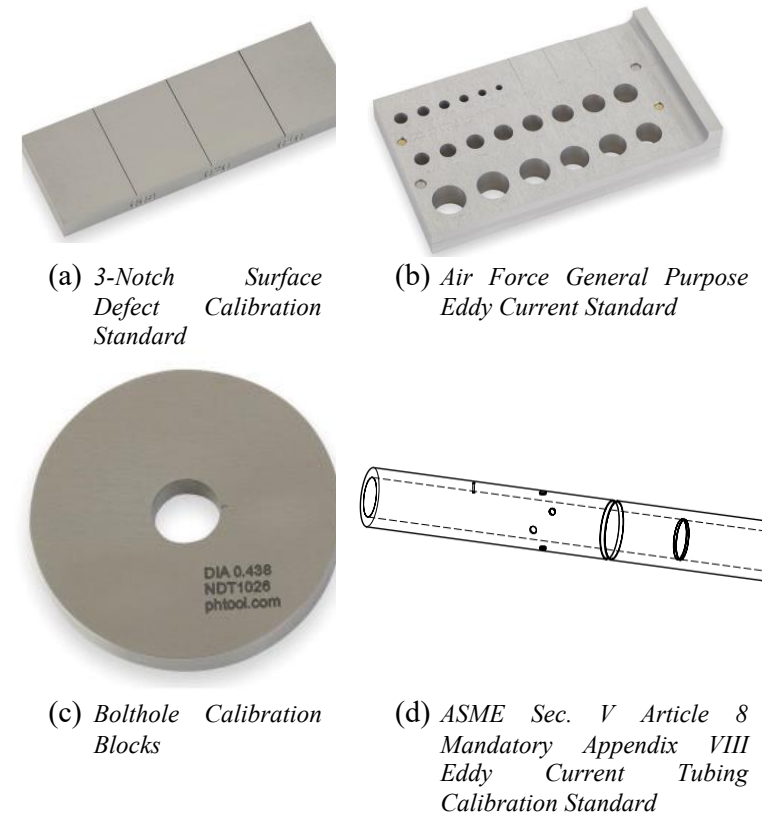
- *Generating Eddy Currents*: Instruktur mendekatkan dan menempelkan probe keatas permukaan objek. Medan magnet primer dari probe akan melalui material dan menghasilkan arus eddy dalam objek.
- *Data Collection*. Inspektur akan mengeser-geser probe. Bila ditemukan cacat/retak pada objek, arus eddynya akan berubah dan perubahan tersebut terlihat monitor (gambar 6.11). Inspektur lalu mengumpulkan data ini.
- *Analyze the Data*. Data data yang diperoleh selama pengujian dikumpulan dan dianalisa untuk menemukan kekurangan pada objek.

6.5. Eddy Current Calibration Standards

Kalibrasi peralatan *Eddy Current Testing (ECT)* sangat penting untuk menjamin keakuratan dan keandalan pengujian. Calibration blocks digunakan untuk mengkalibrasi probe sebelum digunakan pada objek uji.

Calibration block memiliki geometri dan cacat yang berbeda-beda untuk memastikan respons probe akurat pada berbagai kondisi pengujian. Salah satu jenis calibration block yang umum digunakan adalah “3-Notch Surface Defect Calibration Standard”, yang memiliki tiga takik permukaan dengan kedalaman masing-masing 0,008”, 0,020”, dan 0,040”.

Beberapa contoh calibration block ditunjukkan pada Gambar 6.12, yang mempermudah instruktur atau operator dalam melakukan kalibrasi dan verifikasi sensitivitas probe sebelum inspeksi objek uji.



Gambar 12. Eddy Current Calibration Standards
(PH tool eddy current, 2024)

6.6 Kelebihan Dan Kekurangan

Pengujian ECT digunakan untuk mendeteksi cacat atau retak pada permukaan (*surface*) maupun dekat permukaan (*sub-surface*) objek konduktif. Metode ini tidak dapat diterapkan pada material non-konduktor karena prinsipnya bergantung pada induksi arus listrik dalam material.

ECT juga memiliki keterbatasan dalam pengukuran ketebalan lapisan logam, sehingga tidak ideal untuk aplikasi tersebut. Efektivitas pendeteksian cacat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: kondisi permukaan objek, sifat material, kemampuan peralatan, frekuensi arus AC yang digunakan, serta kondisi lingkungan selama pengujian. Faktor-faktor ini harus diperhatikan untuk memastikan akurasi dan keandalan inspeksi.

6.7 Latihan Soal

Soal 1

Prinsip dasar *Eddy Current Testing (ECT)* adalah ...

- A. Pengukuran perubahan warna permukaan material akibat reaksi kimia
- B. Induksi arus listrik pusar (*eddy current*) pada material konduktif yang kemudian terganggu oleh adanya cacat
- C. Pengukuran gelombang ultrasonik yang dipantulkan oleh retakan
- D. Pengamatan visual terhadap perubahan bentuk material

Jawaban: B

Soal 2

Pengaruh sifat material seperti konduktivitas listrik dan permeabilitas magnetik terhadap hasil pengujian *eddy current* adalah ...

- A. Tidak memengaruhi hasil karena ECT hanya bergantung pada ukuran cacat
- B. Mempengaruhi distribusi arus eddy dan sensitivitas deteksi cacat
- C. Hanya memengaruhi warna permukaan material
- D. Hanya berpengaruh pada material non-konduktif

Jawaban: B

Soal 3

Jenis cacat yang paling efektif dideteksi menggunakan metode *eddy current* adalah ...

- A. Cacat internal yang sangat dalam pada material tebal
- B. Retakan permukaan dan dekat permukaan pada material konduktif
- C. Rongga besar di bagian tengah material non-logam
- D. Perubahan struktur mikro tanpa diskontinuitas

Jawaban: B

Soal 4

Pengaruh frekuensi arus terhadap kedalaman penetrasi (skin depth) dalam *Eddy Current Testing* adalah ...

- A. Semakin tinggi frekuensi, semakin dalam penetrasi arus
- B. Semakin rendah frekuensi, semakin dangkal penetrasi arus
- C. Semakin tinggi frekuensi, semakin dangkal penetrasi arus
- D. Frekuensi tidak memengaruhi kedalaman penetrasi

Jawaban: C

Soal 5

Salah satu aplikasi industri dari metode *Eddy Current Testing* adalah ...

- A. Inspeksi retakan pada permukaan pipa dan komponen pesawat
- B. Pengujian kekuatan tarik material secara destruktif
- C. Pengukuran komposisi kimia dengan pembakaran sampel
- D. Pengujian struktur internal beton menggunakan gelombang seismik

Jawaban: A

Daftar Pustaka

- sciencefacts.net, 2024, “eddy current”,
<https://www.sciencefacts.net/wp-content/uploads/2022/11/Eddy-Current.jpg>. Diunduh 3 oktober 2024 jam 14.30 WIB
- toppr.com ,2024, electromagnetic induction: eddy current “,
<https://www.toppr.com/guides/physics/electromagnetic-induction/eddy-currents/> diunduh 3 oktober 2024 jam 17.21 WIB.
- Evident, 2024 Eddy Current Array Tutorial; Depth of Penetration, <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/eca-tutorial/what-is-eca/depth/> diunduh 3 oktober 2024, jam 20.36 WIB
- Heba E. Farag,Ehsan Toyserkani Mir Behrad Khamesee ,” Non-Destructive Testing Using Eddy Current Sensors for Defect Detection in Additively Manufactured Titanium and Stainless-Steel Parts” Journals Sensors 2022, 22(14), 5440; <https://doi.org/10.3390/s22145440> https://www.mdpi.com/sensors/sensors-22-05440/article_deploy/html/images/sensors-22-05440-g001.png diunduh 3 oktober 2024 jam 21.00 WIB
- S.Majidnia , R.Nilavalan , J. Rudlin , , 2016, A Numerical Study of Depth of Penetration of Eddy Currents”. TWI Ltd, Cambridge ,United Kingdom, Brunel University, London ,United Kingdom, <https://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/12315/1/Fulltext.pdf> diunduh 4 oktober 2024 jam 03.37 WIB.
- Achmad Suseno Tony Prayuda dan Wing Hendropasetyo Akbar Putra , 2021, ” Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current terhadap Crack Toe pada Sambungan Tee Material Aluminium 5083 yang Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Kedalaman dan Panjang Crack, JURNAL TEKNIK ITS

Vol. 10, No. 2, (2021) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print)

- Betsy Kenaston - 7 December, 2021, Spark of Collaboration: High-Speed, Automated Conductivity Measurement Using Eddy Current—A Customer Story. “How Eddy Current Testing Devices Work”, Evident, <https://www.olympus-ims.com/en/insight/spark-of-collaboration-high-speed-automated-conductivity-measurement-using-eddy-currenta-customer-story/> diunduh 7 Oktober 2024, jam 17.46 WIB
- Henry Haidar Jati Andrian dan Wing Hendropasetyo Akbar Putra, Analisis Kemampuan Pendeteksian Pengujian Eddy Current terhadap Retak Memanjang Logam Las pada Sambungan Tee Joint Material Aluminium 5083 Dilapisi Non-Conductive Coating dengan Variasi Panjang dan Kedalaman Cacat”, JURNAL TEKNIK ITS Vol. 10, No. 1, (2021) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print), G29 – G36
<https://www.directindustry.com/prod/ether-nde/product-222676-2277477.html> diunduh 10 oktober 2024 jam 13.55 WIB.
- one stop ndt, Published on 09-Oct-2023, Eddy Current Testing - A Complete Guide, <https://www.onestopndt.com/ndt-articles/eddy-current-testing#eddy-current-testing-procedure>) diunduh 10 oktober 2024 jam 14.25 WIB
- The welding institute.com , 2024, Eddy Current Testing Process— A Definitive Guide:, <https://theweldinginstitute.com/Eddy-Current-Testing-Process-A-Definitive-Guide> diunduh 10 oktober 2024 jam 14 19 wib.
- PH tool eddy current, 2024,” Eddy Current Calibration Standards”, <https://www.ndt.com.au/wordpress/wp->

<content/uploads/2020/11/PH-Tools-Eddy-Current.pdf>
diunduh 11 oktober 2024, jam 10.03 WIB.

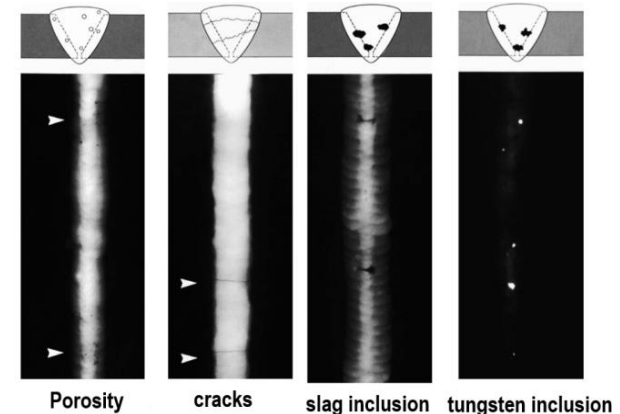
Global intan teknindo, 2024 :NDT Eddy Current Test: teknologi Canggih untuk deteksi Kerusakan Material”, 2024<https://giteknindo.id/ndt-eddy-current-test-teknologi-canggih-untuk-deteksi-kerusakan-material/> diunduh 7 Oktober 2024, jam 17.41 WIB)

BAB 7

Radiografi

7.1 Pengertian Umum

Radiografi merupakan salah satu metode pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing*) yang digunakan untuk mendeteksi cacat, retak, atau diskontinuitas di dalam suatu objek tanpa menyebabkan kerusakan pada objek tersebut. Metode radiografi memanfaatkan sinar-X atau sinar gamma untuk menghasilkan citra bagian dalam objek, sehingga kondisi internal material dapat diamati secara visual (Gambar 6.1).

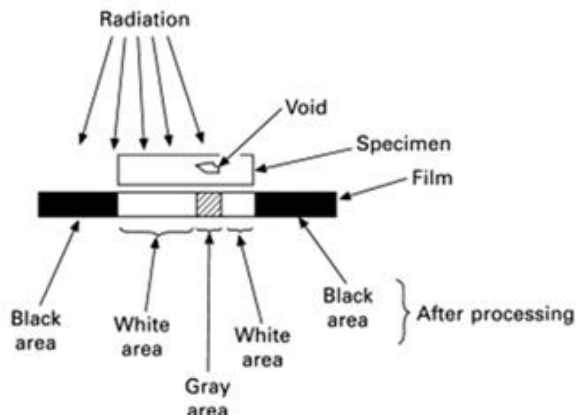


Gambar 7.1 Contoh film hasil uji radiography. (OCTI, 2024)

7.2 Prinsip Kerja

Peralatan dan bahan yang digunakan dalam pengujian radiografi meliputi sumber sinar-X atau sinar gamma, objek yang akan diinspeksi, serta film radiografi khusus. Pada pelaksanaannya, objek uji ditempatkan di antara sumber sinar-X

atau sinar gamma dan film radiografi. Selanjutnya, sinar-X atau sinar gamma diarahkan ke objek. Radiasi tersebut akan diserap oleh material objek dengan tingkat penyerapan yang berbeda-beda, bergantung pada ketebalan, kerapatan, dan adanya diskontinuitas di dalam objek. Sinar-X atau sinar gamma yang berhasil menembus objek kemudian direkam oleh film radiografi. Film tersebut selanjutnya diproses sehingga menghasilkan citra yang menampilkan fitur internal objek. Hasil radiografi diamati menggunakan lampu penampil (*viewer*), di mana area berwarna abu-abu (*gray area*) pada film dapat mengindikasikan adanya cacat, retak, atau diskontinuitas di dalam objek (Gambar 7.2). Sinar radiasi yang digunakan pada uji radiografi bersumber pada sinar x atau sinar gamma. Dalam sub bab ini akan dijelaskan tentang sinar x dan sinar gamma.



Gambar 7.2 Uji Radiografi (Zubaida Naheeda, 2024)

7.3. Sumber Radiasi

Dalam pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*) metode radiografi, sumber radiasi berfungsi sebagai penghasil radiasi pengion yang mampu menembus material uji sehingga cacat internal dapat divisualisasikan pada

film radiografi atau detektor digital. Secara umum, sumber radiasi pada radiografi NDT dibagi menjadi dua kelompok utama, yaitu sumber sinar-X dan sumber sinar gamma.

Pemilihan sumber radiasi bergantung pada ketebalan material, lokasi pengujian, kualitas radiograp (citra) yang diinginkan, serta aspek keselamatan radiasi. Sinar-X unggul dalam fleksibilitas dan kualitas citra, sedangkan sinar gamma unggul dalam mobilitas dan kemudahan penggunaan di lapangan. Tabel 7.1 memperlihatkan perbandingan sumber radiasi Radiografi.

Tabel 7.1 Perbandingan Sumber Radiasi

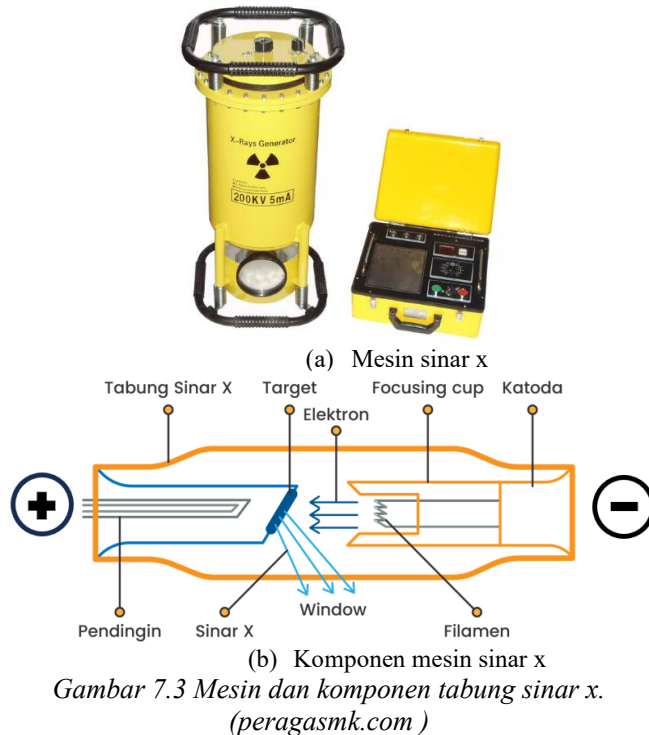
Aspek	Sinar-X	Sinar Gamma
Sumber	Tabung sinar-X	Isotop radioaktif
Pengaturan energi	Dapat diatur	Tetap
Portabilitas	Rendah	Tinggi
Keselamatan	Lebih aman	Risiko lebih tinggi
Aplikasi	Laboratorium / workshop	Lapangan

7.3.1 Sumber Sinar X

Mesin yang menghasilkan sinar-X (sinar X) disebut mesin sinar-X (X-ray machine) atau tabung sinar-X (X-ray tube) (Gambar 7.3)

Sinar-X merupakan salah satu bentuk radiasi elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang lebih pendek dan energi lebih tinggi dibandingkan cahaya tampak. Karena karakteristik tersebut, sinar-X memiliki kemampuan menembus berbagai jenis material. Sinar-X relatif mudah menembus bahan dengan kerapatan rendah, seperti udara dan jaringan lunak, namun akan lebih banyak diserap oleh bahan yang memiliki kerapatan tinggi, seperti tulang, logam, atau material padat lainnya. Sifat inilah yang dimanfaatkan dalam pengujian radiografi untuk menampilkan struktur internal suatu objek tanpa merusaknya.

Sinar-X dihasilkan menggunakan sebuah tabung sinar-X yang tersusun atas beberapa komponen utama yang bekerja secara terintegrasi (Gambar 7.3). Komponen tersebut meliputi katoda, yang berfungsi sebagai sumber elektron; anoda, sebagai target tumbukan elektron untuk menghasilkan sinar-X; tabung vakum, yang memungkinkan elektron bergerak tanpa hambatan; sumber tegangan tinggi, untuk mempercepat elektron dari katoda menuju anoda; filter, yang berfungsi menyerap sinar-X berenergi rendah yang tidak diinginkan; port sinar-X, sebagai jalur keluarnya radiasi sinar-X; serta sistem pendingin, yang berfungsi menjaga suhu anoda agar tetap aman selama proses pembangkitan sinar-X.



- Katoda merupakan komponen tabung sinar-X yang berfungsi sebagai sumber elektron. Katoda umumnya terbuat dari kawat tipis yang disebut filamen. Filamen ini dipanaskan dengan arus listrik sehingga energi kinetik elektron di dalam material filamen meningkat. Ketika energi tersebut cukup untuk mengatasi gaya tarik inti atom, elektron akan terlepas dari permukaan filamen melalui proses emisi termionik. Elektron-elektron yang terlepas ini kemudian dipercepat menuju anoda oleh tegangan tinggi untuk menghasilkan sinar-X.
- Anoda merupakan target bagi elektron yang dilepaskan dari katoda dan berfungsi sebagai tempat terjadinya tumbukan elektron berenergi tinggi. Anoda umumnya terbuat dari logam dengan titik lebur yang tinggi, seperti tungsten, agar mampu menahan panas yang sangat besar akibat tumbukan elektron. Pada saat elektron dari katoda menumbuk permukaan anoda, sebagian besar energinya berubah menjadi panas, sedangkan sebagian kecil lainnya diubah menjadi sinar-X. Oleh karena itu, anoda menjadi komponen utama tempat pembangkitan sinar-X di dalam tabung sinar-X.
- Tabung vakum berfungsi sebagai wadah bagi seluruh komponen pembangkit sinar-X dan harus berada dalam kondisi hampa udara (vakum). Udara pada kondisi normal merupakan campuran beberapa gas, antara lain nitrogen (78,09%), oksigen (20,94%), argon (0,93%), dan karbon dioksida (0,032%) (Hemida, 2021). Keberadaan gas-gas tersebut di dalam tabung dapat menyebabkan elektron berinteraksi atau bertumbukan dengan molekul udara sebelum mencapai anoda. Oleh karena itu, seluruh komponen sinar-X ditempatkan dalam tabung vakum agar tidak terdapat udara di dalamnya. Kondisi vakum ini bertujuan untuk mencegah interaksi elektron dengan gas, sehingga elektron dapat

bergerak bebas dari katoda menuju anoda, meningkatkan efisiensi, serta menghasilkan sinar-X dengan kualitas yang lebih baik dan stabil.

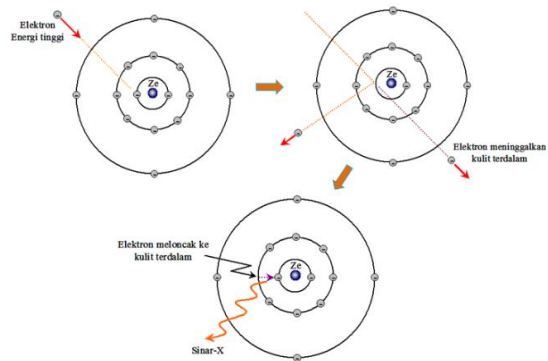
- Sumber tegangan tinggi berfungsi untuk menciptakan beda potensial yang sangat besar antara katoda dan anoda. Perbedaan tegangan tinggi ini diperlukan untuk mempercepat pergerakan elektron yang dilepaskan dari katoda menuju anoda. Semakin tinggi tegangan yang diberikan, semakin besar energi kinetik elektron saat menumbuk anoda, sehingga memengaruhi intensitas dan energi sinar-X yang dihasilkan.
- Filter terletak pada port keluaran sinar-X, yang juga dikenal sebagai window. Filter berfungsi untuk menyaring sinar-X berenergi rendah yang tidak berkontribusi terhadap pembentukan citra, tetapi justru meningkatkan dosis radiasi yang tidak diperlukan. Dengan menyerap sinar-X berenergi rendah tersebut, filter membantu meningkatkan kualitas citra radiografi serta mengurangi paparan radiasi yang tidak perlu, sehingga pengujian menjadi lebih aman dan efektif.
- Port sinar-X, yang juga dikenal sebagai window, merupakan bagian dari tabung sinar-X yang berfungsi sebagai jalur keluarnya sinar-X dari dalam tabung. Melalui port ini, sinar-X yang telah dihasilkan diarahkan keluar untuk dimanfaatkan dalam berbagai aplikasi, khususnya pada pengujian radiografi industri. Port sinar-X dirancang sedemikian rupa agar memungkinkan transmisi sinar-X secara efektif dengan kehilangan energi yang minimal.
- Sistem pendingin digunakan untuk menjaga suhu komponen tabung sinar-X agar tetap stabil selama proses pengoperasian. Sistem ini sangat penting karena tumbukan elektron pada anoda menghasilkan panas yang sangat tinggi. Dengan adanya sistem pendingin, panas

dapat diserap dan dibuang secara efektif sehingga komponen tetap berfungsi dengan baik, mencegah kerusakan, serta memperpanjang umur pakai peralatan sinar-X.

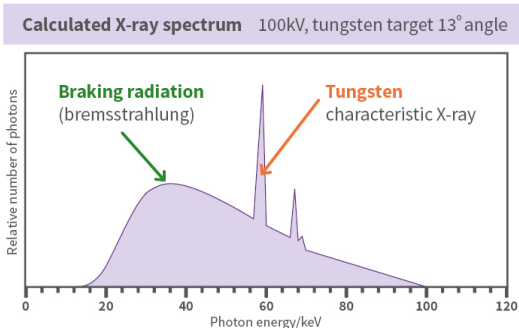
Sinar-X dihasilkan ketika elektron yang dilepaskan dari katoda dan dipercepat dengan kecepatan tinggi menumbuk permukaan anoda. Energi kinetik elektron tersebut sebagian besar diubah menjadi panas, dan sebagian kecil lainnya diubah menjadi radiasi elektromagnetik dalam bentuk sinar-X.

Di dalam tabung sinar-X, arus listrik yang mengalir pada filamen katoda menyebabkan filamen memanaskan sehingga menghasilkan elektron di permukaannya. Elektron-elektron ini kemudian terlepas melalui proses emisi termionik. Selanjutnya, medan listrik yang kuat akibat adanya perbedaan tegangan tinggi antara katoda dan anoda mempercepat gerak elektron menuju anoda, sehingga elektron memiliki energi kinetik yang sangat besar. Ketika elektron-elektron berenergi tinggi tersebut menumbuk bahan anoda, energi kinetiknya diubah menjadi radiasi elektromagnetik berupa sinar-X.

Pembentukan sinar-X dalam tabung terjadi melalui dua mekanisme utama. Mekanisme pertama adalah bremsstrahlung, yaitu radiasi yang dihasilkan ketika elektron dari katoda diperlambat atau dibelokkan oleh medan listrik inti atom anoda. Mekanisme kedua adalah radiasi karakteristik, yaitu radiasi yang dihasilkan ketika elektron berenergi tinggi dari katoda menumbuk dan mengeluarkan elektron dari kulit dalam atom anoda. Kekosongan pada kulit dalam tersebut kemudian diisi oleh elektron dari kulit yang lebih luar. Perpindahan elektron ini disertai dengan pelepasan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik, yang dikenal sebagai sinar-X karakteristik



Gambar 7.4 Mekanisme Produksi Sinar-X.
(Prof. Mikra August 2, 2020)



Gambar 7.5 Spectrum of X- ray. (Arpansa, 2024)

Spektrum sinar-X merupakan rentang energi atau panjang gelombang sinar-X yang dihasilkan selama proses pembentukan sinar-X di dalam tabung sinar-X. Spektrum ini menggambarkan distribusi intensitas sinar-X terhadap energi atau panjang gelombangnya. Secara umum, spektrum sinar-X terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu spektrum kontinu (bremsstrahlung) dan spektrum karakteristik, yang masing-

masing memiliki mekanisme pembentukan dan karakteristik energi yang berbeda

1. Sinar-X berkelanjutan (bremsstrahlung) merupakan sinar-X yang dihasilkan ketika elektron berkecepatan tinggi dari katoda mendekati inti atom anoda dan mengalami perlambatan atau pembelokan akibat medan listrik inti atom tersebut. Proses perlambatan ini menyebabkan elektron melepaskan sebagian energi kinetiknya dalam bentuk radiasi elektromagnetik berupa sinar-X. Karena tingkat perlambatan elektron dapat bervariasi, energi sinar-X yang dihasilkan juga beragam, sehingga membentuk spektrum kontinu.
2. Sinar-X karakteristik merupakan sinar-X yang dihasilkan ketika elektron berenergi kinetik tinggi dari katoda menumbuk atom target (anoda) dan mengeluarkan elektron dari kulit dalam atom tersebut, sehingga terbentuk kekosongan (vacancy). Kekosongan ini kemudian diisi oleh elektron dari kulit yang lebih luar. Perpindahan elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah disertai dengan pelepasan energi. Energi yang dilepaskan tersebut dipancarkan dalam bentuk radiasi elektromagnetik yang dikenal sebagai sinar-X karakteristik. Karena perbedaan tingkat energi antar kulit atom bersifat spesifik untuk setiap unsur, sinar-X karakteristik memiliki energi tertentu dan muncul sebagai puncak-puncak tajam pada spektrum sinar-X.

7.3.2 Sumber Sinar Gamma

Dalam pengujian tidak merusak (NDT), sinar gamma tidak dihasilkan oleh mesin pembangkit, melainkan berasal dari sumber radioaktif yang dikendalikan menggunakan perangkat radiografi gamma yang berfungsi sebagai wadah sekaligus pengamanan sumber radiasi, yang umumnya disebut gamma

radiography projector atau gamma ray exposure device. Gambar 7.6.

Cara kerja singkat gamma ray exposure device. Sumber radioaktif disimpan di dalam kontainer berpelindung timbal atau depleted uranium agar aman. Saat pengujian, sumber dikeluarkan dari kontainer melalui sistem kabel penggerak (remote control) menuju posisi penyinaran. Setelah waktu eksposur tercapai, sumber ditarik kembali ke dalam kontainer.



Gambar 7.6. *Gamma Ray Exposure Device.*
(epsbndt.com.my)

Radiografi sinar gamma menggunakan sumber radioaktif, seperti Iridium-192, Cobalt-60, atau Tantalum-182, sebagai sumber radiasi. Metode ini umumnya digunakan untuk inspeksi material dengan ketebalan yang lebih besar dan pada kondisi lapangan, karena peralatannya bersifat portabel dan tidak memerlukan sumber listrik.

Pembentukan dan Pemanfaatan Sinar Gamma pada Uji Tidak merusak. Sinar gamma dihasilkan dari proses peluruhan inti atom radioaktif yang tidak stabil. Ketika inti atom berada dalam keadaan energi tinggi, inti tersebut akan melepaskan kelebihan energinya dalam bentuk radiasi elektromagnetik berenergi sangat tinggi yang dikenal sebagai sinar gamma. Berbeda dengan sinar-X yang dihasilkan melalui interaksi elektron di luar inti atom, sinar gamma berasal langsung dari perubahan energi di dalam inti atom. Dalam aplikasi radiografi industri, sumber sinar gamma yang umum digunakan antara lain

Iridium-192, Cobalt-60, dan Selenium-75, yang masing-masing memancarkan sinar gamma dengan energi tertentu dan stabil dalam jangka waktu tertentu.

Pemanfaatan sinar gamma pada pengujian tidak merusak. Sinar gamma dapat digunakan dalam pengujian tidak merusak karena memiliki daya tembus yang sangat tinggi, sehingga mampu menembus material padat dan tebal seperti baja, pipa, dan sambungan las. Ketika sinar gamma melewati suatu material, sebagian radiasi akan diserap oleh material tersebut, sedangkan sisanya akan diteruskan. Perbedaan tingkat penyerapan radiasi ini bergantung pada ketebalan, kerapatan, dan adanya diskontinuitas di dalam material. Radiasi yang diteruskan kemudian direkam menggunakan film radiografi atau detektor digital, sehingga menghasilkan citra internal material. Citra ini memungkinkan pendeteksian cacat seperti porositas, retak, inklusi, dan ketidakteraturan internal tanpa merusak atau mengubah fungsi benda uji. Oleh karena itu, sinar gamma sangat efektif dan luas digunakan dalam pengujian tidak merusak, khususnya untuk inspeksi material tebal dan pada kondisi lapangan.

Untuk memahami kelebihan sinar gamma dalam pengujian tidak merusak (NDT), penting untuk membandingkannya dengan dua jenis radiasi lain yang juga berasal dari peluruhan radioaktif, yaitu sinar alfa (α) dan sinar beta (β). Perbedaan utama ketiga radiasi ini terletak pada sifat fisik, daya tembus, dan aplikasinya. (Tabel 4.1)

Tabel 7.2 Perbedaan Sinar Alfa, Beta dan Gamma

Jenis Radiasi	Bentuk Radiasi	Daya Tembus	Contoh Material yang Dapat Ditembus
Sinar Alfa	Partikel berat bermuatan	Sangat rendah	Udara beberapa cm
Sinar Beta	Partikel elektron	Sedang	Plastik, aluminium tipis

Sinar Gamma	Gelombang elektromagnetik	Sangat tinggi	Baja, pipa, sambungan las
-------------	---------------------------	---------------	---------------------------

Bahan radioaktif penghasil sinar gamma tidak dapat digunakan tanpa batas waktu karena aktivitas radioaktifnya akan berkurang seiring terjadinya peluruhan inti atom. Penurunan aktivitas ini dinyatakan dalam bentuk waktu paruh. Oleh karena itu, sumber sinar gamma dalam pengujian tidak merusak memiliki umur pakai terbatas dan harus diganti atau dikelola sesuai dengan ketentuan keselamatan radiasi yang berlaku.

Konsep Waktu Paruh (Half-Life). Waktu paruh adalah waktu yang dibutuhkan agar aktivitas radioaktif berkurang menjadi setengahnya.

Tabel 4.2 merupakan contoh sumber sinar gamma yang umum digunakan pada uji tidak merusak.

Tabel 7.3 Waktu Paruh Isotop Radioaktif untuk Radiografi

Isotop Radioaktif	Waktu Paruh	Mean Energy (MeV)	Penetration in steel (mm)
Iridium-192	± 74 hari	0,5	75 mm
Tantalum-182	± 120 hari	1,2	230 mm
Cobalt-60	± 5,27 tahun	1,4	230 mm

Waktu paruh, atau "half-life," adalah periode waktu yang diperlukan bagi setengah dari jumlah awal bahan radioaktif untuk mengalami peluruhan menjadi bentuk lain. Ini adalah ukuran seberapa cepat suatu isotop radioaktif akan menghilang atau berkurang aktivitasnya.

Contoh penghitungan waktu paruh. sebuah isotop radioaktif Cobalt -60 memiliki berat sebesar 100 gram. Cobalt-60 memiliki waktu sekitar 5,27 tahun. Radioaktif Cobalt-60

akan memiliki berat 50 gram yang tersisa bila telah melewati 1 waktu paruh. Setelah 2 waktu paruh, Cobalt-60 hanya memiliki 25 gram yang tersisa, dan seterusnya.

Contoh latihan soal.

Suatu bahan radioaktif memiliki massa awal 160 gram dan waktu paruh 4 tahun. Berapa massa bahan tersebut setelah 12 tahun?

Jawaban:

- Jumlah waktu paruh = $12 \div 4 = 3$ [7.1]
- Sisa massa = $160 \times (1/2)^3 = 20\text{gram}$ [7.2]

7.4 Objek Atau Benda Uji Radiografi

Agar keberadaan retak (*crack*) pada suatu benda uji dapat diperiksa menggunakan pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Testing/NDT*) metode radiografi, terdapat beberapa persyaratan yang perlu dipenuhi oleh sampel uji. Metode radiografi bekerja berdasarkan perbedaan penyerapan radiasi sinar-X atau sinar gamma oleh material, sehingga karakteristik material dan kondisi geometrinya sangat mempengaruhi hasil pengujian.

Material yang diuji harus memiliki kemampuan untuk ditembus oleh radiasi. Ketebalan dan densitas material menentukan tingkat energi radiasi yang diperlukan. Material yang terlalu tebal atau memiliki densitas tinggi memerlukan sumber radiasi dengan energi yang lebih besar agar citra radiografi dapat terbentuk dengan baik.

Selain itu, retak yang akan terdeteksi umumnya harus menimbulkan perbedaan densitas atau ketebalan efektif dibandingkan dengan material di sekitarnya. Retak yang sangat sempit atau tertutup rapat sering kali sulit terdeteksi karena tidak memberikan kontras yang cukup pada hasil radiografi.

Orientasi retak terhadap arah penyinaran juga sangat berpengaruh. Retak akan lebih mudah terlihat apabila orientasinya membentuk sudut tertentu atau sejajar dengan arah radiasi. Sebaliknya, retak yang sejajar dengan arah rambat sinar radiasi cenderung sulit dideteksi karena tidak menghasilkan perbedaan penyerapan yang signifikan.

Geometri dan ketebalan benda uji yang relatif seragam akan memudahkan proses interpretasi hasil radiografi. Perubahan ketebalan yang ekstrem dapat menyebabkan variasi kontras pada citra radiograf sehingga menyulitkan identifikasi cacat. Oleh karena itu, kondisi permukaan benda uji juga harus bersih dari kotoran, lapisan cat tebal, atau benda asing lain yang dapat mengganggu penyerapan radiasi.

Pengujian radiografi umumnya memerlukan akses pada dua sisi benda uji, yaitu satu sisi untuk penempatan sumber radiasi dan sisi lainnya untuk film atau detektor. Selain itu, ukuran retak harus berada dalam batas sensitivitas metode radiografi. Retak yang sangat halus lebih sulit dideteksi dibandingkan cacat volumetrik seperti porositas atau inklusi.

Dengan mempertimbangkan keterbatasan tersebut, metode radiografi sering dikombinasikan dengan metode NDT lain, seperti pengujian ultrasonik atau magnetic particle testing, guna memperoleh hasil inspeksi yang lebih andal dan menyeluruh

7.5 Jenis Hasil Radiografi pada Pengujian Tidak Merusak

Seiring dengan perkembangan teknologi, hasil pengujian radiografi tidak lagi terbatas pada film konvensional, tetapi telah berkembang ke arah sistem digital yang lebih cepat, aman, dan efisien. Secara umum, hasil radiografi saat ini dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berikut.

7.5.1. Radiografi Film Konvensional (Film Radiography)

Radiografi film merupakan metode klasik di mana hasil pengujian berupa citra laten yang terekam pada film radiografi dan diproses secara kimia. Hasilnya berupa gambar dua dimensi dengan variasi tingkat kehitaman (*density*) yang menunjukkan perbedaan penyerapan radiasi pada material.

Meskipun memiliki resolusi tinggi, metode ini mulai ditinggalkan karena prosesnya memakan waktu, membutuhkan bahan kimia, serta sulit dalam penyimpanan dan distribusi data.

7.5.2. Computed Radiography (CR)

Computed Radiography merupakan tahap transisi dari sistem film ke sistem digital. Pada metode ini, film digantikan oleh *imaging plate* (IP) berbahan fosfor yang mampu menyimpan energi radiasi. Hasil radiografi dibaca menggunakan *scanner* dan ditampilkan dalam bentuk citra digital.

Keunggulan CR terletak pada kemudahan penyimpanan data digital dan kemampuan pengolahan citra, meskipun proses pembacaan masih memerlukan langkah tambahan dibandingkan sistem digital langsung.

7.5.3. Digital Radiography (DR)

Digital Radiography adalah teknologi radiografi modern di mana hasil pengujian langsung diperoleh dalam bentuk citra digital melalui detektor elektronik seperti *flat panel detector*. Metode ini memungkinkan hasil radiografi ditampilkan secara real-time atau hampir seketika.

DR menawarkan keunggulan berupa kecepatan inspeksi, rentang dinamika yang luas, kualitas citra yang konsisten, serta kemudahan integrasi dengan sistem komputer dan perangkat lunak analisis.

7.5.4. Radiografi Digital Dinamis (*Real-Time Radiography / RTR*)

Radiografi real-time menghasilkan citra bergerak (*live image*) yang memungkinkan pengamat melihat kondisi internal objek secara langsung selama proses penyinaran. Metode ini sangat efektif untuk inspeksi komponen kompleks, pengamatan pergerakan fluida, atau pemeriksaan cacat selama proses manufaktur.

RTR banyak digunakan dalam industri kedirgantaraan, otomotif, dan manufaktur presisi.

7.5.5. *Computed Tomography (CT)*

Computed Tomography merupakan pengembangan lanjut dari radiografi digital yang menghasilkan citra penampang (*cross-sectional image*) dan rekonstruksi tiga dimensi (3D) dari objek uji. Metode ini memungkinkan analisis cacat secara sangat detail, termasuk ukuran, bentuk, dan posisi cacat di dalam material.

CT merupakan teknologi radiografi paling canggih saat ini dan banyak digunakan untuk inspeksi komponen bernilai tinggi, penelitian material, serta kontrol kualitas tingkat lanjut.

7.6 Prosedur Umum Radiografi

Gambar hasil proyeksi radiasi yang melewati suatu objek disebut *radiograph*, sedangkan proses untuk memperoleh gambar radiografi serta melakukan evaluasi terhadap isi gambar tersebut disebut *radiography*.

Prosedur radiografi merupakan serangkaian tahapan kerja yang dilakukan untuk memperoleh radiograph yang mampu menampilkan kondisi internal suatu material atau komponen tanpa menimbulkan kerusakan. Secara umum, prosedur radiografi meliputi tahap persiapan, penyinaran,

pemrosesan radiograph, serta evaluasi dan pelaporan. Pelaksanaan setiap tahapan harus mengacu pada standar yang berlaku dan memperhatikan aspek keselamatan radiasi guna menjamin hasil pengujian yang akurat dan aman.

7.6.1. Persiapan Benda Uji

Benda uji dibersihkan dari kotoran, minyak, cat, atau karat yang dapat mempengaruhi kualitas hasil radiografi. Permukaan hasil pengecoran atau pengelasan tidak harus memiliki tingkat kehalusan akhir tertentu, namun partikel pasir yang menempel, sisa terak, serta kotoran yang berada di sudut atau area lain yang masih dapat dijangkau harus dibersihkan secara menyeluruh, misalnya dengan menggunakan sikat kawat.

7.6.2. Pemilihan Sumber Radiasi

Pemilihan sumber radiasi ditentukan oleh ketebalan dan kerapatan material benda uji. Umumnya, baja dengan ketebalan hingga 50 mm atau paduan ringan dengan ketebalan setara diperiksa menggunakan peralatan sinar-X berkapasitas hingga 400 kV. Untuk material dengan ketebalan yang lebih besar, digunakan sumber sinar gamma dari isotop radioaktif, seperti Cobalt-60. Tabel 7.3).

Pemilihan sumber radiasi selain bergantung pada ketebalan material, juga terantung lokasi pengujian. Sinar-X unggul dalam fleksibilitas dan kualitas citra, sedangkan sinar gamma unggul dalam mobilitas dan kemudahan penggunaan di lapangan. Tabel 7.1 memperlihatkan perbandingan sumber radiasi Radiografi.

7.6.3. Penataan Peralatan Radiografi

Sumber radiasi, benda uji, dan media perekam (film radiografi atau detektor digital) disusun sesuai dengan teknik radiografi yang digunakan. Jarak sumber ke benda uji dan posisi

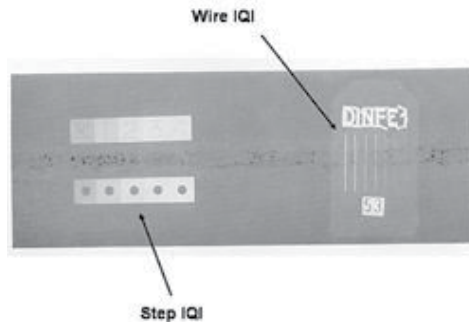
film diatur untuk meminimalkan distorsi dan memperoleh ketajaman citra yang optimal.

7.6.4. Penempatan Indikator Kualitas Citra (IQI)

Indikator kualitas citra (Image Quality Indicator/IQI) ditempatkan pada permukaan benda uji untuk memverifikasi sensitivitas dan kualitas hasil radiografi. IQI berfungsi sebagai acuan bahwa tingkat detail cacat yang diinginkan dapat terdeteksi.



Gambar 7.7 Contoh IQI (ndt-instrument.com)



Gambar 7.8. Letak IQI Diatas Sampel Uji (Bindt.com)

7.6.5. Penentuan Waktu Penyinaran (*Exposure*)

Waktu eksposur adalah lamanya film atau detektor terkena radiasi sinar-X atau sinar-gamma agar citra radiografi yang dihasilkan memiliki kepadatan (density) yang sesuai untuk mendeteksi cacat.

Waktu penyinaran ditentukan berdasarkan:

- Jenis dan energi sumber radiasi
- Ketebalan dan jenis material
- Jarak sumber ke film
- Jenis film atau detector.

Untuk mempermudah pemahaman penentuan waktu penyinaran Sinar X, disajikan contoh latihan perhitungan menggunakan **sinar X** yang bersifat simulasi dan hanya untuk tujuan pembelajaran

Latihan Soal menentukan waktu eksposur Radiografi Sinar-X (simulasi). Sebuah plat baja karbon akan diuji menggunakan pengujian tidak merusak metode radiografi sinar-X untuk mendeteksi kemungkinan cacat internal. Diketahui data sebagai berikut:

- Ketebalan plat: 10 mm
- Jenis radiasi : Sinar-X (simulasi)
- Jarak sumber ke film (FFD) : 100 cm
- Jenis film : D4
- Jenis screen : Lead screen 0,125 mm (depan dan belakang)
- Tegangan tabung sinar-X : 120 kV
- Arus tabung : 5 mA
- Density film yang diinginkan : 2,0 – 2,5

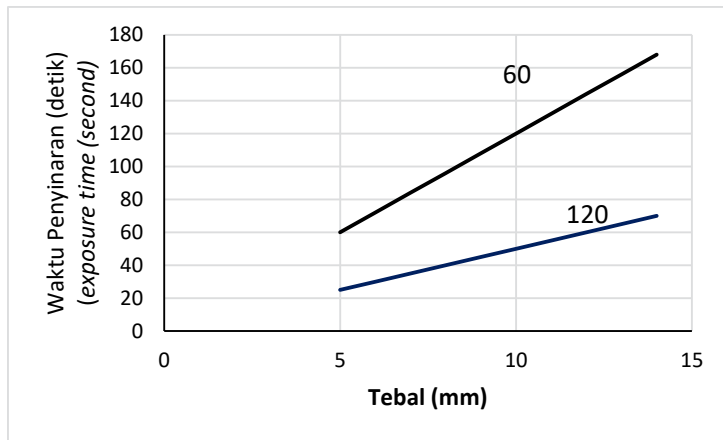
jawaban:

Prinsip penentuan waktu eksposur

Dalam praktik radiografi industri:

- Waktu eksposur tidak dihitung dengan rumus murni
- Digunakan **exposure chart** berdasarkan pengalaman dan standar Untuk:
- Baja karbon 10 mm
- Film AGFA D4
- 120 kV, 5 mA
- FFD 100 cm

Berdasarkan *exposure chart* (Gambar 7.9) sinar-X diperoleh $t = 45 - 60$ detik. Dalam aplikasinya dipilih 50 detik.

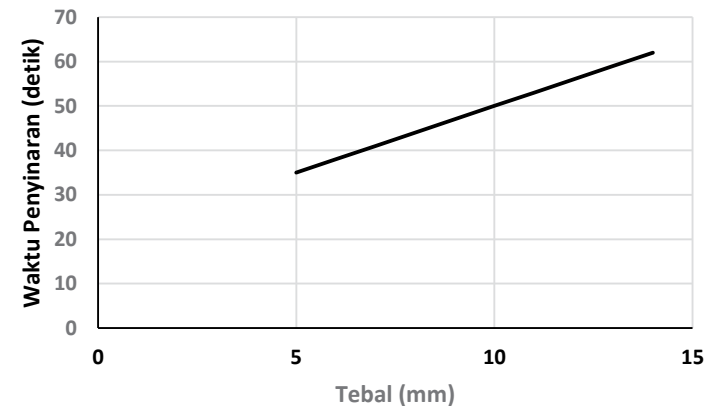


Gambar 7.9 Ilustrasi Exposure Chart Sinar X (simulasi).

Waktu penyinaran (*exposure chart*) dalam radiografi tersedia dan digunakan sebagai panduan praktis untuk menentukan jumlah radiasi (dalam mA·min atau detik) yang diperlukan, berdasarkan ketebalan material, tegangan (kV), jenis film dan screen, serta jarak sumber ke film (FFD) (IPGM Servicios). Perlu dicatat bahwa tidak ada satu chart tunggal yang berlaku untuk semua mesin atau semua jenis film, karena setiap set peralatan X-ray biasanya memiliki chart-nya sendiri.

Waktu penyinaran (*exposure time*) pada pengujian tidak merusak dengan metode radiografi gamma ditentukan menggunakan grafik paparan (*exposure time graph*), yang sering juga disebut sebagai *technique chart* atau kurva paparan. Grafik ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan waktu paparan yang sesuai berdasarkan jenis sumber radiasi, ketebalan material, jarak sumber ke film, serta jenis film yang digunakan.

Untuk mempermudah pemahaman penentuan waktu penyinaran radiografi gamma, disajikan contoh latihan perhitungan menggunakan sinar gamma A yang bersifat simulasi (bukan nilai sesungguhnya). Sebuah pengujian radiografi dilakukan pada baja karbon dengan ketebalan 10 mm, menggunakan film D4 dan jarak sumber-film FFD 100 cm. Sumber radiasi yang digunakan adalah sinar gamma A (simulasi) yang waktu penyinarannya terlihat pada Gambar 7.10



Gambar 7.10 Waktu Penyinaran Gamma A (detik)

Pertanyaan:

1. Berapa waktu penyinaran untuk baja 10 mm dengan sinar gamma A (bukan sebenarnya) ?
2. Jika ketebalan baja bertambah menjadi 12 mm, berapa waktu penyinaran yang dibutuhkan?
3. Jelaskan mengapa waktu penyinaran meningkat seiring bertambahnya ketebalan material.

Jawaban

Berdasarkan grafik waktu penyinaran radiografi gamma menggunakan sumber Co-60, untuk baja dengan ketebalan 10 mm diperoleh waktu penyinaran sebesar 50 detik. Sementara itu, untuk baja dengan ketebalan 12 mm, waktu penyinaran yang diperlukan berdasarkan tabel waktu penyinaran adalah 56 detik.

Waktu penyinaran pada radiografi gamma meningkat seiring dengan bertambahnya ketebalan material. Hal ini disebabkan karena semakin tebal material, semakin besar pula jumlah radiasi yang diserap oleh material tersebut, sehingga radiasi yang mencapai film menjadi lebih sedikit apabila waktu eksposur tetap. Oleh karena itu, untuk memperoleh densitas film yang optimal dan citra radiografi yang jelas, waktu eksposur harus ditambah seiring dengan bertambahnya ketebalan material yang diuji.

7.6.6. Penyinaran (*Exposure*)

Penyinaran dilakukan sesuai dengan waktu yang telah ditentukan. Selama proses ini, area kerja harus dikosongkan dan diberi pengamanan sesuai dengan prosedur keselamatan radiasi untuk melindungi personel dan lingkungan sekitar.

7.6.7. Pemrosesan Film atau Pembacaan Citra

Film radiografi konvensional harus diproses/dicuci di ruang gelap (Gambar 7.11) karena masih peka terhadap cahaya

setelah penyinaran. Paparan cahaya sebelum proses pencucian selesai dapat merusak atau menggelapkan film. Ruang gelap menggunakan lampu pengaman (*safelight*) dengan intensitas dan warna tertentu agar tidak memengaruhi film. Proses pencucian meliputi tahap pengembangan, penghentian, fiksasi, pencucian, dan pengeringan. Setelah tahap fiksasi, film tidak lagi peka terhadap cahaya dan dapat ditangani di ruang terang., sedangkan pada radiografi digital, citra hasil penyinaran dapat langsung ditampilkan dan disimpan secara elektronik.



Gambar 7.11 Ruang Gelap (radiologykr.blogspot.com)

7.6.8. Evaluasi dan Interpretasi Hasil

Evaluasi hasil radiografi pada pengujian tidak merusak (NDT) dilakukan dengan menafsirkan citra radiograf untuk mengidentifikasi adanya indikasi cacat di dalam material. Proses evaluasi diawali dengan memeriksa kualitas radiograf, seperti ketajaman citra, kontras, dan densitas film, agar memenuhi persyaratan standar. Selanjutnya, radiograf diamati secara visual menggunakan viewer untuk mengenali indikasi cacat, misalnya porositas, retak, inklusi terak, atau kurang penetrasi pada

sambungan las. Bentuk, ukuran, dan posisi indikasi cacat kemudian diukur dan dibandingkan dengan kriteria penerimaan yang tercantum dalam standar atau spesifikasi yang berlaku.

Sebagai contoh pada hasil pengelasan, indikasi berbentuk bulat kecil yang tersebar pada daerah logam las umumnya menunjukkan cacat porositas, sedangkan indikasi memanjang sejajar dengan garis las dapat mengindikasikan cacat kurang penetrasi atau inklusi terak. Hasil evaluasi ini digunakan untuk menentukan apakah sambungan las tersebut dapat diterima atau harus dilakukan perbaikan (Gambar 7.12).



Gambar 7.12 Proses Evaluasi Film Radiografi (asnt.org)

7.6.9. Pelaporan Hasil Pengujian

Pelaporan hasil pengujian dilakukan dengan mendokumentasikan seluruh hasil inspeksi ke dalam suatu laporan yang memuat identitas benda uji, parameter pengujian radiografi yang digunakan, hasil evaluasi citra radiografi, serta kesimpulan mengenai kondisi dan kelayakan benda uji berdasarkan kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) yang berlaku.

7.6 Kelebihan Dan Kekurangan Radiografi

Metode radiografi sebagai salah satu 139onizi pengujian tidak merusak memiliki berbagai kelebihan dan kekurangan yang perlu dipahami sebelum penerapannya. Pemahaman terhadap aspek tersebut penting agar metode radiografi dapat digunakan secara tepat sesuai dengan jenis material, bentuk benda uji, dan tujuan pengujian

Tabel 7.4. Perbandingan Kelebihan dan Kekurangan Metode Radiografi

Kelebihan Radiografi	Kekurangan Radiografi
Mampu mendeteksi cacat internal seperti porositas, retak, dan inklusi.	Menggunakan radiasi pengion yang berbahaya jika tidak dikendalikan.
Memberikan citra permanen sebagai dokumentasi hasil pengujian.	Memerlukan prosedur keselamatan radiasi yang ketat.
Cocok untuk inspeksi sambungan las dan material tebal	Biaya peralatan dan operasional tinggi.
Tidak merusak benda uji (non-destruktif).	Tidak efektif untuk mendeteksi cacat yang sejajar dengan arah radiasi.
Dapat menunjukkan bentuk dan ukuran cacat secara visual.	Waktu inspeksi lebih lama, terutama pada radiografi film.
Dapat digunakan pada berbagai jenis material.	Membutuhkan akses ke dua sisi benda uji.

7.7 Standar Radiografi

Standar radiografi dalam pengujian tidak merusak (NDT) digunakan sebagai acuan untuk menjamin kualitas, keselamatan, dan konsistensi hasil pengujian. Standar-standar tersebut berlaku baik untuk penggunaan sinar-X maupun sinar gamma, dengan perbedaan utama terletak pada parameter eksposur, sumber radiasi, dan pengujian. Pemilihan standar yang digunakan harus disesuaikan dengan kode desain, spesifikasi

proyek, serta persyaratan pelanggan yang berlaku. Beberapa contoh standar internasional sebagai berikut:

- ASTM E1742 / ASTM E1742M. Standard Practice for Radiographic Examination (berlaku untuk sinar-X dan sinar gamma)
- ASTM E1030. Radiographic Examination of Weldments
- ISO 17636-1. Non-destructive testing of welds — Radiographic testing using film (sinar-X dan sinar gamma)
- ISO 17636-2. Radiographic testing using digital detectors
- ISO 5579. Radiographic testing of metallic materials using film

7.8 Latihan Soal

Latihan soal berikut membantu meningkatkan pemahaman metode radiografi dalam pengujian tidak merusak.

1. Dalam pengujian radiografi NDT, perbedaan utama antara sinar-X dan sinar gamma yang paling memengaruhi fleksibilitas pengaturan energi radiasi adalah
 - A. Jenis film radiografi yang digunakan
 - B. Mekanisme pembentukan radiasi
 - C. Metode evaluasi radiograf
 - D. Jenis cacat yang terdeteksiJawaban: B
2. Pada inspeksi sambungan las baja tebal di lapangan tanpa sumber, metode radiografi yang paling tepat digunakan adalah
 - A. Radiografi sinar-X tegangan rendah
 - B. Radiografi sinar-X tegangan tinggi
 - C. Radiografi sinar gamma dengan isotop radioaktif

D. Radiografi digital berbasis flat panel

Jawaban: C

3. Indikasi radiograf berupa garis gelap memanjang sejajar dengan sumbu sambungan las paling mungkin menunjukkan cacat
 - A. Porositas gas
 - B. Inklusi terak
 - C. Retak melintang
 - D. Kurang penetrasiJawaban: D
4. Penerapan standar radiografi seperti ASME Section V atau ISO 17636 pada pengujian NDT bertujuan utama untuk ...
 - A. Meningkatkan kecepatan pengujian
 - B. Menyamakan merek peralatan radiografi
 - C. Menjamin keselamatan, kualitas citra, dan konsistensi hasil evaluasi
 - D. Mengurangi biaya operasional pengujianJawaban: C
5. Salah satu keterbatasan utama Radiographic Testing (RT) dibandingkan metode Ultrasonic Testing (UT) dalam mendeteksi cacat adalah
 - A. Tidak mampu mendeteksi cacat internal.
 - B. Kurang sensitif terhadap cacat yang orientasinya sejajar dengan arah pancaran radiasi.
 - C. Tidak dapat digunakan untuk menguji material logam.
 - D. Tidak memerlukan interpretasi hasil pengujian.Jawaban: B

Daftar Pustaka

- OCTI, 2024, Radiographic Inspection (X-Ray) Services, <https://www.orangecoasttesting.com/radiographic>, diunduh 14 oktober 2024 jam 10.55 WIB
- Zubaida Naheeda April 21, 2024, Non – Destructive Testing (NDT) : Everything You Need To Know, <https://entri.app/blog/non-destructive-testing-ndt/> diunduh 14 oktober 2024 jam 16.44 WIB
- X. Sekar, 2024, “Pertanyaan Jelaskan cara kerja sinar X!”, roboguru by ruangguru, <https://roboguru.ruangguru.com/question/jelaskan-cara-kerja-sinar-x-QU-E0AR0GHJ> diunduh 21 oktober 2024 jam 12.40 WIB)
- H Hemida Wahyu Isramadhanti 2021, *Gambaran Kualitas Udara Di Kota Yogyakarta Berdasarkan Pemantauan Air Quality Monitoring System Tahun 2019-2020*. Diploma thesis, Poltekkes Kemenkes Yogyakarta. <http://eprints.poltekkesjogja.ac.id/6929/4/chapter%202.pdf> diunduh 21 Oktober 2024, jam 15.16 WIB
- Prof. Mikra August 2, 2020 , “299: Fisika SMA: Cara Memproduksi Sinar-X” Interdisciplinary Physics; Physics Learning for the MILLENNIAL, <https://profmikra.org/?p=4387> diunduh 21 Oktober 2024, jam 15.20 WIB
- X-rays, Australia government: Australia Radiation Protection and Nuclear safety agency; <https://www.arpsa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/142onizing-radiation/x-ray> diunduh 24 oktober 2024 jam 14.41 WIB
- <http://www.epsbndt.com.my/index.php?p=product-details&slug=sentinel-delta-880>

<https://www.ndt-instruments.com/product/image-quality-indicators/>

<https://www.bindt.org/What-is-NDT/Index-of-acronyms/I/IQI/>

<https://radiologykr.blogspot.com/2014/01/kamar-gelap-darkroom.html>

<https://www.asnt.org/what-is-nondestructive-testing/methods/radiographic-testing>.

[https://peragasmk.com/welding-x-ray-testing-equipment/teknik-pengelasan/ \)](https://peragasmk.com/welding-x-ray-testing-equipment/teknik-pengelasan/)

BAB 8

Pengujian Kebocoran

8.1 Pengertian Umum Pengujian Kebocoran (*Leak Test*)

Pengujian kebocoran (*leak test*) merupakan suatu metode pengujian yang digunakan untuk mendeteksi adanya kebocoran pada suatu sistem, wadah, atau komponen, baik yang mengandung gas maupun cairan. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa sistem tersebut tertutup rapat dan tidak mengalami kehilangan fluida yang tidak diinginkan selama pengoperasian.

Tujuan utama pelaksanaan uji kebocoran adalah untuk memastikan integritas sistem atau produk, seperti pipa, tangki, katup, sistem HVAC, tabung gas, dan peralatan sejenis. Selain itu, uji kebocoran berperan penting dalam menjaga keselamatan operasional dan lingkungan, mencegah kerugian ekonomi akibat hilangnya bahan yang bernilai atau berbahaya, serta memastikan pemenuhan terhadap standar mutu dan regulasi industri yang berlaku.

Uji kebocoran banyak diterapkan pada berbagai bidang industri, antara lain industri otomotif untuk pemeriksaan radiator dan tangki bahan bakar, industri minyak dan gas, industri farmasi dan makanan terutama pada pengujian kemasan, peralatan rumah tangga seperti pendingin udara dan lemari es, serta pada sistem perpipaan dan bejana tekan. Dengan demikian, uji kebocoran merupakan bagian penting dalam pengendalian mutu dan keselamatan suatu sistem teknik.

8.2 Teori Pendukung Pengujian Kebocoran.

Pelaksanaan pengujian kebocoran (*leak testing*) tidak terlepas dari prinsip-prinsip dasar fisika fluida dan gas. Pemahaman terhadap teori-teori pendukung sangat penting agar mekanisme terjadinya kebocoran serta perubahan tekanan yang diamati selama pengujian dapat diinterpretasikan dengan benar. Beberapa teori utama yang menjadi dasar dalam pengujian kebocoran antara lain Hukum Pascal, Tekanan Hidrostatik, Hukum Boyle, dan Hukum Gas Ideal, yang masing-masing menjelaskan perilaku tekanan dan aliran fluida maupun gas dalam sistem tertutup.

8.2.1. Hukum Pascal

Hukum Pascal menyatakan bahwa tekanan yang diberikan pada fluida dalam ruang tertutup akan diteruskan sama besar ke segala arah. Prinsip ini mendukung pelaksanaan uji kebocoran, khususnya pada metode yang menggunakan fluida cair atau gas bertekanan. Ketika suatu sistem atau komponen diberi tekanan internal, tekanan tersebut akan merata ke seluruh bagian, termasuk dinding dan sambungan. Apabila terdapat celah, retak, atau pori pada material, tekanan fluida akan mendorong fluida keluar melalui cacat tersebut sehingga kebocoran dapat terdeteksi. Oleh karena itu, Hukum Pascal menjadi dasar konseptual bahwa tekanan uji yang diberikan akan mencapai seluruh bagian objek uji secara merata, sehingga keberadaan kebocoran dapat diungkap secara efektif.

8.2.2. Tekanan Hidrostatik

Tekanan pada fluida diam bertambah seiring dengan bertambahnya kedalaman, yang dinyatakan dengan persamaan:

$$P = \rho g h \quad [8.1]$$

di mana:

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3),

g = percepatan gravitasi (m/s^2),

h = kedalaman fluida (m).

Tekanan hidrostatik adalah tekanan yang ditimbulkan oleh fluida diam akibat pengaruh gravitasi, yang besarnya bergantung pada kedalaman fluida, massa jenis fluida, dan percepatan gravitasi. Secara matematis, tekanan hidrostatik dinyatakan dengan persamaan (8.2) diatas.

Dalam pengujian kebocoran, khususnya uji kebocoran hidrostatik (hydrostatic leak test), prinsip tekanan hidrostatik dimanfaatkan untuk memberikan tekanan pada dinding bagian dalam suatu komponen, seperti pipa, tangki, atau bejana tekan. Ketika fluida cair diisikan ke dalam objek uji hingga ketinggian tertentu, tekanan hidrostatik akan bekerja pada seluruh permukaan internal objek. Tekanan ini meningkat seiring bertambahnya kedalaman fluida, sehingga bagian bawah objek mengalami tekanan yang lebih besar dibandingkan bagian atas.

Apabila terdapat retak, pori, atau ketidaksempurnaan pada material, tekanan hidrostatik akan mendorong fluida keluar melalui cacat tersebut. Munculnya rembesan atau tetesan fluida menjadi indikasi adanya kebocoran. Dengan demikian, hukum tekanan hidrostatik menjelaskan mengapa peningkatan tinggi kolom fluida atau tekanan uji dapat meningkatkan sensitivitas pengujian kebocoran dan membantu mengungkap cacat yang sangat kecil.

8.2.3. Hukum Boyle (untuk Gas)

Hukum ini sering digunakan pada pengujian kebocoran dengan media gas, karena perubahan tekanan dapat menunjukkan adanya kebocoran.

Hukum Boyle sebagai berikut. Untuk gas pada suhu konstan, tekanan berbanding terbalik dengan volumenya:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

[8.2]

Dimana

P = tekanan gas

V = volume gas

Indeks 1 dan 2 mengacu pada dua kondisi gas yang berbeda dengan suhu yang sama

Gas tersusun atas partikel-partikel (molekul) yang bergerak bebas dan saling bertumbukan. Ketika volume gas diperkecil, misalnya dengan menekan wadahnya, molekul gas akan lebih sering bertumbukan dengan dinding wadah sehingga tekanan meningkat. Sebaliknya, jika volume gas diperbesar, frekuensi tumbukan molekul terhadap dinding wadah berkurang dan tekanan gas pun menurun.

Dalam pengujian kebocoran berbasis gas, seperti pneumatic leak test, pressure decay test, atau vacuum box test, Hukum Boyle menjadi dasar utama dalam mendeteksi kebocoran. Pada metode ini, suatu komponen (misalnya pipa, tabung, atau bejana) diisi gas dan ditekan hingga tekanan tertentu, kemudian sistem dibuat tertutup.

Jika tidak terdapat kebocoran, volume sistem tetap konstan sehingga tekanan gas juga akan tetap stabil sesuai dengan Hukum Boyle. Namun, apabila terjadi kebocoran, sebagian gas akan keluar dari sistem, menyebabkan volume efektif gas di dalam sistem bertambah atau jumlah gas berkurang. Akibatnya, tekanan gas akan menurun seiring waktu. Penurunan tekanan inilah yang diamati dan dianalisis sebagai indikasi adanya kebocoran.

8.2.4 Hukum Gas Ideal

Hukum Gas Ideal sangat mendukung pelaksanaan uji kebocoran, khususnya pada pengujian kebocoran berbasis gas. Bahkan, hukum ini dapat dianggap sebagai landasan teori utama selain Hukum Boyle.

Hukum Gas Ideal dinyatakan dengan persamaan:

$$PV=nRT \quad [8.3]$$

yang menunjukkan hubungan antara tekanan (P), volume (V), jumlah mol gas (n), dan temperatur (T).

Dalam uji kebocoran menggunakan gas, seperti pressure decay test, pneumatic leak test, dan vacuum testing, hukum gas ideal digunakan untuk menjelaskan perubahan tekanan yang terjadi selama pengujian. Pada kondisi sistem tertutup dan temperatur konstan, tekanan gas akan tetap stabil apabila tidak terjadi kebocoran. Namun, apabila terdapat kebocoran, jumlah gas di dalam sistem (n) akan berkurang karena gas keluar melalui celah atau retakan. Berdasarkan persamaan gas ideal, berkurangnya jumlah gas akan menyebabkan tekanan menurun meskipun volume dan temperatur tetap.

Selain itu, hukum gas ideal juga menegaskan pentingnya pengendalian temperatur selama uji kebocoran. Perubahan temperatur dapat menyebabkan perubahan tekanan yang bukan disebabkan oleh kebocoran, sehingga berpotensi menimbulkan kesalahan interpretasi hasil uji. Oleh karena itu, dalam praktik uji kebocoran, koreksi temperatur sering diperlukan agar penurunan tekanan yang terukur benar-benar merepresentasikan adanya kebocoran.

8.3 Metode dan Prinsip Pendeteksian Kebocoran.

Dalam pengujian kebocoran, berbagai metode digunakan untuk mendeteksi adanya celah, retak, atau pori pada material maupun sambungan. Pemilihan metode uji sangat dipengaruhi oleh sifat fluida atau gas yang digunakan, kondisi tekanan, serta sensitivitas yang dibutuhkan. Tabel 8.1 merangkum hubungan antara teori fisika, metode pengujian, dan cara kebocoran dapat

dideteksi, sehingga memudahkan pemahaman konsep dan penerapan uji kebocoran secara praktis.

Pelaksanaan pengujian kebocoran dimulai dengan menyiapkan objek uji agar dalam kondisi bersih dan tertutup rapat. Sistem kemudian diisi dengan fluida, baik berupa cairan maupun gas, sesuai metode yang digunakan. Setelah itu, tekanan internal diberikan menggunakan pompa sehingga fluida menekan seluruh bagian sistem. Selama pengujian, permukaan, sambungan, dan titik-titik kritis objek diamati secara seksama untuk mendeteksi tanda-tanda kebocoran, seperti keluarnya cairan (Gambar 8.2 a), terbentuknya gelembung (Gambar 8.2.b), atau penurunan tekanan gas (Gambar 8.2.c). Jika ditemukan kebocoran, lokasi, ukuran, dan sifatnya dicatat untuk evaluasi lebih lanjut. Setelah pengujian selesai, sistem dikembalikan ke kondisi awal dengan membuang atau mengeluarkan fluida, dan dilakukan pembersihan.

Tabel 8.1. Teori dan Penerapan Metode Pendeteksian Kebocoran

Teori Fisika	Prinsip Dasar	Teknik Pengujian Kebocoran	Indikasi Kebocoran	Catatan / Kelebihan
Hukum Pascal	Tekanan pada fluida tertutup diteruskan sama besar ke segala arah	<i>Pressure test</i> dengan fluida atau gas pada sistem tertutup	Fluida keluar melalui celah, retakan, atau pori	Sederhana, cepat, cocok untuk tekanan rendah hingga sedang
Tekanan Hidrostatik	Tekanan cairan meningkat seiring kedalaman ($P = \rho gh$)	<i>Hydrostatic leak test</i> dengan kolom cairan	Cairan atau gelembung muncul di lokasi kebocoran	Sangat akurat untuk deteksi kebocoran kecil, aman untuk tekanan tinggi

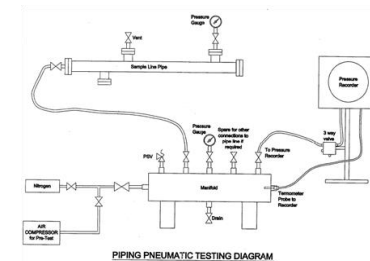
Hukum Boyle	Pada suhu tetap, $P \times V = \text{konstan}$	<i>Pressure decay test</i>	Penurunan tekanan gas seiring waktu	Sensitif, cocok untuk kebocoran gas halus, cepat dalam sistem tertutup
Hukum Gas Ideal ($PV = nRT$)	Hubungan tekanan, volume, jumlah gas, dan suhu	Vacuum test,	Perubahan tekanan atau konsentrasi gas menunjukkan kebocoran	Dapat mendeteksi kebocoran sangat kecil, mendukung pengujian presisi tinggi



(a) Keluarnya Gas (.www.generon.com)



(b) Adanya Gelembung (shutterstock.com)



(c) Penurunan Tekanan (inyukatraining.wordpress.com)

Gambar 8.2 Indikasi Kebocoran Telihat Pada Keluarnya Gas (a), Adanya Gelembung (b) Dan Ada Penurunan Tekanan (c)

8.4 Standar

Pelaksanaan uji kebocoran mengacu pada standar internasional yang memberikan pedoman mengenai metode, prosedur, dan kriteria evaluasi kebocoran. Beberapa standar yang umum digunakan antara lain:

1. ISO 20485 – *Leak testing — General principles and vocabulary for leak testing of components and assemblies.*
2. ISO 20486 – *Leak testing — Methods for determination of leakage rate of components and assemblies.*
3. ASTM E515 / ASTM E493 – *Standard Test Methods for Leaks Using Helium, Air, or Other Tracer Gases.*

8.5 Latihan Soal

Sub bab ini menyajikan latihan soal untuk menguji pemahaman mahasiswa terkait pengujian kebocoran. Soal-soal yang diberikan mencakup aspek teori, prinsip fisika, metode pengujian, dan interpretasi hasil.

Soal 1

Sebuah bejana tertutup diisi cairan dan diberi tekanan internal. Berdasarkan Hukum Pascal, tekanan akan:

- A. Menurun ke bagian bawah bejana
- B. Hanya bekerja di dekat sumber tekanan
- C. Diteruskan sama besar ke seluruh bagian bejana
- D. Hilang seiring waktu

Jawaban: C

Soal 2

Jika kolom air setinggi 10 m digunakan untuk uji kebocoran pipa, tekanan di dasar pipa ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$) adalah:

- A. 9,8 bar
- B. 0,98 bar
- C. 98 bar
- D. 1 bar

Jawaban: B

Soal 3

Dalam uji pressure decay, sebuah tabung memiliki volume tetap. Jika tekanan turun, ini menunjukkan:

- A. Temperatur meningkat
- B. Volume gas berkurang karena kebocoran
- C. Tekanan bertambah karena kompresi
- D. Sistem tertutup sepenuhnya

Jawaban: B

Soal 4

Dalam gas tracer test, Hukum Gas Ideal digunakan untuk:

- A. Mengukur warna gas

- B. Menghubungkan tekanan, volume, jumlah gas, dan temperatur untuk mendeteksi kebocoran
- C. Mengukur berat jenis cairan
- D. Menentukan viskositas gas

Jawaban: B

Soal 5

Manakah pernyataan yang benar terkait metode pressure decay dan hydrostatic test?

- A. Keduanya menggunakan gas sebagai media utama
- B. Pressure decay sensitif terhadap kebocoran kecil, hydrostatic test sensitif terhadap kebocoran besar
- C. Hydrostatic test digunakan untuk sistem vakum
- D. Pressure decay tidak mengukur tekanan

Jawaban: B

Daftar Pustaka

- Fox, R. W., McDonald, A. T., & Pritchard, P. J., 2015, Introduction to Fluid Mechanics, Edisi ke-8, 2015, Wiley.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M., 2018, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. Edisi ke-4, 2018, McGraw-Hill.
- White, F. M. 2016, Fluid Mechanics Edisi ke-8, 2016, McGraw-Hill.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. 2014, Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Edisi ke-8, 2014, Wiley.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. 2015, Thermodynamics: An Engineering Approach Edisi ke-8, 2015, McGraw-Hill.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., & Van Wylen, G. J., 2017, Fundamentals of Thermodynamics Edisi ke-9, 2017, Wiley.

Hansen, H. N., 1999, Industrial Leak Testing, 1999, Marcel Dekker.

<https://www.generon.com/nitrogen-leak-test-how-to-pressure-test-with-nitrogen-gas-generon/>

https://www.shutterstock.com/search/leak-test?dd_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

<https://inyukatraining.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/08/pneumatictest.png>

BAB 9

Kode Etik Insinyur Indonesia

9.1 Pendahuluan

Berdasarkan Undang-Undang No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran, Insinyur maupun Insinyur Asing berkewajiban melaksanakan kegiatan keinsinyuran sesuai dengan keahlian mereka serta kode etik profesi insinyur. Kode etik ini ditetapkan sebagai pedoman tata laku profesi untuk menjamin kelayakan dan kepatutan Insinyur dalam menjalankan praktik keinsinyuran.

Selain itu, peraturan pemerintah yang terkait dengan bidang keinsinyuran diatur dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 25 Tahun 2019, yang merupakan pelaksanaan dari Undang-Undang No. 11 Tahun 2014.

Dalam menjalankan amanah Undang-Undang tersebut, Persatuan Insinyur Indonesia (PII) melakukan beberapa hal penting, antara lain menetapkan, menerapkan, dan menegakkan kode etik Insinyur. Hal ini memberikan Insinyur dan Insinyur Asing hak atas jaminan perlindungan hukum selama melaksanakan tugasnya sesuai dengan kode etik dan standar keinsinyuran. Untuk menegakkan kode etik profesi, PII membentuk Majelis Kehormatan Etik, yang berfungsi sebagai lembaga pengawas dan penegak kepatuhan terhadap etika profesi Insinyur.

Pengertian Kode Etik. Kode etik secara umum termasuk dalam norma sosial dan merupakan pola aturan atau tata cara yang dijadikan pedoman dalam berperilaku. Kode etik berfungsi untuk membimbing individu agar bertindak sesuai

dengan nilai-nilai moral, profesional, dan standar yang diterima dalam suatu profesi atau komunitas.

Kode etik disusun dengan beberapa tujuan utama, antara lain:

- Tujuan kode etik juga mencakup memastikan profesionalisme anggota profesi sehingga dapat memberikan jasa sebaik-baiknya kepada pemakai atau nasabah (*customer*)
- Kode etik juga berfungsi untuk melindungi nasabah (*customer*) dari tindakan yang tidak profesional.

9.2 Kode Etik Insinyur Kei-2021

Kode etik yang berlaku saat ini adalah Kode Etik Insinyur KEI 2021, yang ditetapkan melalui Ketetapan Kongres PII ke-XXII, No. 13/TAP-KONGRES/PII-XXII/XII/2021.

Kode Etik Insinyur Kei 2021 terdiri dari :

- Mukadimah
- Prinsip Dasar
- Aturan Praktik
- Tatalaku Insinyur

9.2.1 Mukadimah

Pada mukadimah Kode Etik Insinyur KEI 2021 dinyatakan bahwa, berkat rahmat Tuhan Yang Mahakuasa, keinsinyuran berbasis kecendekiaan merupakan profesi yang penting dan terhormat, serta memiliki dampak langsung terhadap kualitas hidup manusia. Oleh karena itu, profesi keinsinyuran harus didedikasikan untuk melindungi keamanan, keselamatan, kesehatan, dan kemaslahatan masyarakat.

Mukadimah juga menegaskan bahwa praktik keinsinyuran mempersyaratkan kejujuran, ketidakberpihakan,

kewajaran, kesetaraan, dan keadilan. Dengan demikian, seorang insinyur wajib berpijak pada prinsip-prinsip perilaku etis serta memegang standar integritas tertinggi dalam melaksanakan tugas profesinya.

9.2.2 Prinsip Dasar

Pelanggaran terhadap kode etik profesi dapat terjadi jika seorang insinyur tidak menjalankan prinsip-prinsip berikut:

- Mengutamakan keluhuran budi, keamanan, keselamatan, kesehatan, dan kemaslahatan masyarakat serta lingkungan.
- Berpraktik hanya di bidang kompetensinya.
- Menyampaikan pendapat kepada publik secara objektif dan berdasarkan kebenaran menyeluruh.
- Bertindak sebagai pihak yang jujur dan dapat dipercaya terhadap Pemberi Tugas atau Pemberi Pekerjaan.
- Menghindari perbuatan yang menyesatkan atau menipu.
- Seorang insinyur wajib berperilaku terhormat, penuh tanggung jawab, berbudi luhur, dan taat hukum untuk menjunjung tinggi martabat, reputasi, dan kegunaan profesi.

9.2.3. Aturan Praktik

Aturan Praktik terdiri dari beberapa bagian yaitu :

1. Mengutamakan keluhuran budi, keamanan, keselamatan, kesehatan, dan kemaslahatan masyarakat serta lingkungan
2. Berpraktik hanya di bidang kompetensinya
3. Menyatakan pendapat kepada publik hanya secara objektif dan berdasarkan kebenaran menyeluruh
4. Bertindak sebagai pihak yang jujur dan dapat dipercaya kepada Pemberi Tugas atau Pemberi Pekerjaan
5. Menghindari perbuatan yang mengelabui

9.2.4 Tatalaku Insinyur

Tatalaku Insinyur secara garis besar terdiri dari

1. Seorang insinyur harus berpedoman pada standar kejujuran dan integritas tertinggi dalam seluruh hubungan profesionalnya.
2. Seorang insinyur harus berupaya keras untuk selalu mengutamakan dan melayani kepentingan public
3. Seorang insinyur harus menghindari perilaku atau praktik yang menyesatkan atau menipu publik.
4. Seorang insinyur tidak boleh, tanpa persetujuan para pihak, membocorkan informasi bisnis atau proses teknis yang bersifat konfidensial milik Pemberi Tugas, Pemberi Pekerjaan saat ini atau sebelumnya, maupun lembaga publik tempatnya mengabdikan..
5. Seorang Insinyur tidak boleh dipengaruhi oleh benturan kepentingan dalam tugas profesinya.
6. Seorang Insinyur tidak boleh berusaha memperoleh pekerjaan atau peningkatan kariernya dengan cara mengkritisi reputasi rekan sejawat secara tidak jujur atau dengan cara lain yang tidak benar.
7. Seorang insinyur tidak boleh mencederai reputasi, karier, atau pekerjaan rekan sejawatnya secara langsung atau tidak langsung dengan niat jahat atau cara yang tidak benar. Insinyur yang meyakini adanya praktik yang melanggar etika atau hukum melaporkannya kepada pihak yang terkait untuk ditindaklanjuti.
8. Seorang insinyur harus bertanggung jawab secara pribadi atas kegiatan profesinya. Namun, Insinyur dapat mencari asuransi ganti rugi untuk praktiknya kecuali dalam hal pelanggaran berat, di mana kepentingan Insinyur tidak dilindungi

9. Seorang insinyur harus mengakui hasil karya Keinsinyuran orang lain dan menghormati kepemilikan intelektual orang lain.

9.3 Pelanggaran Kode Etik Profesi

Pelanggaran terhadap kode etik profesi dapat terjadi melalui tindakan-tindakan berikut:

- Pelanggaran terhadap perbuatan yang tidak mencerminkan respek terhadap nilai-nilai yang seharusnya dijunjung tinggi oleh profesi.
- Pelanggaran terhadap pelayanan jasa profesi yang kurang mencerminkan kualitas keahlian dan sulit dapat dipertanggung jawabkan menurut kriteria profesional
- Mendiadakan terjadinya pelanggaran etika profesi yang dilakukan oleh rekan seprofesinya dengan dalih melindungi kehormatan, masa depan dan turunya kredibilitas profesi
- Konflik kepentingan, situasi dimana seorang pejabat/ karyawan/ profesional mempunyai kepentingan pribadi cukup besar untuk mempengaruhi tindakan obyektif dari pelaksanaan tugasnya.

9.4 Kesimpulan

Insinyur maupun Insinyur Asing berkewajiban melaksanakan kegiatan keinsinyuran sesuai dengan keahlian mereka dan kode etik profesi insinyur, yang ditetapkan sebagai pedoman tata laku untuk menjamin kelayakan dan kepatutan dalam menjalankan praktik keinsinyuran,

9.5 Latihan soal

Soal 1

Undang-Undang yang menjadi dasar pengaturan praktik keinsinyuran di Indonesia adalah ...

- A. UU No. 25 Tahun 2019
- B. UU No. 11 Tahun 2014
- C. UU No. 13 Tahun 2021
- D. UU No. 22 Tahun 2019

Jawaban: B

Soal 2

Peraturan Pemerintah yang merupakan pelaksanaan dari Undang-Undang No. 11 Tahun 2014 tentang Keinsinyuran adalah ...

- A. PP No. 11 Tahun 2014
- B. PP No. 22 Tahun 2020
- C. PP No. 25 Tahun 2019
- D. PP No. 13 Tahun 2021

Jawaban: C

Soal 3

Berikut ini yang termasuk bagian dari Kode Etik Insinyur KEI 2021 adalah ...

- A. Mukadimah, Prinsip Dasar, Aturan Praktik, Tatalaku Insinyur
- B. Pendahuluan, Standar Kerja, Sanksi, Penutup
- C. Visi, Misi, Tujuan, Evaluasi
- D. Prinsip Moral, Undang-Undang, Sanksi Pidana, Penutup

Jawaban: A

Soal 4

Salah satu prinsip dasar dalam Kode Etik Insinyur adalah ...

- A. Berpraktik di semua bidang untuk memperluas pengalaman

- B. Mengutamakan keuntungan pribadi dalam setiap pekerjaan
- C. Menyampaikan pendapat kepada publik secara objektif dan berdasarkan kebenaran menyeluruh
- D. Mengutamakan kepentingan pemberi tugas dibanding kepentingan publik

Jawaban: C

Soal 5

Berikut ini yang termasuk contoh pelanggaran kode etik profesi adalah ...

- A. Melaporkan praktik yang melanggar etika kepada pihak terkait
- B. Menghindari benturan kepentingan dalam tugas profesi
- C. Mendingkan pelanggaran etika rekan seprofesi demi menjaga nama baik
- D. Mengakui hasil karya keinsinyuran orang lain

Jawaban: C

Daftar Pustaka.

Dody Prayitno, 2025, “Kode Etik Dan Etika Profesi Insinyur Oleh (Prof. Dr. Ir. Zuprizal., DEA., IPU., Asean Eng), Majelis Kehormatan Etik Persatuan Insinyur Indonesia” Laporan Tugas Kuliah Umum, Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknologi Industri Universitas Trisakti, 2024/2025