

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

Saat ini pengelasan menjadi hal yang sangat dibutuhkan pada dunia keteknikan atau industri. Oleh karena itu dalam perkembangan ilmu pengelasan beberapa ahli menemukan metode-metode pengelasan untuk meningkatkan hasil lasan, berikut definisi pengelasan. Menurut *Deutsche Industrie Normen (DIN)*, pengelasan merupakan suatu penyatuan logam melalui ikatan metalurgi paduan yang dilakukan dalam keadaan cair. Dengan kata lain, pengelasan merupakan teknik untuk menyambung logam secara permanen di area tertentu dengan menggunakan energi panas untuk melelehkan logam yang akan disambung, dan dapat dilakukan dengan atau tanpa tekanan dan kawat las. Sedangkan menurut *American Welding Society (AWS)*, pengelasan ialah teknik penggabungan material, baik logam maupun non-logam, yang dilakukan dengan cara memanaskan kedua material hingga mencapai temperatur tertentu, umumnya hingga mencapai titik cair dengan atau tanpa menggunakan tekanan diikuti dengan penambahan atau tanpa penambahan logam pengisi (*filler metal*).

Aplikasi teknik pengelasan digunakan dalam berbagai bidang konstruksi yang cukup luas meliputi konstruksi pipa saluran minyak, gas dan air, jembatan, transportasi, rangka baja serta pada perkapalan dan banyak lainnya. Selain fungsi utama pengelasan sebagai proses penyambungan, pengelasan juga digunakan dalam proses pemotongan dan proses reparasi. Penggunaan teknik pengelasan

untuk proses penyambungan logam dinilai paling ekonomis dibandingkan dengan metode penyambungan logam lain. Pada proses pengerjaan suatu fabrikasi teknik pengelasan memberikan keuntungan dari aspek teknologi maupun aspek ekonomisnya. Secara umum proses pengelasan dapat diklasifikasikan berdasarkan cara kerja ataupun berdasarkan sumber energi yang terlibat didalamnya. Adapun proses pengelasan berdasarkan cara kerja dapat dibagi menjadi tiga bagian; pengelasan cair (*fusion welding*) merupakan pengelasan dengan memanaskan sambungan hingga pada titik leburnya dengan menggunakan sumber panas dari busur listrik ataupun dari semburan api gas yang terbakar. Pengelasan tekan (*diffusion bonding*) ialah pengelasan dengan menyambungkan dengan cara sambungan dipanaskan lalu ditekan hingga tersambung. Terakhir, pematrian (*soldering*) merupakan teknik pengelasan yang tidak menyebabkan logam induk cair karena cara pengelasan pada teknik ini dengan mengikat sambungan dengan menggunakan paduan logam yang memiliki titik cair rendah. Pengelasan berdasarkan sumber energi dapat terbagi menjadi beberapa jenis yaitu *Gas Welding*, *Arc Welding*, *Resistance Welding*, *Solid State Welding*, *Thermo-chemical Welding*, dan *Radiant Energy Welding*.

2.2 Jenis Cacat Las

Cacat pada hasil lasan dapat ditimbulkan oleh suatu keadaan seperti keadaan selama proses pengelasan dan keadaan parameter pengelasan yang tidak tepat. Cacat atau *defect* merupakan suatu ketidakraturan atau diskontinuitas yang timbul selama proses pengelasan logam yang sudah di luar batas standar yang diterima serta karena hal tersebut pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan pada kualitas

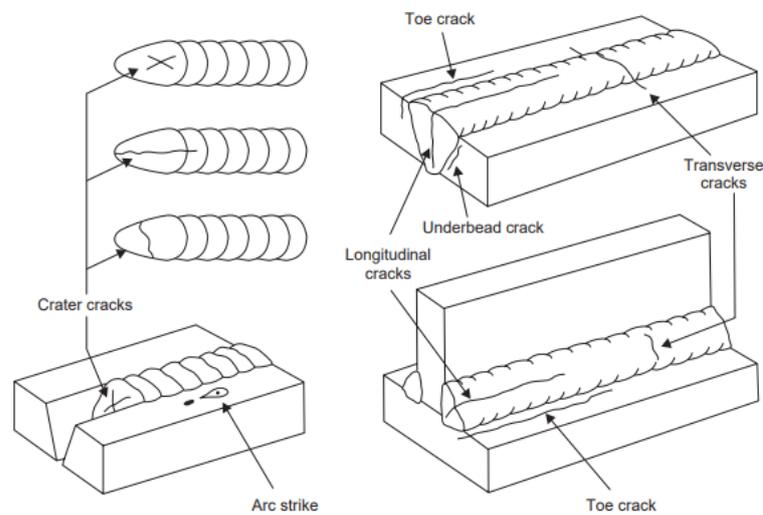
logam (Singh, 2018). Ada beberapa faktor umum yang dapat menimbulkan cacat pada hasil lasan sebagai berikut:

- a. Kondisi lingkungan yang buruk
- b. Parameter atau pengaplikasian pengelasan ada yang salah
- c. Kombinasi yang salah antara logam pengisi (*filler metal*) dengan logam induk (*base metal*)

2.2.1 Cacat Retak

Retak merupakan cacat yang terjadi di bagian dalam las ataupun di bagian permukaan serta retak ini muncul juga pada area yang bertemperatur tinggi ataupun berada di bawah tegangan. Cacat retak terjadi ketika *weld bead* pada tahap akhir pematatan tidak memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan tekanan kontraksi yang dihasilkan saat kolam las memadat. Selain itu, faktor-faktor yang meningkatkan risikonya adalah ukuran atau bentuk manik las yang tidak memadai, pengelasan di bawah tekanan tinggi, sifat material seperti kandungan pengotor yang tinggi atau penyusutan yang relatif besar pada pematatan. Langkah pencegahan untuk meminimalisir terjadi cacat retak adalah dengan mengontrol kesesuaian sambungan untuk mengurangi gap, membersihkan semua pengotor dari material, memilih parameter dan teknik pengelasan untuk menghasilkan *weld bead* dengan rasio kedalaman dan lebar yang memadai, memastikan *weld bead* memiliki ketahanan yang cukup terhadap tekanan pematatan, dan menghindari kecepatan pengelasan yang tinggi (pada tingkat arus yang tinggi) yang meningkatkan jumlah segregasi dan tingkat tegangan pada *weld bead*. Pada Gambar 2.1 menunjukkan jenis-jenis retak pada proses pengelasan. Jenis

pertama retak *underbead* ialah retak yang terjadi akibat adanya hidrogen yang terjebak dan biasanya terjadi pada material baja. Retak *Toe* terjadi diakibatkan *hot cracks* pada garis atau batas fusi. Retak *Crater* ialah retak penyusutan akibat penghentian busur yang tiba-tiba. Pada jenis cacat retak terdapat tiga kelas utama *cracks* yaitu *hot cracks*, *cold cracks* dan *microfissures*.

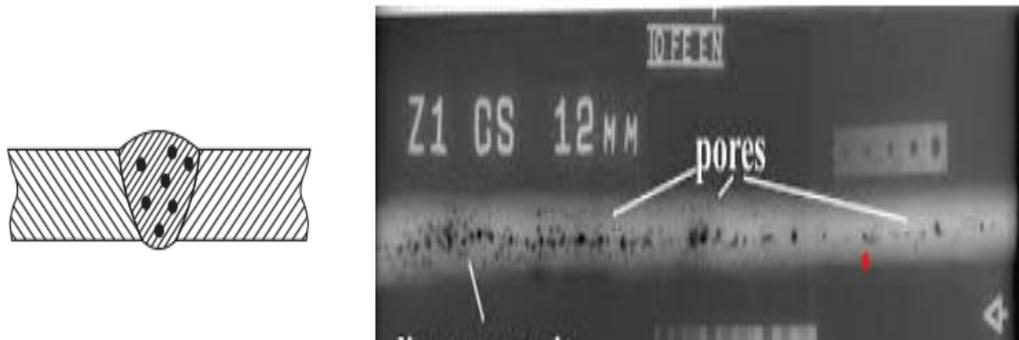


Gambar 2.1 Jenis cacat retak (Khan, 2007)

2.2.2 Cacat Porositas

Porositas merupakan jenis cacat dimana pada area yang dilas terdapat sekumpulan *void* atau gelembung gas akibat terperangkap pada saat proses pembekuan terjadi terlalu cepat dan tampak seperti bentuk bulat seperti terlihat pada Gambar 2.2. Porositas dalam pengelasan disebabkan karena perubahan metalurgi yang terjadi selama pengelasan dalam logam las (D. Hadzihafizovic, 2022). Adapun beberapa penyebab dari timbulnya porositas adalah deoksidan yang kurang, kandungan sulfur yang tinggi pada logam induk, pada *fluks* terdapat kandungan air yang tinggi, terlalu

minimnya gas pelindung, *travel speed* pengelasan yang terlalu tinggi, dan arus pengelasan yang terlalu rendah membuat logam cair mengalami pembekuan cepat. Adapun pencegahan yang dapat dilakukan adalah elektroda yang digunakan tidak lembab agar bebas uap air, membersihkan permukaan benda yang akan disambung, dan arus pengelasan menggunakan prosedur dari produsen elektroda. Secara umum, porositas pengelasan terbagi empat jenis yaitu porositas yang tersebar, porositas linier, porositas seragam, dan porositas lokal (D. Hadzihafizovic, 2022).



Gambar 2.2 Cacat porositas (D. Hadzihafizovic, 2022)

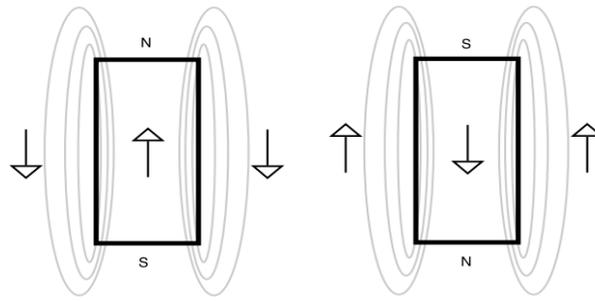
2.3 *Eddy Current Testing*

Eddy current testing merupakan salah satu teknik nondestructive (NDT) yang banyak digunakan untuk inspeksi material konduktif listrik pada kecepatan sangat tinggi tanpa memerlukan kontak antara benda uji dengan sensor (García-Martín, 2011). Prinsip kerja pengujian arus eddy berlandaskan pada interaksi antara arus listrik dan medan magnet. Metode arus eddy ini merupakan teknik inspeksi tanpa merusak berbasis elektromagnetik untuk menemukan retak di permukaan maupun kerusakan internal pada berbagai material konduktif, baik material

feromagnetik maupun non-feromagnetik. Uji arus eddy tidak hanya digunakan untuk mendeteksi retak, tetapi dapat digunakan juga diberbagai macam inspeksi lainnya seperti mendeteksi cacat permukaan (*surface*) maupun cacat dalam (*sub-surface*), mengukur ketebalan *non-conductive coating*, serta dapat mengukur konduktivitas. Konduktivitas suatu material bergantung pada komposisi dan perlakuan panas yang diterimanya. Oleh karena itu, metode arus eddy juga dapat dimanfaatkan untuk membedakan antara material murni dan komposisi paduan, Menentukan kekerasan spesimen setelah perlakuan panas. (Ghoni *et al.*, 2014).

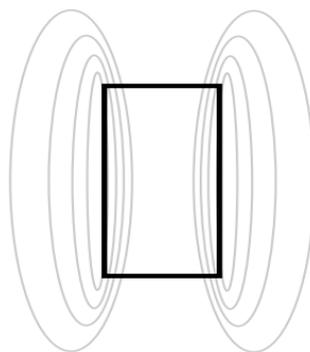
2.3.1 Kemagnetan

Kemagnetan merupakan suatu gaya mekanis tarik-menarik atau tolak-menolak. Pada kemagnetan terdapat istilah polaritas yaitu kedua ujung material memiliki sifat yang bertolak belakang. Dari hal tersebut maka ujung-ujung magnet disebut kutub, ada kutub utara (N) dan kutub selatan (S). Magnet memiliki medan gaya yang dapat divisualisasikan sebagai sejumlah *loop* tertutup yang mengalir melalui magnet, mengelilingi di sekitar bagian luar magnet, dan kemudian masuk kembali ke magnet di ujung yang lain yang dapat dilihat pada Gambar 2.3. *Loop* pada magnetik disebut garis gaya atau garis fluks. Kata "fluks" memiliki arti "mengalir" dan berkaitan dengan fakta bahwa garis gaya mengalir dari utara ke kutub selatan di sekitar bagian luar magnet, dan dari selatan ke kutub utara di dalam magnet.



Gambar 2.3 Arah medan magnet (Helier, 2003)

Sifat yang dimiliki oleh medan magnet adalah kerapatan fluks magnet, intensitas medan magnet, fluks total, dan magnetisasi (Mansor, et al., 2015). Medan magnet adalah area di sekitar magnet yang masih memiliki pengaruh kekuatan magnetnya. Semakin jauh jarak dari magnet, semakin lemah gaya magnet tersebut. Intensitas medan tergantung pada kerapatan fluks. Densitas atau kerapatan fluks paling tinggi berada pada inti magnet dan di kutub. Berdasarkan hukum kuadrat terbalik kerapatan akan berkurang dengan jarak dari magnet yaitu kerapatan fluks berbanding terbalik dengan kuadrat jarak dari kutub magnet, seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Distribusi kerapatan fluks (Helier, 2003)

Medan magnet adalah besaran yang memiliki arah dan besar. Besarnya medan magnet dipengaruhi oleh dua hal, yaitu intensitas magnetik

dan induksi magnetik. Intensitas magnetik (H^{\rightarrow}) adalah besaran yang menunjukkan gaya magnet yang bekerja pada muatan listrik bergerak. Semakin besar intensitas magnetik, semakin besar gaya magnet yang bekerja pada muatan listrik bergerak tersebut. Induksi magnetik (B^{\rightarrow}) adalah besaran yang menunjukkan arah dan besar medan magnet. Semakin besar induksi magnetik, semakin besar medan magnet tersebut. Hubungan antara intensitas magnetik dan induksi magnetik adalah sebagai berikut:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana:

B^{\rightarrow} = Induksi magnetik (weber/m² atau Tesla)

H^{\rightarrow} = Intensitas magnetik (Watt/m²)

μ_0 = Permeabilitas ruang kosong ($4\pi \times 10^{-7}$ Wb/A.m)

Medan magnet pada konduktor merupakan aliran listrik yang melewati sebuah konduktor yang akan menghasilkan medan magnet yang berbentuk lingkaran dengan garis-garis magnet yang membentuk *loop* dan tidak melewati sepanjang konduktor tersebut. Arah dari rotasi medan magnet bergantung pada arah aliran listrik yang melewati konduktor dengan menghasilkan medan magnet yang tegak lurus yang akan semakin kuat mendekati pusat dari konduktor yang menghasilkan aliran listrik. Hal tersebut dikarenakan garis fluks yang melewati *loop* menjadi lebih lemah ketika jarak *loop* dari konduktor semakin jauh. Induksi magnet, induksi terjadi ketika fluks magnetik yang bergerak membuat garis-garis magnetik yang memotong, konduktor mendorong elektron bebas dalam konduktor

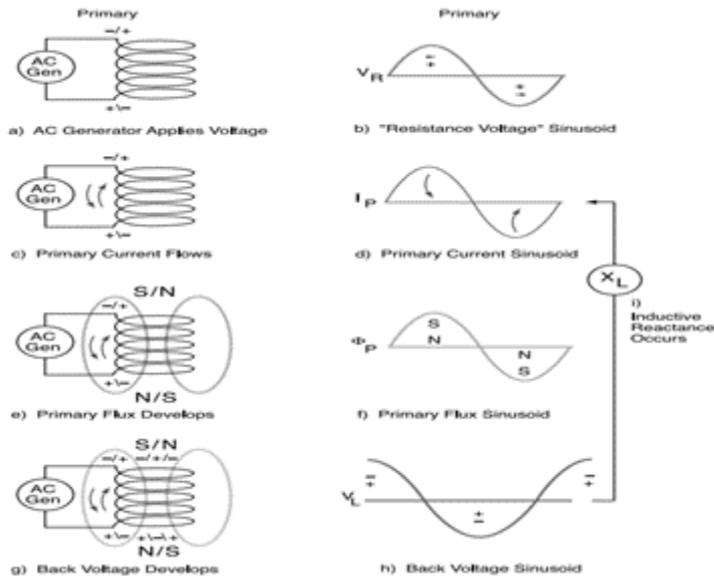
untuk mengalir, sehingga menghasilkan arus. Generator menghasilkan arus listrik melalui gerakan mekanis. Ketika konduktor bergerak di dalam medan magnet, konduktor tersebut akan menghasilkan tegangan dan energi listrik. Hal ini disebabkan oleh perubahan fluks magnetik yang menginduksi tegangan pada konduktor. Kemudian, tanpa adanya gerakan mekanis, arus tidak akan muncul. Gerakan tersebut penting untuk memastikan garis-garis medan magnet memotong konduktor secara tegak lurus. Pemotongan ini dapat terjadi melalui pergerakan medan magnet ataupun konduktor itu sendiri (Bowler, 1999).

2.3.2 Induksi Elektromagnetik

Jenis arus bolak-balik (AC) digunakan pada metode *magnetic induction tomography* (MIT) dimana arus mengalir secara terus-menerus. Ilustrasi dari sifat arus AC digambarkan dengan kurva sinus, arus akan memulai siklusnya pada posisi amplitudo sebesar nol, dan akan naik hingga puncak lalu akan kembali ke titik nol lagi. Terjadi kenaikan lagi hingga puncak dengan arah berbeda dan akan ke titik nol lagi untuk menyempurnakan siklus.

Tegangan bolak-balik pada koil terbentuk adanya pembangkit arus bolak-balik (Gambar 2.5-a). Tegangan ini disebut dengan tegangan resistansi, V_R merupakan gaya untuk menggerakkan arus agar bisa melalui resistan kawat koil (Gambar 2.5-b). V_R menyebabkan arus I_p , mengalir sepanjang koil dan ada pada fasa dengan V_R (Gambar 2.5-d). Arus bolak-balik (AC) yang mengalir pada koil menimbulkan medan magnet primer Φ_p ,

di sekitar koil dan dalam satu fasa dengan V_R dan I_P (Gambar 2.5-f). Adanya induktansi diri disebabkan karena koil berada pada medan magnet yang dihasilkannya sendiri, dimana Φ_P menginduksi tegangan induksi V_L yang disebut dengan tegangan balik pada koil (Gambar 2.5-g).



Gambar 2.5 Proses induktansi diri (Helier, 2003)

Secara sederhana induktansi diri dapat diartikan sebagai efek dimana sebuah koil menginduksikan tegangan pada dirinya sendiri. Berdasarkan bunyi Hukum Faraday, besarnya tegangan induksi sebanding dengan laju fluks. Tegangan balik diinduksikan berbeda 90° dengan arus dan fluks (Gambar 2.5-h). Jika tegangan balik berbeda 90° dengan arus koil, maka tegangan balik akan menghambat perubahan aliran arus bolak-balik (Gambar 2.5-i), sehingga terjadilah reaktansi induktif. Reaktansi induktif bergantung pada desain koil dan frekuensi. Variabel yang mempengaruhi reaktansi induktif dapat digambarkan dengan persamaan:

$$X_L = 2 \pi f L \dots \dots \dots (2.2)$$

$$L = \mu_r \frac{N^2 x A}{l} x 1,26 x 10^{-6} \dots\dots\dots(2.3)$$

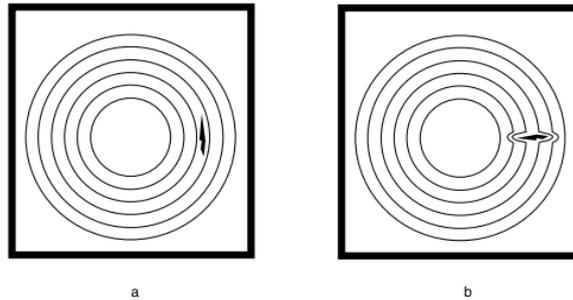
Dengan X_L adalah reaktansi induktif, f adalah frekuensi, L adalah induktansi koil, μ_r adalah permeabilitas relatif inti koil, N adalah jumlah lilitan, A adalah luas penampang koil, dan l adalah panjang koil.

Induktansi bersama atau *mutual inductance* merupakan fenomena dua kumparan yang berdekatan dapat saling memengaruhi. Ketika arus mengalir pada kumparan primer, fluks magnetik yang dihasilkan akan merambat ke kumparan sekunder. Fluks magnetik ini kemudian akan menginduksi medan magnet pada kumparan sekunder, dan menghasilkan tegangan serta arus pada kumparan tersebut. Fluks medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan primer akan menginduksi GGL pada kumparan sekunder. Sedangkan tegangan pada induktansi bersama muncul ketika arus yang mengalir di satu kumparan menghasilkan fluks magnetik yang menginduksi GGL pada kumparan lain.

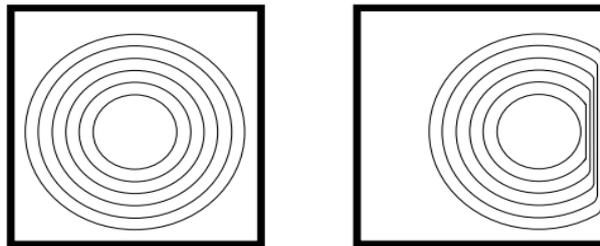
2.3.3 Karakteristik *Eddy Current*

Eddy current memiliki sifat aliran yang dipengaruhi oleh performa ujinya. Sifat *eddy current* saling ketergantungan dengan sifat fluks dan material uji sendiri. Ketika aliran *eddy current* tidak terganggu oleh keberadaan suatu cacat alirannya berbentuk melingkar. Bentuk arah pada *eddy current* ditentukan oleh arah koil, dengan memilih konfigurasi koil arah koil dapat dikontrol dan divariasikan untuk mendapatkan hasil optimum. Pendeteksian suatu cacat dengan metode *eddy current* berdasar pada seberapa besar aliran *eddy current* terdistribusi oleh cacat. Arah pada

cacat bisa mempengaruhi pada bisa tidaknya suatu cacat dideteksi, apabila arah cacat sejajar dengan *eddy current* maka kurang untuk bisa dideteksi (Gambar 2.6-a). Sedangkan jika arah cacat tegak lurus dengan *eddy current* untuk mendeteksi cenderung lebih mudah (Gambar 2.6-b).



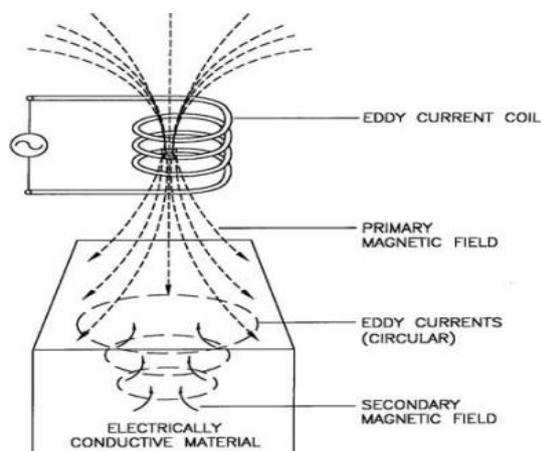
Gambar 2.6 Cacat pada aliran *eddy current* (Helier, 2003)



Gambar 2.7 Efek batasan material (a) *eddy current* tidak terganggu batasan material dan (b) *eddy current* memadat karena batasan material (Helier, 2003)

Jalur aliran *eddy current* melingkar apabila tidak terganggu oleh batasan-batasan cacat maupun material nonkonduktor (Gambar 2.7-a), jalur aliran *eddy current* akan berubah dan memampat menyesuaikan gangguan yang mengintrusi ke dalam alirannya (Gambar 2.7-b). Aliran *eddy current* akan berubah-ubah searah jarum jam maupun berlawanan jarum jam, hal itu dikarenakan *eddy current* terbentuk dari fluks medan magnet AC dan frekuensi perubahan fluks medan magnet akan merubah frekuensi arah *eddy*

current. Kerapatan *eddy current* bervariasi dalam material uji yaitu pertama, *eddy current* memiliki *skin effect*. Kerapatan arus maksimum pada permukaan material dan menurun secara eksponen dengan kedalaman. Kedua, fluks medan magnet bervariasi tergantung dengan diameter koil, sehingga penetrasi efektif *eddy current* terbatas pada diameter koil. Jika koil terlalu kecil, kerapatan arus pada suatu kedalaman akan lebih kecil dari persamaan *skin depth* yang telah diindikasikan. Ketiga, *eddy current* menunjukkan *phase lag* yang linear dengan kedalaman. Semakin dalam, aktivitas *eddy current* akan tertinggal (*delay*). Sinyal *phase lag* mengindikasikan kedalaman cacat dan ketebalan material. *Eddy current* memiliki keunikan dan *properties* yang menarik yaitu *eddy current* ialah arus induksi yang hanya ada dalam material penghantar listrik. *Eddy current* selalu dalam *loop* tertutup dan biasanya sejajar dengan gulungan koil seperti pada Gambar 2.8. Intensitas *Eddy current* tergantung pada sifat material, elektromagnetik *coupling* (*lift-off/fill-factor*) dan frekuensi eksitasi, namun maksimum pada permukaan.



Gambar 2.8 Eddy current testing (Chandra and Bhagi, 2014)

2.3.4 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

Prinsip terbentuknya gaya gerak listrik disebabkan karena adanya gaya listrik yang bekerja untuk menggerakkan elektron dalam konduktor. Apabila terjadi perubahan fluks dalam suatu loop maka dihasilkan gaya gerak listrik berupa tegangan induksi yang berbanding lurus dengan laju perubahan fluks (MIT, 2012). Ketika suatu konduktor bergerak dalam medan magnet, dan memotong garis-garis gaya magnet, maka akan muncul GGL induksi pada konduktor tersebut. Semakin cepat konduktor bergerak, semakin besar GGL induksi yang dihasilkan. Menurut Faraday bahwa GGL induksi yang dihasilkan pada kumparan berbanding lurus dengan kecepatan perubahan fluks magnetik yang menembus kumparan tersebut. Rumus fluks magnet untuk medan magnet yang tegak lurus dengan bidang adalah sebagai berikut:

$$\Phi = B \times A \dots\dots\dots (2.4)$$

Dimana Φ adalah fluks magnetik satuan Weber (Wb), B adalah induksi magnet satuan Tesla (T), dan A adalah luas bidang (m^2). Semakin cepat perubahan garis gaya magnet, maka semakin besar fluks magnetik yang dihasilkan. Hal ini juga berarti kekuatan magnetnya (diwakili oleh induksi magnetik) semakin besar. Pernyataan Michael Faraday atau hukum Faraday dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$E_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \dots\dots\dots (2.5)$$

$E_i = GGL$ induksi dengan satuan volt (V), $N =$ banyak lilitan, $\Delta\Phi =$ perubahan garis gaya magnet dengan satuan weber (Wb), dan $\Delta t =$ selang waktu dengan satuan sekon (s).

2.4 Frekuensi Resonansi

Dalam satu rangkaian seri R-L-C, arus yang terdapat dalam rangkaian bergantung pada nilai hambatan resistansi (R), induktansi (L) dan kapasitansi (C), sedangkan nilai impedansinya (Z) ditentukan oleh nilai resistansi dan kapasitansi. Tegangan sumber rangkaian seri RLC adalah suplai sinusoidal dalam keadaan steady state pada frekuensi tetap. Rangkaian seri RLC memiliki dua atau lebih sinyal sinusoidal yang dapat digabungkan menggunakan fasor dengan syarat memiliki frekuensi input yang sama. Ketika induktor dilalui arus bolak-balik (AC), induktor akan menghasilkan perlawanan yang disebut reaktansi induktif (X_L). Besarnya reaktansi ini bergantung pada dua faktor: nilai induktansi induktor itu sendiri dan frekuensi arus yang melewatinya. Dimana dari pengertian tersebut diperoleh persamaan (2.6) sebagai berikut.

$$X_L = 2\pi frL \dots \dots \dots (2.6)$$

Dimana, X_L adalah reaktansi induktif (Ω), fr adalah frekuensi resonansi (Hz), L adalah induktansi (H). Sementara itu, pada saat kapasitor dialiri arus AC, maka akan muncul reaktansi kapasitif (X_C) yang nilainya tergantung pada nilai kapasitansi dan frekuensi. Dimana dari pengertian tersebut diperoleh persamaan (2.7) sebagai berikut.

$$X_C = \frac{1}{2\pi frC} \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan keterangan X_c adalah reaktansi kapasitif dan C adalah kapasitansi koil. Frekuensi resonansi adalah titik temu di mana reaktansi induktif dan reaktansi kapasitif memiliki nilai yang sama. Penerapan resonansi ini bertujuan untuk memperkuat gelombang medan elektromagnetik dengan menyamakan frekuensi sinyal pengirim dan sinyal penerima, sehingga meningkatkan efisiensi transfer daya. Secara matematis besarnya frekuensi resonansi bisa dicari dengan persamaan berikut.

$$X_l = X_c \dots \dots \dots (2.8)$$

$$2\pi f r L = \frac{1}{2\pi f r C} \dots \dots \dots (2.9)$$

Dari persamaan (2.9) dapat diturunkan lagi untuk mencari nilai induktansi suatu induktor, kapasitansi suatu kapasitor, dan juga frekuensi resonansi, maka persamaannya menjadi seperti berikut.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f r^2 C} \dots \dots \dots (2.10)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 f r^2 L} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$f r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (2.12)$$

2.5 *Magnetic Induction Tomography*

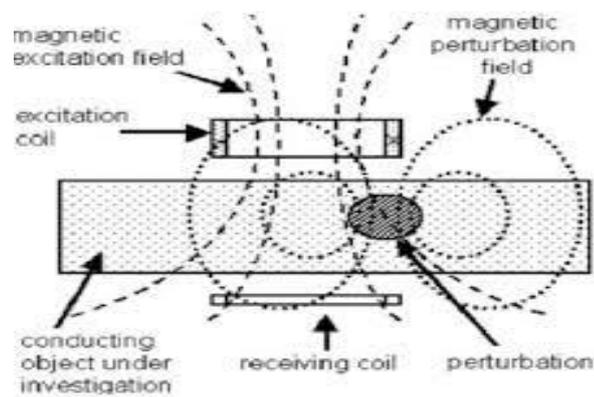
Magnetic induction tomography merupakan teknik *non-contacting* baru untuk visualisasi impedansi listrik. MIT menerapkan interaksi medan magnet yang beresilasi dengan media konduktif, yang disertai dengan eksitasi arus *eddy* (Griffiths, 2001). MIT memiliki pencitraan tomografi dengan frekuensi rendah dengan memetakan distribusi spasial ketiga parameter pasif elektrik objek yaitu

konduktivitas, permitivitas, dan permeabilitas. Keunggulan MIT dibandingkan dengan teknik tomografi yang lainnya adalah MIT dapat mencitrakan suatu objek tanpa bersentuhan dan tidak merusak objek itu sendiri. Pengaplikasian dari metode MIT digunakan pada bidang proses industri, geofisika, biomedis dan pengujian tidak merusak.

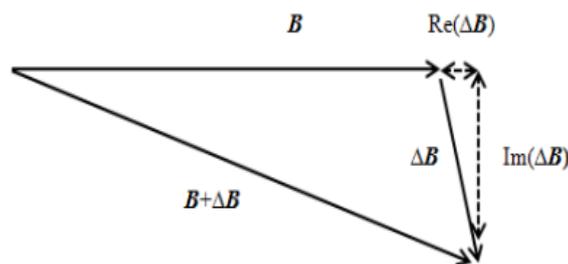
Prinsip-prinsip dasar MIT dapat dijelaskan dengan menggunakan induktansi timbal balik dasar dan teori arus *eddy*. Singkatnya, dengan melewati arus bolak-balik melalui satu atau lebih kumparan eksitasi, medan magnet primer dihasilkan yang menginduksi medan listrik yang dapat dideteksi oleh satu atau lebih kumparan pengukur. Dari medan listrik ini tegangan induksi kemudian dapat diukur. Jika benda konduktif ditempatkan dalam medan ini, arus *eddy* muncul, yang juga dapat menghasilkan medan magnet dikenal sebagai medan sekunder. Akibatnya, medan listrik pada kumparan pengukur diinduksi sebagian oleh medan primer dan sekunder. Oleh karena itu, tegangan induksi pada kumparan pengukur akan berbeda tergantung pada apakah ada objek konduktif di dalam medan. Jika tidak ada objek seperti itu, tegangan induksi muncul sepenuhnya karena medan primer, sedangkan jika ada objek, tegangan induksi muncul karena medan primer dan sekunder. Dengan menganalisis perbedaan tegangan induksi, berbagai sifat benda konduktif dapat direkonstruksi (Ma and Soleimani, 2017).

Pada Gambar 2.9 menunjukkan *eddy current* yang dihasilkan dari objek yang sedang diamati. Dalam aplikasi pengujian logam lasan, medan arus pusar akan berubah ketika konduktivitas jaringan diubah oleh cacat pada hasil lasan. Akibatnya sinyal pengukuran juga akan berubah yang dapat direfleksikan dengan

menganalisis sinyal ini. Prinsip induksi *eddy current* dari kumparan yang tereksitasi di MIT dapat digambarkan dengan diagram vektor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Ketika cacat porositas terpapar medan magnet eksitasi, B , jaringan menghasilkan arus eddy karena induksi elektromagnetik. *Eddy current* juga akan menginduksi gangguan medan magnet, ΔB , yang akan mengubah kekuatan dan distribusi spasial medan magnet eksitasi asli. $\Delta B + B$ dapat dideteksi menggunakan kumparan deteksi (Griffiths, 2001).



Gambar 2.9 Prinsip kerja MIT (Igney *et al.*, 2005)



Gambar 2.10 Representasi vektor medan magnet eksitasi, B , dan medan magnet gangguan, ΔB , (Griffiths, 2001).

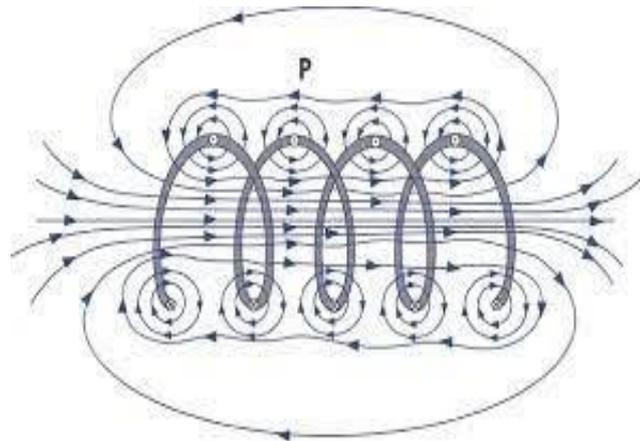
2.6 Sensor *Magnetic Induction Tomography* (MIT)

Sensor MIT merupakan alat yang digunakan untuk mengukur konduktivitas listrik, permeabilitas magnetik, dan konstanta dielektrik di dalam suatu objek.

Sensor MIT memiliki empat komponen utama, yaitu kumparan pemancar (*transmitter*), kumparan penerima (*receiver*), konektor arus kumparan, dan pelindung elektromagnetik (*electromagnetic screen*). Koil *transmitter* digunakan untuk membangkitkan medan magnet di area objek yang sedang diperiksa. Medan magnet ini dihasilkan oleh arus bolak-balik yang dihasilkan oleh pembangkit tegangan dan rangkaian LC. Arus bolak-balik ini kemudian diteruskan ke rangkaian penerima. Medan magnet yang dihasilkan oleh koil pemancar disebut medan magnet primer. Sedangkan koil *receiver* bertugas menangkap induksi resonansi magnetik dari koil *transmitter*. Secara umum, nilai yang dimiliki medan magnet primer lebih besar dari medan magnet sekunder. Medan magnet sekunder timbul karena adanya interaksi antara medan magnet primer dengan objek pengganggu. Medan magnet yang ditangkap oleh koil *receiver* berupa medan magnet primer dan sekunder dan ketika objek yang dipenetrasi berbeda maka nilai yang ditangkap akan berbeda pula. Hal tersebutlah yang membuat MIT bisa mendeteksi adanya anomali.

Salah satu jenis sensor MIT yang sering digunakan adalah sensor selenoida. Sensor selenoida merupakan sensor yang terdiri dari satu atau lebih kumparan kawat yang dililitkan dalam bentuk spiral atau silinder dan kawat tersebut dapat dialiri arus listrik. Dalam ilmu fisika, arus listrik yang dialirkan melalui kawat konduktor akan menimbulkan medan magnet di sekitar kawat tersebut. Hal yang sama juga terjadi pada solenoida, yaitu medan magnet dihasilkan dari kumparan kawat yang dialiri arus Listrik dan arah medan magnet yang ditimbulkan oleh solenoida tergantung pada arah arus yang mengalir. Medan magnet di dalam solenoida dihasilkan dari penjumlahan vektor medan magnet yang dihasilkan oleh

setiap lilitan. Semakin banyak jumlah lilitan, semakin besar resultan medan magnet yang dihasilkan. Arah medan magnet pada solenoida bergantung pada arah aliran arus listriknya. Untuk menentukan arah medan magnet tersebut, dapat menggunakan kaidah tangan kanan..



Gambar 2.11 Arah medan magnet pada solenoida (Giawa, et al., 2013)

Kinerja sensor MIT dalam menginspeksi terutama sensitivitas sensor dipengaruhi oleh beberapa parameter sebagai berikut:

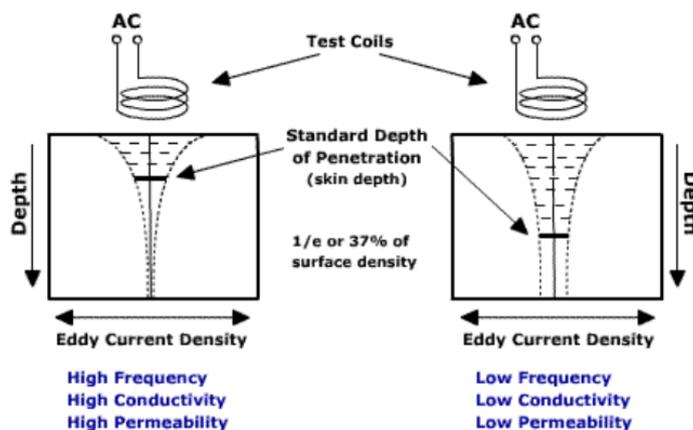
a. Desain Koil

Kemampuan penetrasi dan sensitivitas pengukuran arus eddy bergantung pada bentuk koil. Sedangkan diameter koil yang lebih besar menghasilkan penetrasi arus eddy yang lebih dalam dan pengukuran yang lebih sensitive. Untuk mendapatkan sensitivitas yang baik, diameter koil harus lebih kecil daripada panjang atau besar diskontinuitas yang akan diuji. Hal ini berarti ukuran koil tidak boleh lebih besar dari cacat atau diskontinuitas, karena semakin besar diameter koil semakin kecil sensitivitas sensor yang dimilikinya. (Yang, 2018).

b. *Skin Effect*

Arus eddy adalah arus induksi yang bersirkulasi pada bidang yang tegak lurus terhadap fluks magnetik. Arus ini biasanya bergerak sejajar dengan lilitan kumparan dan alirannya terbatas pada area medan magnet yang menginduksi. Arus eddy terkonsentrasi di dekat permukaan yang berdekatan dengan kumparan eksitasi dan kekuatannya berkurang dengan jarak dari kumparan. Kepadatan arus eddy menurun secara eksponensial dengan kedalaman, fenomena tersebut dikenal sebagai *skin effect* (ASNT, 2007). *Skin effect* muncul ketika arus eddy yang mengalir dalam benda uji pada kedalaman berapa pun menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan medan primer, sehingga mengurangi fluks magnet dan menyebabkan penurunan aliran arus seiring dengan bertambahnya kedalaman.

c. Frekuensi



Gambar 2.12 Hubungan frekuensi, konduktivitas dan permeabilitas (ASNT, 2007)

Respon arus eddy sangat berpengaruh dari frekuensi objek yang akan

diuji, karena ketika frekuensi berubah maka impedansi koil akan menyesuaikan terhadap perubahan frekuensi tersebut, dimana semakin besar nilai frekuensi yang diberikan maka nilai impedansi koil akan semakin besar. Semakin tinggi frekuensi maka semakin sensitif pembacaan, namun kemampuan penetrasi arus eddy terhadap material berkurang. Sebaliknya, semakin rendah frekuensi, maka semakin lemah sensitivitas pembacaan, namun kemampuan penetrasi arus eddy meningkat. Sehingga frekuensi optimal dapat ditentukan melalui percobaan.

2.6.1 Sifat-Sifat Listrik pada Sensor MIT

Pada sensor magnetik induksi terdapat sifat-sifat listrik yang berhubungan langsung dengan medan magnet adalah sebagai berikut:

a. Impedansi

Impedansi merupakan besaran yang menampilkan besarnya hambatan listrik yang dialirkan oleh suatu rangkaian pada arus listrik. Secara umum impedansi listrik dapat didefinisikan dengan hambatan total dari komponen-komponen yang ada pada suatu rangkaian listrik arus bolak-balik (AC) (Maulandari, 2018). Selain itu impedansi dapat dirumuskan dengan formula sebagai berikut:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana Z sebagai impedansi (Ω), R sebagai hambatan (Ω), X_L sebagai reaktansi induktif (Ω), dan X_C sebagai reaktansi kapasitif (Ω).

b. Resistivitas

Resistivitas adalah besaran yang menunjukkan seberapa besar hambatan listrik yang diberikan suatu bahan terhadap arus listrik (Wahyuningrum, 2013). Resistivitas juga bisa didefinisikan dengan rasio tegangan yang diberikan pada suatu material atau bahan dengan arus yang mengalir pada material tersebut. Resistivitas suatu material diartikan sebagai resistansi (hambatan material). Adapun secara matematis resistivitas dapat dirumuskan sebagai:

$$\rho = \frac{R \times L}{A} \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana ρ adalah resistivitas bahan (Ωm), R adalah hambatan bahan (Ω), L adalah panjang bahan (m), dan A adalah luas penampang bahan (m^2).

c. Permeabilitas magnetik

Permeabilitas merupakan kemampuan suatu material dalam memusatkan garis gaya magnet atau fluks magnet. Menurut satuan internasional, permeabilitas hampa udara (vakum) mempunyai nilai $4\pi \times 10^{-7}$ TmA. Besaran permeabilitas sebuah magnet bukan nilai yang pasti, melainkan berubah-ubah sesuai dengan kekuatan magnetisasi yang dikenakan (Lusyana, 2014). Persamaan permeabilitas dirumuskan sebagai berikut:

$$B = \mu H \dots\dots\dots(2.15)$$

$$\mu = \mu_0 \mu_r \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana μ = permeabilitas magnetik, B = induksi magnet, H = medan

magnet, $\mu_0 =$ permeabilitas ruang hampa ($4\pi \cdot 10^{-7}$ N/A²), dan $\mu_r =$ permeabilitas relatif. Ditinjau dari permeabilitas relatifnya, bahan dapat dikelompokkan dalam ferromagnetik, diamagnetik dan paramagnetik. Adapun nilai permeabilitas relatif dari material seperti baja adalah sebesar 1.26×10^{-4} H/m (Slodicka, 2021).

d. Konduktivitas Listrik

Suatu material yang memiliki kemampuan untuk mengalirkan arus listrik, dan kemampuan ini disebut konduktivitas atau daya hantar. Konduktivitas memiliki hubungan berbanding terbalik dengan hambatan. Material dengan hambatan tinggi memiliki konduktivitas rendah, dan material dengan hambatan rendah memiliki konduktivitas tinggi (Rais, 2015). Seperti udara memiliki nilai konduktivitas sebesar 3×10^{-15} S/m dan material seperti baja memiliki nilai konduktivitas sebesar 6.9×10^6 S/m. Konduktivitas dapat dihitung dengan persamaan berikut;

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana σ adalah konduktivitas (S/m) dan ρ adalah resistivitas (Ω m).