

BAB II

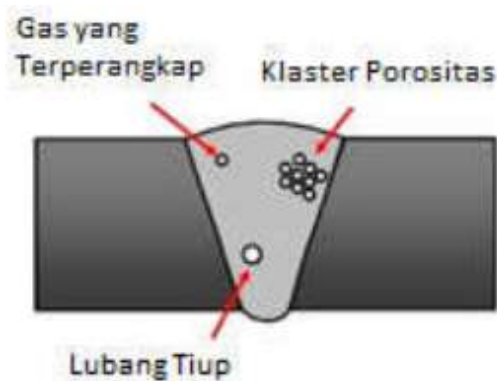
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan

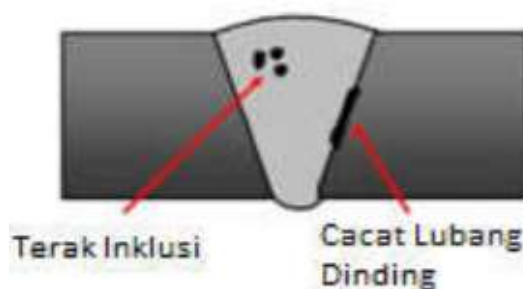
Pengelasan merupakan kegiatan menyambungkan dua buah logam atau lebih dengan cara memanaskan sampai suhu lebur dengan logam pengisi atau tanpa logam pengisi [3]. Sambungan yang dihasilkan dari proses pengelasan merupakan sambungan tetap atau permanen, karena untuk melepas sambungannya harus merusak benda tersebut. Sambungan las adalah sambungan yang terletak diantara dua atau lebih permukaan logam dengan cara dilakukan pemanasan lokal pada permukaan benda yang disambung. Kelebihan sambungan las dibandingkan sambungan baut dan mur atau sambungan keling (rivet) adalah biaya untuk pekerjaan dalam jumlah besar lebih murah, kemungkinan tidak ada sambungan yang longgar dan lebih tahan beban fatigue [4]. Pengelasan merupakan kegiatan yang sangat penting dilakukan pada industri fabrikasi untuk menyambungkan satu bagian kepada bagian lainnya agar menjadi satu produk utuh yang memiliki fungsi. Pengelasan tidak selalu sempurna dalam prosesnya, terdapat kemungkinan adanya ketidaksempurnaan pada hasil lasan. Adapun bentuk dari ketidaksempurnaan pada hasil lasan berupa cacat porositas ataupun inklusi.

Cacat pengelasan adalah ketidaksempurnaan yang ditemukan pada hasil pengelasan, hal tersebut akan mempengaruhi sifat mekanik dari suatu material seperti kekuatan material akan berbeda dengan hasil lasan yang tidak ada cacat. Terdapat banyak jenis cacat yang dapat ditemukan pada hasil lasan, namun ada beberapa jenis cacat yang umum atau kemungkinan terjadi pada hasil lasan meskipun seorang *welder* yang ahli sekalipun. Cacat yang umum ditemukan dan dapat dilakukan proses perbaikan pada hasil lasan diantaranya yaitu *porosity*, *slag inclusion* dan *incomplete penetration*. Selain itu, terdapat cacat pengelasan yang jika terjadi maka hasil lasan tidak dapat diperbaiki atau dikatakan *reject* yaitu hasil lasan yang terdapat *crack* atau retakan.

Porosity adalah salah satu jenis cacat pada lasan yang disebabkan karena adanya gas yang terjebak dalam jumlah yang banyak sehingga melebihi syarat batas pada daerah lasan. Beberapa penyebab terjadinya cacat *porosity* pada hasil lasan yaitu kondisi pengelasan yang lembab, kampuh las yang basah dan elektroda lembab. Jika ditemukan adanya cacat seperti ini pada hasil lasan dapat mengakibatkan sambungan las lemah, sehingga diperlukan cara penanggulangannya yaitu membuang bagian lasan yang terdapat cacat tersebut dengan cara mengamplas bagian cacat dan menambah lasan yang benar [5]. Berikut ini ilustrasi cacat *porosity*.



Gambar 2.1 Cacat *Porosity* [6]



Gambar 2.2 Cacat *Slag Inclusion* [6]

Slag inclusion adalah cacat yang terdapat pada hasil pengelasan berupa terak yang terperangkap di dalam lasan. Ilustrasi dari cacat *slag inclusion* ditunjukkan pada gambar 2.2, Hal ini dapat terjadi karena pembersihan yang dilakukan saat pengelasan yang berlapis kurang bersih, penggunaan flux pada pengelasan yang berlapis dan ampere yang digunakan pada saat pengelasan bagian root menggunakan ampere yang terlalu rendah. Adapun cara

mengatasi cacat seperti ini yaitu untuk sambungan yang kritis, daerah bagian cacat dipotong, kemudian dibentuk gap yang baik dan dilas kembali [5].

Incomplete Fusion adalah cacat pengelasan yang terjadi ketika *welder* tidak mengelas material secara akurat dan logam yang mengarah ke celah sudah mengeras sehingga celah tidak terisi dengan logam cair [7]. Menurut sumber lain, *Incomplete Fusion* merupakan sebuah hasil pengelasan yang tidak diinginkan karena ketidaksempurnaan proses penyambungan antara logam las dengan logam induk [8]. Cacat ini disebabkan karena ampere yang terlalu rendah, kampuh las sangat besar dan kecepatan menggerakkan elektroda terlalu cepat. Gambar dari cacat *incomplete fusion* dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Cacat *Incomplete Fusion* [7]

2.2 *Non-Destructive Test (NDT)*

Non-Destructive Test (NDT) adalah pengujian suatu material yang bertujuan untuk mencari cacat atau ketidaksempurnaan pada suatu benda dengan tidak merusak benda tersebut [4]. Tujuan dari NDT adalah untuk mendeteksi cacat dengan suatu prosedur tertentu pada suatu benda oleh seseorang yang khusus memiliki sertifikasi untuk melakukan pekerjaan tersebut. Hasil dari pengujian ini menentukan suatu bagian akan diganti atau diperbaiki tergantung dari jumlah cacat yang ada berdasarkan rujukan suatu standar [4]. NDT merupakan sarana penunjang yang sangat diandalkan untuk pengendalian dan penjamin mutu suatu hasil pengelasan [9]. NDT mempunyai banyak metode untuk proses pengujiannya, diantara metode

tersebut tidak ada yang paling bagus karena dari sekian banyak metode tersebut mempunyai keunggulan masing-masing yang tidak dimiliki oleh metode yang lainnya. NDT yang digunakan secara umum yaitu diantaranya *Radiography Test, Ultrasonic Test, Magnetic Test* dan *Penetrant Test*.

1. *Radiography Test*

Radiografi adalah salah satu pengujian tidak merusak yang menggunakan sinar X atau sinar gamma untuk mampu menembus hampir semua logam kecuali timbal dan material padat lainnya sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi cacat atau ketidaksempurnaan di balik bahan metal atau di dalam bahan itu sendiri. Pada aktivitas pengelasan, pengujian radiografi ini merupakan kegiatan yang sangat penting untuk menentukan mutu internalnya secara cepat sebelum melangkah ke jenis uji mutu lainnya. Radiografi menggunakan *penetrating radiation* yang diarahkan langsung pada material [9]. Berikut ini ilustrasi seseorang sedang melakukan proses pelaksanaan untuk pengujian *radiography test*.



Gambar 2.4 *Radiography Test*

Pada suatu industri yang bergerak di bidang fabrikasi hampir semua hasil pengelasan dilakukan pengujian *radiography test*. Pengujian ini dilakukan untuk melihat cacat pada hasil pengelasan secara detail dan jelas yang dapat dilihat melalui film. Akan tetapi, pengujian ini memiliki kelemahan yaitu resiko bahaya tubuh terpapar radiasi yang tinggi. Jenis cacat yang dapat dilihat dari hasil pengujian *radiography test* yaitu *incomplete fusion, incomplete penetration, porositas* dan *crack*.

2. *Ultrasonic Testing*

Ultrasonic testing merupakan salah satu metode pengujian dari NDT yang memanfaatkan media gelombang ultrasonik (gelombang suara) yang mempunyai frekuensi tinggi lebih dari 20 KHz. *Ultrasonic testing* dapat digunakan untuk mendeteksi dimensi benda kerja dan kecacatan atau porositas pada benda kerja [10]. Menurut sumber lainnya, *ultrasonic testing* memanfaatkan perambatan gelombang dengan frekuensi tinggi, berkisar 1 MHz sampai dengan 10 MHz. Gelombang ultrasonik menembus kedalam suatu bahan, kemudian gelombang ini akan memantul jika menemukan bidang pantul termasuklah cacat [11]. *Ultrasonic testing* mempunyai prinsip kerja yaitu dimana gelombang ultrasonic ini disorotkan ke permukaan bidang yang sedang di uji dengan garis lurus pada kecepatan konstan, kemudian gelombang tersebut dipantulkan lagi dari permukaan atau cacat benda uji tersebut. hal yang diperoleh gelombang suara tersebut akan tampil pada layar monitor berupa tampilan pulsa yang berfungsi untuk mendeteksi tebal serta cacat atau tidaknya benda tersebut [12].

3. *Magnetic Test*

Magnetic Particle Testing (MT) adalah metode pengujian untuk menentukan lokasi kerusakan permukaan (*surface*) dan di bawah permukaan (*subsurface*) pada material yang bersifat *ferromagnetic* [13]. *Magnetic Particle Inspection* (MPI) merupakan metode NDT yang digunakan untuk mendeteksi retakan (*crack*) dan diskontinuitas lain yang berada di permukaan material ferromagnetik. Sensitivitas metode ini baik untuk diskontinuitas di permukaan dan terus menurun dengan semakin dalamnya suatu diskontinuitas yang berada di dekat permukaan. Metode ini khusus dilakukan pada material *ferrous* [14]. Uji magnetic adalah salah satu metode uji tanpa merusak (NDT) yang dapat mendeteksi adanya cacat pada permukaan dan di bawah permukaan pada suatu bahan ferro-magnetic [15]. Prinsip kerja Uji *Magnetic* yaitu arus listrik digunakan untuk membangkitkan medan magnet dalam bahan, arah medan magnet akan dibelokkan sehingga terjadi kebocoran *flux magnetic*

bila melalui cacat. Bocoran *flux magnetic* akan menarik butir-butir ferro-magnetic di permukaan sehingga lokasi cacat dapat ditunjukkan [15].

Pada prinsipnya metode *Magnetic Test* (MT) adalah metode pengujian tanpa merusak dengan menggunakan bantuan medan magnet yang memungkinkan menampakkan diskontinuitas menggunakan suatu media (partikel magnetik) yang memiliki daya tarik magnet. Metode MT bisa digunakan untuk mengetahui cacat yang terdapat di permukaan sebuah benda kerja, cacat bisa berupa retakan, patahan, dan lubang. Partikel magnetik yang digunakan dalam metode MT dapat berupa *visible dry method*, *visible wet method*, *dry fluorescent* dan *wet fluorescent* [16]. Berikut ini ilustrasi dari pengujian *Magnetic Test*.



Gambar 2.5 *Magnetic Test*

4. *Penetrant Test*

Metode *penetrant test* merupakan metode NDT yang paling sederhana. Metode ini digunakan untuk menemukan cacat di permukaan terbuka dari komponen solid, baik logam maupun non logam, seperti keramik dan plastik fiber. Melalui metode ini, cacat pada material akan terlihat lebih jelas [17]. Caranya adalah dengan memberikan cairan berwarna terang pada permukaan yang diinspeksi. Cairan ini harus memiliki daya penetrasi yang baik dan viskositas yang rendah agar dapat masuk pada cacat di permukaan material. Selanjutnya, *penetrant* yang tersisa di permukaan material disingkirkan. Cacat akan nampak jelas jika perbedaan warna *penetrant* dengan latar belakang cukup kontras. Sesuai

inspeksi, *penetrant* yang tertinggal dibersihkan dengan penerapan *developer*. Kelemahan dari metode ini antara lain adalah bahwa metode ini hanya bisa diterapkan pada permukaan terbuka. Metode ini tidak dapat diterapkan pada komponen dengan permukaan kasar, berpelasis, atau berpori [18]. Prinsip kerja *penetrant test* adalah ketika cairan penetrant diberikan pada material yang terdapat cacat maka cairan akan masuk ke dalam cacat dan *developer* digunakan untuk mengangkat cairan *penetrant* tersebut agar terlihat secara visual. Pada *penetrant* tipe *flourescent*, pembacaannya menggunakan sinar ultraviolet di ruang gelap [19]. Berikut ini ilustrasi dari pengujian *penetrant test*.



Gambar 2.6 *Penetrant Test*

2.3 Magnet

Pada zaman prasejarah sifat magnetic ditemukan dalam jenis tertentu dari mineral bijih besi yang dikenal sebagai magnetit (Fe_3O_4). Studi secara menyeluruh tentang magnetisme pertama kali dilakukan oleh William Gilbert, yang dapat menyimpulkan bahwa bumi bertindak sebagai magnet terbesar. Terdapat kesamaan antara listrik dan magnet, satu manifestasi yang berbeda dari magnet yaitu bahwa magnet merupakan batang bermuatan yang memiliki dua ujung dan sifatnya berlawanan [20]. Dalam magnet, ujung tersebut dinamakan kutub S (selatan) dan kutub U (utara) yang dianalogikan sama halnya dengan kutub planet bumi. Sama halnya listrik memiliki dua varietas yang berbeda yaitu kutub negative (-) dan kutub positif (+).

2.4 Induksi

Salah satu efek paling penting dari elektromagnetisme ditemukan pada tahun 1831 oleh Michael Faraday di Inggris dan Joseph Henry di Amerika Serikat, kemampuan medan magnet yang bervariasi untuk menginduksi arus listrik melalui kawat. Karena medan magnet tidak spesifik dari asal-usulnya, efeknya sama tanpa peduli apakah dibuat dengan magnet permanen atau solenoida. Jika medan magnet tidak berubah, arus listrik tidak dihasilkan. Hukum induksi Faraday mengatakan bahwa tegangan yang diinduksi, atau gaya gerak listrik, adalah sama dengan laju perubahan fluks magnet melalui sirkuit.

2.4.1 Hukum Faraday

Salah satu dasar teori elektromagnetik adalah penemuan bahwa interaksi medan magnet dengan muatan listrik yang bergerak dapat membuatnya didefleksikan. Generasi bidang listrik dihasilkan oleh muatan listrik yang berubah. Perubahan tegangan pada bahan konduksi menghasilkan arus listrik. Menurut hukum Faraday, suatu tegangan diinduksikan pada suatu rangkaian konduktor jika konduktor tersebut terkena fluks magnet yang berubah terhadap waktu. Akibatnya arus mengalir pada penghantar jika terdapat jalur tertutup. Faktanya, ini adalah prinsip dasar yang menjadi dasar semua perangkat arus eddy. Fenomena yang sama terjadi ketika sebuah loop konduktor yang sebenarnya dapat dipandang sebagai filamen sebuah benda penghantar masif dikenai medan magnet yang berubah terhadap waktu. Arus eddy dapat muncul di semua mesin dan perangkat elektromagnetik karena semuanya dipengaruhi oleh medan magnet. Oleh karena itu, arus eddy akan muncul pada sirkuit magnet stator dan rotor mesin listrik yang terbuat dari besi setiap kali mesin tersebut terkena medan magnet [21]. Hukum Faraday tentang tegangan induksi yang terjadi pada kumparan yang mengalami perubahan flux magnetik seperti dinyatakan pada persamaan 2.1 berikut ini.

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan: $\frac{d\phi}{dt}$: Perubahan fluk magnetic

(-) : Perbedaan polaritas pada tegangan induksi

Tanda minus menunjukkan arah yang diinduksi oleh medan elektromagnetik. Ini terjadi jika berbagai fluks magnet diterapkan ke solenoid, misalnya, tanda-tanda ini muncul di setiap lilitan dan harus ditambahkan. Tegangan yang diinduksi adalah jika koil dibuat dengan luas penampang dan fluks yang sama melewati setiap lilitan.

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan jumlah lilitan N. Bagi perancang sensor atau insinyur, persamaan ini dapat ditulis ulang dalam bentuk yang menarik.

$$V = N \frac{d(BA)}{dt} \dots\dots\dots (2.3)$$

Tegangan yang diinduksi dapat dihasilkan baik dengan mengubah amplitudo medan magnet (B) atau dengan mengubah area sirkuit (A). Oleh karena itu, tegangan yang diinduksi tergantung pada hal-hal berikut. Pergeseran sumber medan magnet (koil pemancar) ke arah koil penerima, variasi arus koil atau kawat yang menghasilkan medan magnet, perubahan orientasi sumber magnet. Menurut hukum Faraday, arus listrik akan muncul di koil kedua jika arus listrik melewati kumparan yang berada di dekat kumparan lain. Namun, medan magnet menembus kedua kumparan. Oleh karena itu, induktansi diri, atau induktansi dari kumparan, didefinisikan sebagai milik kumparan karena menentang perubahan arus yang mengalir melaluinya [20].

Hubungan antara gaya magnetic dengan listrik dapat menghasilkan suatu bentuk lain dari gaya magnetik yang dinamakan *elektromagnetic*. Oleh karena itu, elektromagnetisme terbentuk oleh efek magnetik dari arus listrik. *Elektromagnetic* akan dihasilkan saat aliran listrik yang mengalir melewati konduktor sederhana seperti halnya kabel dan kawat. Elektron-elektron yang bergerak berhubungan dengan medan magnet; medan magnet yang bergerak dapat menghasilkan arus. efek elektromagnetic dipakai menjadi prinsip dasar

dari metode NDT (*Non Destructive Testing*) yang menggunakan prinsip fisika elektromagnetisme [22].

2.4.2 Hukum Lenz

Hukum Lenz merupakan salah satu prinsip dasar dalam elektromagnetisme yang diusulkan oleh Heinrich Lenz pada tahun 1834. Hukum ini berkaitan dengan arah arus induksi yang dihasilkan dalam sebuah konduktor saat ada perubahan dalam medan magnet yang melingkupi konduktor tersebut. Secara spesifik, Hukum Lenz menyatakan bahwa arus induksi yang dihasilkan dalam sebuah rangkaian tertutup akan memiliki arah sedemikian rupa sehingga medan magnet yang dihasilkan oleh arus tersebut akan menentang perubahan dalam fluks magnetik yang menyebabkannya. Hukum Lenz mirip dengan hukum gerak ketiga Newton yaitu untuk setiap tindakan selalu ada reaksi yang sama dan berlawanan. Hukum Lenz mengacu pada arus yang diinduksi, yang berarti bahwa ia berlaku hanya di sirkuit konduksi tertutup. Perhatikan bahwa fluks magnet yang berlawanan pada koil mengurangi induktansi. Hukum Lenz memiliki berbagai aplikasi yang sangat luas, termasuk pengereman elektromagnetik, kompor induksi, detektor logam, dan banyak lainnya.

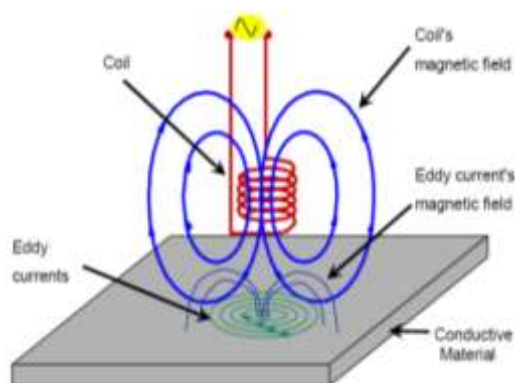
Ketika fluks magnetik yang menembus sebuah loop konduktor berubah, medan magnet yang berubah ini akan menyebabkan terjadinya ggl induksi di dalam konduktor tersebut. Arus induksi yang dihasilkan oleh ggl ini akan menghasilkan medan magnet yang menentang perubahan fluks magnetik yang menyebabkan arus tersebut. Prinsip ini memastikan bahwa tidak ada energi yang diciptakan atau dihancurkan, melainkan hanya ditransfer atau diubah dari satu bentuk ke bentuk lain [20].

2.4.3 Eddy Current

Eddy current adalah arus listrik yang diinduksi pada konduktor dan mengalir kedalam jalur melingkar. Fenomena arus *eddy* pertama kali diamati oleh François Arago pada tahun 1824. Pengamatan yang dilakukan dinamakan magnet berputar dan kebanyakan material konduktor menjadi termagnetisasi dan dijelaskan secara lengkap oleh Faraday. Pengujian arus

Eddy sebagian besar dimulai sebagai hasil penemuan induksi elektromagnetik oleh ilmuwan Inggris Michael Faraday pada tahun 1831. Faraday menemukan bahwa ketika medan magnet melewati sebuah konduktor atau ketika sebuah konduktor melewati magnet medan, arus listrik akan mengalir melalui konduktor jika ada jalur tertutup di mana arus dapat bersirkulasi [23].

Eddy current dapat dimanfaatkan untuk melakukan pengujian tidak merusak terhadap benda uji, pengujian ini dinamakan *Eddy Current Testing* (ECT). ECT merupakan salah satu metode dari teknik pengujian tidak merusak yang memanfaatkan proses induksi elektromagnetik untuk mendeteksi dan mendapatkan ukuran suatu crack, korosi, dan diskontinuitas material. Selain itu, ECT juga dapat digunakan untuk mengukur ketebalan material, mengukur ketebalan coating dan, mengukur konduktivitas suatu material. Prinsip kerja pada metode *eddy current* adalah induksi elektromagnetik. Arus eddy yang dihasilkan dari induksi elektromagnetik kemudian diinduksikan kepada material atau bagian yang terletak berdekatan dengan medan fluks yang dihasilkan oleh arus bolak balik pada *Coil probe* [22]. ECT bekerja berdasarkan prinsip dari induksi elektromagnetik. Pada metode ini, kumparan (probe dan sensor) tereksitasi dengan sinusoidal arus bolak-balik [24]. Mengikuti hukum Ampere, arus ini menghasilkan medan magnet primer di sekitar kumparan. Ketika sebuah bahan yang dapat menghantarkan listrik adalah didekatkan ke kumparan ini, arus diinduksi dalam material menurut hukum Faraday. Berikut ini ilustrasi dari prinsip kerja ECT.



Gambar 2.7 Prinsip Kerja *Eddy Current Testing* [25]

Berdasarkan gambar 2.7 dapat menjelaskan prinsip kerja ECT bahwa ketika arus bolak balik (AC) dialirkan pada kumparan, maka dari kumparan tersebut akan tercipta medan magnet primer di sekitarnya. Pada saat kumparan diletakkan pada konduktor, maka akan tercipta arus *eddy* pada konduktor tersebut, yang kemudian akan menciptakan medan magnet sekunder. Medan magnet sekunder akan berlawanan dengan medan magnet primer, sehingga akan menyebabkan perubahan pada medan magnet primer yang berakibat perubahan impedansi pada kumparan. Perubahan impedansi pada kumparan tersebut yang akan dideteksi oleh ECT.

Dalam proses pengujiannya metode ECT memiliki faktor penting diantaranya konduktivitas, permeabilitas, frekuensi, *lift-off*, *skin effect* dan *signal to noise ratio*. Konduktivitas menjadi faktor penting dalam ECT dikarenakan arus *eddy* akan mengalir pada benda yang memiliki konduktivitas yang tinggi, sehingga memiliki hambatan yang rendah. Permeabilitas menjadi faktor yang penting dikarenakan permeabilitas adalah kemampuan sebuah material untuk memusatkan garis gaya magnet. Faktor akan berpengaruh jika material uji bersifat *ferromagnetic*. Perubahan sinyal yang terjadi pada *eddy current* ketika probe dijauhkan dari permukaan material yang diuji merupakan faktor penting dalam pengujian teknik ECT, biasa disebut dengan *lift-off*. *Lift-off* berfungsi untuk mencari diskontinuitas pada material yang diuji [25].

2.5 *Magnetic Induction Tomography (MIT)*

Magnetic Induction Tomography (MIT), yaitu sering disebut sebagai induktansi timbal balik tomografi atau tomografi arus eddy. Pada saat ini mengeksplorasi teknik tomografi listrik MIT yang paling banyak digunakan, dibandingkan dengan sistem tomografi listrik lainnya, seperti *electrical impedance* dan *electrical capacitance tomography*. Namun yang menjadi ciri khas dalam sistem MIT ini, kumparan digunakan sebagai pemancar dan penerima. Dengan membentuk arus sinusoidal pada kumparan transmisi, perubahan fluks magnet diatur, yang menginduksi tegangan terminal kumparan penerima. Sinyal yang diinduksi ini diambil oleh kumparan

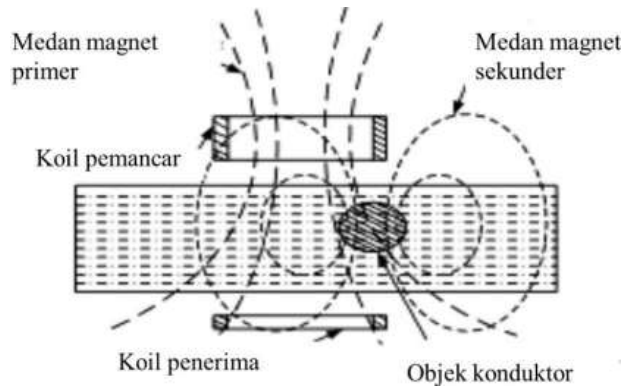
penginderaan sebanding dengan medan magnet lokal kekuatan B , yang disebut sebagai sinyal latar belakang atau primer, dan direpresentasikan sebagai fasor [26]. MIT adalah teknik pengujian non-destruktif untuk menggambarkan distribusi spasial konduktivitas listrik atau permeabilitas magnetik pada objek yang diperiksa. Sinyal yang diperoleh dengan bantuan teknik seperti itu sangatlah kecil, terutama ketika menguji bahan dengan konduktivitas listrik rendah. Untuk memberikan sensitivitas tertinggi, sistem MIT harus dirancang dengan sangat hati-hati.

Magnetic Induction Tomography (MIT) adalah sistem pencitraan elektromagnetik tanpa kontak. MIT memiliki potensi untuk digunakan dalam banyak aplikasi tomografi industri dan biologi. Dalam dunia industri MIT berpotensi dapat digunakan untuk pengujian hasil pengelasan ataupun pengujian bahan baku, untuk mengetahui cacat atau *discontinuity*. MIT dapat menggambarkan distribusi spasial konduktivitas listrik dan permeabilitas magnetik pada daerah yang menjadi perhatian khusus. Hal ini dilakukan dengan satu set pengukuran menggunakan kumparan induktif yang didistribusikan sekitar pinggiran sampel [27]. MIT adalah teknik pencitraan yang digunakan untuk menggambarkan sifat elektromagnetik suatu objek dengan menggunakan efek arus eddy. MIT juga dikenal sebagai tomografi induksi elektromagnetik, tomografi elektromagnetik (EMT), tomografi arus eddy, dan pengujian arus eddy. Metode yang digunakan bersifat *nondestructive test* dan geofisika, memiliki aplikasi potensial dalam prosesnya industri dan juga di bidang kedokteran [28].

2.6 Prinsip Dasar MIT

MIT menerapkan medan magnet dari kumparan eksitasi untuk menginduksi arus eddy pada material. Jadi distribusi medan magnet eksitasi diubah oleh arus eddy, dan medan magnet yang dihasilkan kemudian dideteksi oleh kumparan penginderaan. Pada gambar 2.8 menunjukkan arus eddy yang dihasilkan dari objek yang sedang diselidiki. Dalam aplikasi medis, medan arus eddy akan berubah ketika konduktivitas jaringan diubah oleh penyakit. Akibatnya sinyal pengukuran juga akan berubah dan patologi

jaringan dapat direfleksikan dengan menganalisis sinyal ini [28]. Berikut ini ilustrasi dari prinsip kerja MIT.



Gambar 2.8 Prinsip Kerja *Magnetic Induction Tomography* [28]

MIT adalah teknik pencitraan non-invasif yang digunakan untuk menghasilkan gambaran distribusi konduktivitas listrik atau permeabilitas magnetik di dalam objek atau sampel yang diamati. Persamaan dasar yang terkait dengan MIT adalah persamaan Maxwell yang dimodifikasi untuk menggambarkan fenomena pada sistem MIT. Persamaan Maxwell merupakan kumpulan persamaan diferensial parsial yang menjelaskan perilaku medan listrik dan medan magnet, serta hubungan antara keduanya. Dalam konteks MIT, persamaan Maxwell digunakan untuk memodelkan interaksi antara medan magnet yang dihasilkan dan distribusi konduktivitas dalam objek yang diamati. Ketika kumparan pemancar dialirkan arus listrik, akan muncul medan magnet disekitarnya. Fenomena ini dijelaskan dengan Hukum Ampere-Maxwell sebagai persamaan berikut:

$$\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon)E \dots \dots \dots (2.1)$$

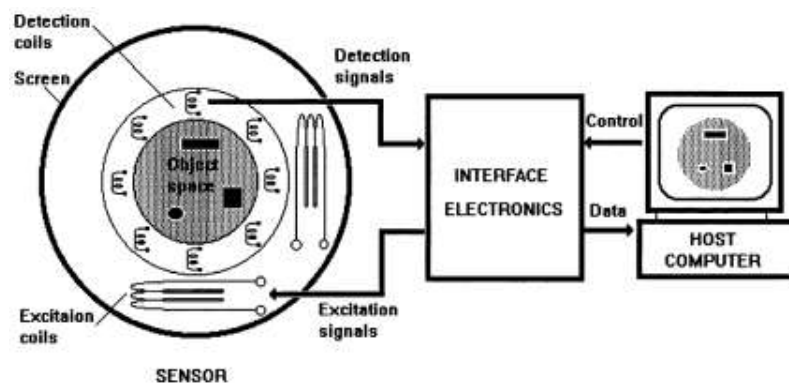
Dimana ∇ adalah operator divergen, H adalah medan magnet, σ adalah konduktivitas, j adalah kepadatan arus total, ω adalah kecepatan sudut, ϵ adalah permitivitas, dan E adalah medan listrik. Hukum ampere menyatakan bahwa rotasi dari medan magnetik di suatu titik dalam ruang adalah sama dengan jumlah arus listrik yang melewati titik tersebut ditambah dengan

perubahan dari kerapatan fluks listrik terhadap waktu. Medan magnet yang terbentuk di sekitar kumparan pemancar disebut medan magnet primer (B). Jika terdapat benda konduktif seperti pelat baja pada daerah medan magnet primer, maka akan terbentuk arus eddy di dalam pelat baja tersebut. Arus Eddy yang diinduksi pada pelat baja terjadi berdasarkan Faraday. Salah satu persamaan yang penting adalah persamaan Maxwell yang menggambarkan hukum Faraday. Teori dasar di balik MIT adalah hukum Faraday induksi elektromagnetik. Hukum ini menyatakan bahwa perubahan medan magnet yang melintasi suatu konduktor akan menghasilkan arus listrik dalam konduktor tersebut. Berikut ini persamaan dari hukum Faraday:

$$\nabla \times E = -j\omega\mu H \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana μ adalah permeabilitas. Arus Eddy mengalir pada baja pelat juga menghasilkan medan magnet yang disebut medan sekunder medan magnet (ΔB). Medan magnet primer (B) dan medan magnet sekunder (ΔB) kemudian akan menginduksi tegangan pada koil penerima [29].

2.7 Rangkaian Sistem MIT



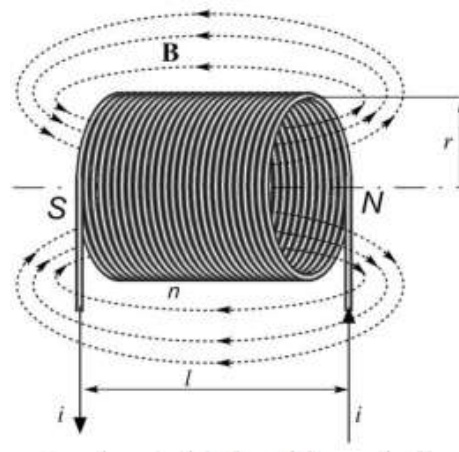
Gambar 2.9 Sketsa Rangkaian Sistem MIT [30]

Gambar di atas menggambarkan sketsa rangkaian Sistem MIT. Sistem MIT dalam proses kerjanya memiliki beberapa komponen yang dirangkai menjadi satu kesatuan. Sehingga dari sistem yang dirangkai tersebut menghasilkan satu fungsi dan saling keterikatan. Adapun rangkaian dalam

sistem MIT terdiri dari sensor, sistem akuisisi data dan computer. Setiap komponen tersebut memiliki fungsi masing-masing untuk mendukung proses pengambilan data.

2.8 Coil

Coil adalah lilitan kawat panjang yang berfungsi untuk membawa arus listrik dan berfungsi sebagai alat praktis untuk menghasilkan medan magnet. *Coil* juga sering digunakan sebagai aktuator untuk mengubah arus listrik menjadi gaya mekanik [20]. Sensor biasanya bergantung pada *Coil* untuk mendeteksi perubahan. Dalam sistem MIT, *Coil* atau kumparan memainkan peran penting sebagai komponen utama untuk menghasilkan dan menerima medan elektromagnetik. *Coil* berfungsi sebagai penghasil medan magnet primer dengan cara mengalirkan arus bolak-balik (AC). Medan magnet ini menembus objek yang diperiksa dan menginduksi arus eddy di dalam objek tersebut. *Coil* juga bertindak sebagai penerima medan magnet sekunder yang dihasilkan oleh arus eddy yang diinduksi dalam objek. Arus eddy ini menghasilkan medan magnet sekunder yang kemudian ditangkap oleh *Coil* penerima. *Coil* penerima mengukur perubahan medan magnet sekunder yang disebabkan oleh variasi konduktivitas listrik dalam objek [31]. Salah satu jenis *Coil* yang digunakan pada sistem MIT yaitu *Coil* solenoid, yang pada dasarnya menjadi lembaran arus silinder. Berikut ini ilustrasi dari bentuk solenoid.



Gambar 2.10 Koil Solenoid [20]

Ketika solenoid dialiri arus listrik maka akan terbentuk medan magnet di sekitarnya. Hukum ampere dapat diterapkan untuk mengetahui besarnya medan magnet pada solenoid dengan parameter seperti jumlah lilitan, bahan dari kawat yang dililit dan arus yang diberikan. Berikut ini persamaan hukum ampere yang dapat diterapkan pada *Coil*.

$$B = \mu_0 i_0 n \dots\dots\dots (2.5)$$




























di mana μ_0 adalah permeabilitas bahan, n adalah jumlah lilitan per satuan panjang, dan i_0 adalah arus yang mengalir melalui kawat solenoid.

2.9 Simulasi *Multiphysics* (Comsol 6.2)

Multiphysics adalah program simulasi interaktif yang kuat yang dapat digunakan untuk memodelkan dan memecahkan berbagai masalah teknik dan ilmiah. Dengan *Multiphysics*, perangkat lunak ini dapat dengan mudah memperluas model konvensional untuk satu jenis fisika menjadi model multifisika yang memecahkan fenomena fisika gabungan dan melakukannya secara bersamaan. Perangkat lunak ini juga menyediakan tampilan desktop terintegrasi yang kuat dengan Model Builder, yang memberikan gambaran lengkap tentang model dan akses ke semua fungsionalitas. Untuk menggunakan perangkat ini, tidak diperlukan pengetahuan matematika atau analisis numerik yang mendalam [32].

Kita dapat membuat model dengan menentukan besaran fisika yang relevan seperti sifat material, beban, batasan, sumber, dan fluks dengan menggunakan antarmuka fisika bawaan dan dukungan lanjutan untuk sifat material. Ini berbeda dengan mendefinisikan persamaan dasar. Dengan software Simulasi *Multiphysics* dapat menerapkan variabel, ekspresi, atau angka ini ke domain padat dan cair, batas, tepi, dan titik yang berbeda dari mesh komputasi. Selanjutnya, serangkaian persamaan yang membentuk model secara keseluruhan disusun secara internal oleh perangkat lunak Simulasi *Multiphysics* [32].

Pada *software* Simulasi *Multiphysics* terdapat langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk mensimulasikan model yang telah dibentuk. Untuk membuat model yang akan disimulasikan langkah awalnya yaitu membuat model geometri yang bentuknya menyerupai atau melakukan pendekatan dengan bentuk yang sebenarnya. Dalam membuat bentuk geometri dibutuhkan gabungan dari beberapa geometri yang disatukan sehingga membuat pemodelan sensor dan spesimen uji yang akan dilakukan pengujian. Adapun bentuk-bentuk geometri yang dapat dibentuk terdapat pada gambar berikut ini.

BUTTON	NAME	SPACE DIMENSION	BUTTON	NAME	SPACE DIMENSION
	Bézier Polygon	2D, 3D		Interval	1D
	Block	3D		Line Segment	2D, 3D
	Circle	2D		Parametric Curve	2D, 3D
	Circular Arc	2D		Parametric Surface	3D
	Composite Curve	2D		Point	1D, 2D, 3D
	Cone	3D		Polygon	2D, 3D
	Cubic Bézier	2D, 3D		Pyramid	3D
	Cylinder	3D		Quadratic Bézier	2D, 3D
	Eccentric Cone	3D		Rectangle	2D
	Ellipse	2D		Sphere	3D
	Ellipsoid	3D		Square	2D
	Helix	3D		Tetrahedron	3D
	Hexahedron	3D		Torus	3D
	Interpolation Curve	2D, 3D			

Gambar 2. 11 *Geometry Primitives and Geometry Toolbar Buttons* [32]

Pemilihan modul fisika yang tepat dalam *software* Simulasi *Multiphysics* sangat krusial karena menentukan parameter yang akan dianalisis. Dalam konteks sensor MIT, fenomena medan magnet yang dihasilkan oleh arus listrik yang mengalir melalui koil sensor menjadi fokus utama. Koil ini berfungsi sebagai pemancar dan penerima sinyal. Fenomena medan magnet tersebut dalam Simulasi *Multiphysics* diakomodasi oleh modul AC/DC Electromagnetic. Setelah modul dipilih, parameter-parameter penting seperti jumlah lilitan pada koil, material spesimen uji, dan penetapan kondisi batas harus ditentukan sesuai dengan tujuan simulasi yang ingin dicapai [33].