

BAB II

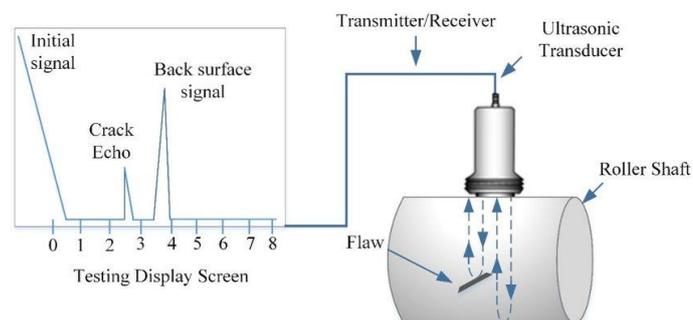
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengujian Tidak Merusak

Pengujian tidak merusak (*Non-Destructive Test*, NDT) adalah aktivitas pengujian atau inspeksi terhadap material untuk mengetahui adanya cacat, retak atau *discontinuity* lain tanpa merusak benda uji. Pengujian ini sering digunakan di dunia industri untuk pengendalian kualitas. Terdapat beberapa jenis metode NDT, di antaranya *magnetic particle test* (MT), *visual test*, *liquid penetrant test* (LPT), *eddy current*, dan *ultrasonic test* (UT). Teknik NDT yang dapat digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan yaitu pengujian ultrasonik. Pada proses inspeksi menggunakan pengujian ultrasonik, gelombang ultrasonik berfrekuensi tinggi diatas 20 kHz dipancarkan, sehingga dapat digunakan untuk mendeteksi cacat pada benda, pengukuran dimensi cacat dan menentukan ketebalan benda uji. Secara umum metode ini digunakan untuk pengukuran ketebalan plat kapal, perawatan sambungan pipa saluran gas dengan minyak, proses perawatan komponen pada pesawat, bagian dari proses *manufacturing* dengan tujuan menjaga benda atau komponen tersebut tetap pada kondisi yang baik [6].

Metode NDT memiliki beberapa kelebihan seperti biaya relatif lebih murah, dapat mencegah kegagalan suatu produksi, tidak mengganggu proses produksi, waktu pelaksanaan yang cepat. Metode NDT yang sering digunakan untuk mengukur lapisan tipis adalah pengujian ultrasonik. *Ultrasonic test* adalah metode pengujian tidak merusak dengan memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk

menentukan cacat yang ada pada material [7]. Prinsip kerja *ultrasonic testing* yaitu gelombang ultrasonik disorotkan ke permukaan bidang yang diinspeksi. Ketika terdapat diskontinuitas (cacat) pada material, gelombang ultrasonik dipantulkan kembali dari permukaan cacat menuju permukaan material. Pada bagian material yang tidak terdapat cacat, gelombang akan merambat hingga menuju permukaan dasar material dan dipantulkan kembali menuju permukaan material. Sinyal gelombang yang dipantulkan diubah menjadi sinyal listrik oleh transduser dan ditampilkan pada layar monitor. Pengujian dengan cara ini dapat menentukan lokasi kedalaman cacat yang terjadi, namun tidak bisa untuk melihat bentuk dari cacat tersebut [8].



Gambar 2.1 Skema *Ultrasonic Testing* [9]

Metode pengujian *Ultrasonic Test* memiliki beberapa kekurangan antara lain seperti diperlukannya operator yang sudah terlatih, perlu *couplant* (cairan untuk media transmisi), permukaan harus dapat menerima gelombang *ultrasonic*, sulit mendeteksi material yang kasar, bentuknya tidak beraturan, sangat tipis, tidak bisa mendeteksi cacat linear berorientasi sejajar dengan gelombang suara, membutuhkan kemampuan operator serta metoda ini lebih mahal dari metode NDT

yang lain. Banyaknya kekurangan *Ultrasonic Test* menimbulkan inovasi baru dalam mengukur ketebalan lapisan. Salah satunya menggunakan sensor kapasitif. Sensor kapasitif mempunyai kriteria seperti *non-invasive* (tanpa merusak) dan *non-intrusive* (tanpa memasukan alat) sehingga dapat mengurangi kelemahan *Ultrasonic Test* dalam mengukur ketebalan lapisan [10].

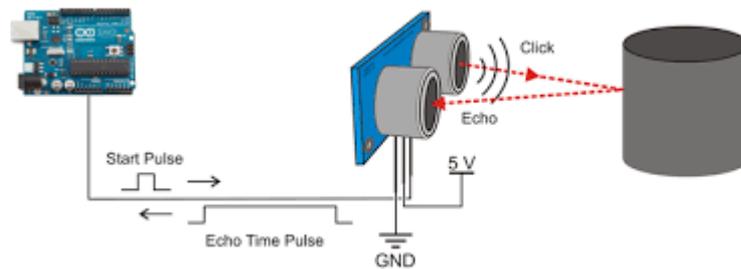
2.2 Sensor Untuk Mengukur Ketebalan Lapisan

Macam-macam sensor untuk mengukur ketebalan lapisan adalah sebagai berikut:

2.2.1 Sensor Ultrasonik

Sensor ini menggunakan gelombang suara ultrasonik untuk mengukur ketebalan lapisan dengan memantulkan gelombang suara tersebut dari permukaan lapisan dan menghitung waktu pantulan kembali. Prinsip kerja sensor ultrasonik didasarkan pada pantulan gelombang suara dan digunakan untuk mendeteksi keberadaan objek di depannya. Sensor ini memiliki frekuensi kerja antara 40 kHz hingga 400 kHz. Sensor ultrasonik terdiri dari dua unit, yaitu unit pemancar dan unit penerima yang terbuat dari kristal *piezoelectric* dengan mekanik jangkar dan diafragma penggetar. Tegangan bolak-balik dengan frekuensi kerja diberikan pada plat logam yang kemudian membuat kristal *piezoelectric* berkontraksi, mengembang, atau menyusut tergantung pada polaritas tegangan yang diberikan. Kontraksi ini kemudian diteruskan ke diafragma penggetar untuk memancarkan gelombang ultrasonik ke udara sekitarnya. Ketika gelombang

ultrasonik memantul pada objek tertentu, maka gelombang tersebut akan diterima kembali oleh unit sensor penerima yang kemudian menghasilkan tegangan bolak-balik dengan frekuensi yang sama ketika diafragma penggetar bergetar akibat pantulan gelombang ultrasonik [11].



Gambar 2.2 Sensor Ultrasonik [11]

Besar amplitudo sinyal listrik yang dihasilkan oleh sensor penerima tergantung pada seberapa dekat objek yang dideteksi dan kualitas dari sensor pemancar dan penerima. Sensor ini menggunakan metode pantulan untuk menghitung jarak antara sensor dan objek. Jarak tersebut dihitung dengan mengalikan setengah waktu yang dibutuhkan sinyal ultrasonik untuk perjalanan dari pemancar ke penerima dengan kecepatan rambat sinyal ultrasonik pada media yang digunakan, yaitu udara.

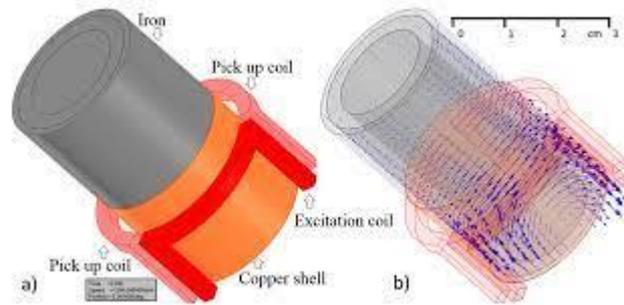
Penelitian yang dilakukan oleh I. Lestari [12] mengenai pengukuran ketebalan cat menggunakan sensor ultrasonik menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan cat dengan akurasi yang baik dan efisien. Hasil pengukuran menggunakan sensor ultrasonik menunjukkan ketebalan yang hampir sama dengan hasil pengukuran menggunakan metode konvensional. Selain itu, penggunaan

sensor ultrasonik dapat mempercepat proses pengukuran karena tidak memerlukan waktu yang lama seperti metode konvensional. Dalam penelitian ini, ketepatan pengukuran ketebalan cat pada beberapa jenis material, yaitu baja, aluminium, dan besi cor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pengukuran ketebalan cat menggunakan sensor ultrasonik dapat dilakukan pada berbagai jenis material dengan akurasi yang tinggi. Penelitian lain yang dilakukan oleh Sari [13] ini bertujuan untuk mengukur ketebalan plat baja menggunakan ultrasonik *time-of-flight*. Ultrasonik *time-of-flight* (ToF) adalah metode pengukuran ketebalan yang menggunakan gelombang suara berfrekuensi tinggi. Metode ini bekerja dengan cara mengirimkan gelombang suara dari sensor ke objek yang diukur, dan kemudian mengukur waktu yang dibutuhkan gelombang suara untuk kembali ke sensor. Prinsip dasar ultrasonik ToF dalam mengukur ketebalan adalah bahwa kecepatan gelombang suara dalam medium tertentu adalah konstan. Metode ini memanfaatkan waktu yang dibutuhkan oleh gelombang ultrasonik untuk menyebar melalui material, dan kemudian dipantulkan kembali ke transduser. Pada penelitian ini, pengujian dilakukan pada beberapa sampel plat baja dengan ketebalan yang berbeda. Data waktu tiba gelombang ultrasonik diambil dan dianalisis untuk menghitung ketebalan plat baja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ultrasonik *time-of-flight* dapat memberikan pengukuran yang akurat pada ketebalan plat baja dengan tingkat kesalahan yang rendah. Penelitian ini memiliki potensi untuk digunakan dalam berbagai aplikasi industri, seperti manufaktur, konstruksi,

dan inspeksi material, untuk mengukur ketebalan material secara non-destruktif dan efisien.

2.2.2 Sensor Induktansi

Sensor induktansi merupakan salah satu jenis sensor yang digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan pada permukaan benda. Prinsip kerja sensor ini didasarkan pada perubahan induktansi pada kumparan induktor akibat perubahan jarak antara inti ferromagnetik dengan permukaan benda yang mengalami pengaplikasian lapisan. Sensor induktansi terdiri dari inti ferromagnetik, kumparan induktor, dan sirkuit elektronik untuk pengolahan sinyal. Ketika lapisan diaplikasikan pada permukaan benda, maka jarak antara inti dan kumparan berubah. Hal ini menyebabkan perubahan induktansi dalam kumparan, yang selanjutnya dapat diukur dan dihitung untuk menentukan ketebalan lapisan. Cara kerja sensor induktansi terdiri dari dua tahap yaitu tahap pengiriman sinyal dan tahap penerimaan sinyal. Pada tahap pengiriman sinyal, sinyal AC dikirimkan ke kumparan induktor dan melalui inti ferromagnetik. Kemudian sinyal tersebut diubah menjadi medan magnetik di sekitar inti. Pada tahap penerimaan sinyal, medan magnetik yang dihasilkan oleh lapisan pada permukaan benda menghasilkan perubahan dalam induktansi pada kumparan induktor. Perubahan ini kemudian diubah menjadi sinyal listrik, yang selanjutnya dapat diukur dan diolah untuk menentukan ketebalan lapisan [14].



Gambar 2.3 Sensor Induktansi [14]

Sensor induktansi memiliki beberapa keunggulan, di antaranya mampu mengukur ketebalan lapisan non-konduktif dan konduktif, tidak memerlukan kontak langsung dengan permukaan benda yang diukur sehingga tidak merusak permukaan benda, memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan resolusi yang baik. Namun, sensor induktansi juga memiliki kekurangan, di antaranya rentan terhadap gangguan medan magnetik eksternal yang dapat mempengaruhi hasil pengukuran, rentan terhadap perubahan suhu yang dapat mempengaruhi induktansi pada kumparan induktor.

Penelitian yang dilakukan M.R. Gaitonde & R.M. Patrikar [15] ini membahas tentang pengembangan sensor induktif untuk pengukuran ketebalan film konduktif tipis secara non-destruktif. Sensor induktif ini didesain untuk mengukur ketebalan film tipis dengan ketebalan antara 0,1 hingga 2 mikrometer. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengukur perubahan induktansi pada kumparan sensor induktif yang diakibatkan oleh adanya perubahan jarak antara sensor dan benda uji

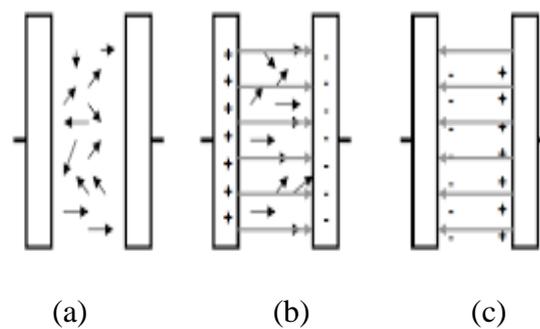
(film tipis). Dalam penelitian ini, variasi ketebalan film tipis yang diukur adalah dari 0,1 hingga 2 mikrometer dengan menggunakan sampel film tipis tembaga pada substrat kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor induktif yang dikembangkan dapat mengukur ketebalan film tipis secara non-destruktif dengan akurasi yang tinggi. Selain itu, sensor ini juga mampu mengukur ketebalan film tipis pada permukaan yang tidak rata dengan baik. Namun, pengukuran pada film tipis dengan ketebalan di bawah 0,1 mikrometer masih kurang akurat. Dalam kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa sensor induktif dapat menjadi pilihan yang baik untuk mengukur ketebalan film tipis secara non-destruktif dengan akurasi yang tinggi dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pada industri semikonduktor dan elektronik

2.3 Sensor Kapasitif

Sensor adalah komponen elektronika yang berfungsi untuk mengubah besaran mekanis, magnetis, panas, sinar, dan kimia menjadi besaran listrik berupa tegangan, resistansi dan arus listrik. Sensor sering digunakan untuk pendeteksian pada saat melakukan pengukuran atau pengendalian. Salah satu jenis sensor adalah sensor kapasitif. Sensor kapasitif merupakan sensor elektronika yang bekerja berdasarkan konsep kapasitif. Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan muatan energi listrik yang dapat disimpan oleh sensor akibat perubahan jarak lempeng, perubahan luas penampang dan perubahan volume dielektrik. Konsep kapasitor yang digunakan dalam sensor kapasitif adalah proses menyimpan dan melepas

energi listrik dalam bentuk muatan-muatan listrik pada kapasitor yang dipengaruhi oleh luas permukaan, jarak, dan bahan dielektrik [17].

Sensor kapasitif merupakan teknologi yang menggunakan pelat kapasitif dan mengukur segala sesuatu yang memiliki nilai dielektrik. Sensor kapasitif didasarkan pada metode kapasitif, yang tugasnya mendeteksi perubahan komposisi bahan dielektrik dengan menentukan nilai kapasitansi dan konstanta dielektrik. Sensor menggunakan elektoda logam untuk pelat kapasitor seperti tembaga, alumunium, kuningan, dan *stainless steel* [16].



Gambar 2.4 Proses yang terjadi dalam kapasitor saat diberikan beda potensial; (a) Saat belum ada medan listrik, (b) Saat ada medan listrik, (c) Saat ada medan listrik baru [17]

Proses skema sensor kapasitif dapat di lihat pada Gambar 2.2 Sebelum adanya muatan pada kedua pelat, material dielektrik memiliki dipol acak sehingga bersifat isolator Gambar 2.4 (a). Setelah pelat bermuatan yang menghasilkan medan listrik ke arah kanan, muatan pada dielektik terpolarisasi oleh medan listrik Gambar 2.4 (b). Muatan positif perlahan-lahan menuju pelat negatif, dan muatan negatif ke pelat positif. Akibatnya terdapat medan listrik baru pada dielektrik yang melawan

medan listrik semula yang saling menghilangkan, sehingga medan listrik total menjadi nol, dan arus berhenti mengalir Gambar 2.4 (c).

Sensor kapasitif telah digunakan di berbagai aplikasi karena mempunyai kelebihan seperti biaya yang murah, respon cepat, tidak ada radiasi dan fleksibilitas dalam desain elektroda. Sifat sensor kapasitif yang dapat dimanfaatkan dalam proses pengukuran adalah jika luas permukaan dan dielektrika (udara) dalam dijaga konstan, maka perubahan nilai kapasitansi ditentukan oleh jarak antara kedua lempeng logam. Jika luas permukaan dan jarak kedua lempeng logam dijaga konstan dan volume dielektrikum dapat dipengaruhi maka perubahan kapasitansi ditentukan oleh volume atau ketinggian cairan elektrolit yang diberikan serta luas permukaan kedua lempeng logam yang saling berdekatan [3].

Secara prinsip, kapasitor terdiri dari dua buah pelat konduktor yang berlawanan muatan, masing-masing mempunyai luas permukaan (A), dan mempunyai muatan persatuan luas (σ). Konduktor yang dipisahkan oleh sebuah zat dielektrik yang bersifat isolator sejauh (d). Zat inilah yang nantinya akan memerangkap elektron bebas. Muatan berada pada permukaan konduktor yang jumlah totalnya adalah nol. Hal ini disebabkan jumlah muatan negatif dan positif sama besar. Bahan dielektrik adalah bahan yang jika tidak terdapat medan listrik bersifat isolator, namun jika ada medan listrik yang melewatinya, maka akan terbentuk dipol-dipol listrik, yang arah medan magnetnya melawan listrik semula.

Kapasitansi adalah ukuran jumlah muatan listrik yang disimpan atau dipisahkan pada sebuah potensial listrik yang telah ditentukan, dapat didefinisikan dalam satuan *coulomb per volt* ditunjukkan oleh Persamaan 2.1 [19]:

$$C = \frac{Q}{V} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

Q = Muatan Listrik (*coulumb*)

V = Tegangan Terukur (*voltase*)

Nilai kapasitansi yang ditimbulkan berbanding lurus dengan luas permukaan pelat, berbanding terbalik dengan jarak antara kedua lempeng dan berbanding lurus dengan zat antara kedua lempeng tersebut (dielektrika), seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.2 [17]:

$$C = \epsilon_r \frac{\epsilon_0 A}{d} \dots\dots\dots (2.2)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

ϵ_r = Permittivitas relatif (udara = 1)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m)

A = Luas pelat/lempeng (m^2)

d = Jarak antara pelat/lempeng (m)

Penelitian yang dilakukan oleh R. Zeng [20] ini membahas tentang pengembangan sensor kapasitif untuk pengukuran ketebalan lapisan film tipis. Sensor ini didesain untuk mengukur ketebalan lapisan film tipis dengan ketebalan antara 0,1 hingga 10 mikrometer. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan mengukur perubahan kapasitansi pada sensor kapasitif yang diakibatkan oleh adanya perubahan jarak antara sensor dan benda uji (lapisan film tipis). Dalam penelitian ini, variasi ketebalan lapisan film tipis yang diukur adalah

dari 0,1 hingga 10 mikrometer dengan menggunakan sampel lapisan film tipis pada substrat kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor kapasitif yang dikembangkan dapat mengukur ketebalan lapisan film tipis secara akurat dengan nilai error rata-rata sebesar 0,81%. Selain itu, sensor ini juga dapat digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan film tipis pada permukaan yang tidak rata dengan baik. Dalam kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa sensor kapasitif dapat menjadi alternatif yang baik untuk mengukur ketebalan lapisan film tipis secara akurat dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pada industri semikonduktor, aeronautika, dan pertahanan.

Penelitian lain yang dilakukan oleh W. Yao [21] ini membahas tentang pengembangan sensor kapasitif dengan presisi tinggi untuk mengukur ketebalan pelapisan atau *coating*. Sensor ini didesain untuk mengukur ketebalan *coating* dengan ketebalan antara 0,1 hingga 1,5 milimeter. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan sensor kapasitif yang berupa dua elektroda berbentuk bulat pada permukaan yang berbeda. Ketebalan *coating* diukur dengan mengukur perubahan kapasitansi yang terjadi antara dua elektroda kapasitif tersebut yang dipengaruhi oleh ketebalan *coating* yang diukur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor kapasitif yang dikembangkan dapat mengukur ketebalan *coating* dengan presisi tinggi dengan *error* rata-rata sebesar 0,09%. Selain itu, sensor ini juga dapat digunakan untuk mengukur ketebalan *coating* pada permukaan yang tidak rata dengan baik. Dalam kesimpulannya, penelitian ini menunjukkan bahwa sensor kapasitif dapat menjadi pilihan yang baik untuk

mengukur ketebalan *coating* secara presisi tinggi dan dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti pada industri otomotif dan *aerospace*.

2.4 Konduktor

Konduktor adalah bahan yang dapat menghantarkan energi listrik baik itu benda padat, cair maupun gas. Syarat benda disebut konduktor adalah memiliki konduktivitas yang tinggi dengan resistansi yang rendah. Konduktivitas listrik adalah kemampuan bahan untuk membawa arus listrik per detik. Sedangkan resistivitas adalah kebalikan dari konduktivitas yaitu kemampuan bahan untuk menahan arus listrik. Pada kondisi *steady state*, tidak ada medan listrik di dalam konduktor karena muatan listrik bergerak bebas melalui konduktor. Muatan listrik dengan cepat memposisikan diri untuk membatalkan medan listrik di dalam konduktor. Menurut hukum Gauss, jika medan listrik (E) di dalam konduktor adalah nol, maka muatan (Q), tertutup oleh permukaan apa pun (A), di dalam konduktor yang bernilai nol, seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.3 [22]:

$$\epsilon_0 \oint E \cdot dA = Q = 0 \dots \dots \dots (2.3)$$

Akibatnya, setiap muatan berlebih harus berada di permukaan konduktor. Oleh karena itu, permukaan konduktor adalah ekuipotensial dan potensial listrik (V) harus sama. Medan listrik yang tegak lurus terhadap permukaan Gauss menyebabkan besarnya fluks listrik melalui permukaan adalah hasil dari besarnya medan listrik dan luas permukaan, seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.4 [22]:

$$\epsilon_0 \oint E \cdot dA = Q / \epsilon_0 = EA \dots \dots \dots (2.4)$$

Jika densitas muatan permukaan adalah σ , maka besarnya medan listrik diberikan, seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.5 [22]:

$$E = Q/A\epsilon_0 = \sigma/\epsilon_0 \dots\dots\dots(2.5)$$

Prinsip yang berlaku untuk konduktor di bidang elektrostatik, dapat disimpulkan sebagai berikut [23]

1. Muatan dapat bergerak pada permukaan konduktor sehingga menimbulkan kerapatan muatan permukaan.
2. Intensitas medan listrik statis di dalam konduktor adalah nol
3. Pada kondisi statis, tidak ada muatan dan medan listrik yang dapat muncul di titik mana pun dalam konduktor.
4. Distribusi muatan pada permukaan tergantung pada bentuk permukaan.
5. Konduktivitas konduktor ideal tidak terbatas.
6. Permukaan konduktor merupakan permukaan ekuipotensial.

2.5 Konstanta Dielektrika

Konstanta dielektrik adalah ukuran pengaruh material pada medan listrik. Kapasitansi akan meningkat atau menurun tergantung pada jenis material dielektrik. Permittivitas berhubungan dengan kemampuan material untuk mentransmisikan medan listrik. Dalam kapasitor, peningkatan permittivitas memungkinkan muatan yang sama untuk disimpan dengan medan listrik yang lebih kecil, yang mengarah ke peningkatan kapasitansi. Sehingga pada permukaan bahan dapat terjadi muatan listrik induksi. Konstanta dielektrik juga merupakan suatu bilangan konstanta yang besarnya tergantung pada bahan yang digunakan dan

sistem yang digunakan. Sedangkan sistem yang digunakan pada konstanta dielektrik yaitu nilai kapasitansi dari kapasitor yang dibentuk dari dua buah pelat sejajar yang dipisahkan oleh bahan. Celah antara dua permukaan kapasitor diisi dengan bahan non-konduktif seperti karet, kaca atau, kayu yang memisahkan dua elektroda dari kapasitor. Bahan ini memiliki nilai konstanta dielektrik tertentu. Kapasitansi sebanding dengan konstanta dielektrik. Jika konstanta dielektrik antara pelat kapasitif naik, kapasitansi juga akan meningkat. Kapasitansi dapat dinyatakan dalam bentuk konstanta dielektrik, seperti pada Persamaan 2.2 [17].

Pengukuran kapasitansi dilakukan dengan menempatkan material dielektrik di antara pelat kapasitor. Nilai kapasitansi yang terukur akan bergantung pada jenis material dielektrik. Konstanta dielektrik material berhubungan dengan kemampuan material untuk menstransmisikan medan listrik, seperti ditunjukkan oleh Persamaan 2.6 [17].

$$C = \epsilon_r C_0 \dots \dots \dots (2.6)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

ϵ_r = Konstanta dielektrik relatif material

C_0 = Kapasitansi dengan tidak adanya konstanta dielektrik (F)

Tabel 2.1 Konstanta Dielektrik Material [17]

Bahan	Konstanta Dielektrik
Udara	1
<i>Poly Methyl Methacrylate (PMMA) / Akrilik</i>	2 – 4,5

Tembaga	6
Kayu	2,18

2.6 Perhitungan Nilai Impedansi dan Kapasitansi

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) [24]. LibreVNA mampu menghasilkan 500 data *point* bilangan imajiner dan rill, dalam rentang frekuensi 100 kHz – 6 GHz. Nilai imajiner mengimplementasikan nilai reaktansi sedang nilai rill merupakan nilai resistensi. Kemudian kedua nilai tersebut dimasukkan ke dalam formula Excel untuk memperoleh nilai impedansi dan nilai kapasitansi. Selanjutnya dengan Persamaan 2.7 dan Persamaan 2.8 dilakukan perhitungan nilai impedansi dan kapasitansi serta dengan membuat grafik yang dipengaruhi oleh perubahan frekuensi [25].

$$Z = \sqrt{\text{Real}^2 + \text{Imajiner}^2} \dots\dots\dots (2.7)$$

$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times F \times Z} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

F = Frekuensi (Hz)

Z = Impedansi (Ohm)

Untuk menghitung ketebalan lapisan maka perlu diketahui nilai kapasitansi yang didapatkan. Hubungan ketebalan dan kapasitansi adalah hubungan yang

terbalik. Semakin tebal lapisan, semakin kecil nilai kapasitansinya. Hal ini disebabkan karena semakin tebal lapisan, semakin banyak ruang yang tersedia untuk penyimpanan muatan listrik. Kapasitansi merupakan besaran yang mempresentasikan kemampuan untuk menampung muatan listrik pada suatu kapasitor. Ukuran dan bentuk dari suatu konduktor sangat mempengaruhi nilai kapasitansi yang akan bertambah apabila terdapat bahan dielektrik. Rumus untuk menghitung ketebalan berdasarkan kapasitansi seperti Persamaan 2.9. [17].

$$d = \frac{e \times e^0 \times A}{C} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

C = Kapasitansi (F)

ϵ_r = Permittivitas (akrilik = 2 – 4,5)

ϵ_r = Permittivitas (udara = 1)

ϵ_0 = Permittivitas ruang hampa ($8,854 \times 10^{-12}$ F/m)

A = Luas pelat/lempeng (m^2)

d = Jarak antara pelat/lempeng (m)

2.7 COMSOL Multiphysics

Fenomena *multiphysics* atau multifisika didefinisikan sebagai proses atau sistem yang digabungkan dengan melibatkan lebih dari satu fenomena fisika yang terjadi secara bersamaan. Multifisika adalah seni matematika, fisika, dan aplikasi yang masing-masing memberikan tiga sudut independent. Secara rinci, model matematika harus dibangun berdasarkan kondisi fisik nyata untuk masalah praktis di berbagai disiplin ilmu teknik dan sains. Matematika di sini mencakup bahasa

dasar untuk berbicara tentang multifisika seperti analisis tensor dan persamaan diferensial dan alat untuk memperoleh solusi. Salah satu *software* yang dapat digunakan dalam menganalisis multifisika yakni COMSOL *Multiphysics*. COMSOL *Multiphysics* merupakan salah satu perangkat lunak *Finite Element Method* (FEM) komersial yang banyak digunakan dalam pengembangan komputasi dan simulasi beberapa teknik tomografi elektrik seperti *Electrical Impedance Tomography*, *Electrical Capacitance Tomography* maupun *Magnetic Induction Tomography*. COMSOL memiliki modul permasalahan yang dinamakan modul AC/DC [26].

Model *electrostatics* pada modul AC/DC dapat digunakan untuk mengetahui dan memudahkan penyebaran potensial listrik pada geometri. *Electrostatics* antarmuka tersedia untuk komponen sumbu simetris 3D dan 2D. Bentuk aplikasi yang dapat menggunakan model *electrostatics* di antaranya peralatan tegangan tinggi, perangkat elektronik dan kapasitor. *Electrostatic* merupakan sub bidang elektromagnetik yang menggambarkan medan listrik yang disebabkan oleh muatan statis (tidak bergerak). Hal tersebut meliputi ruang bebas yang dipengaruhi oleh kerapatan muatan ruang (ρ) dan memiliki hubungan dengan medan listrik (E), seperti pada Persamaan 2.10. [27].

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana ϵ_0 adalah konstanta universal yang disebut permitivitas ruang bebas. Hubungan pada Persamaan 2.10 menjelaskan bahwa kerapatan muatan ruang berperan seperti sumber volume. Hubungan medan-muatan tidak cukup, tetapi persamaan Maxwell mempunyai penjelasan tambahan bahwa medan listrik ada *irrotational* (bebas melingkar) dan dijelaskan dengan Persamaan 2.11 [27].

$$\nabla \cdot E = 0 \dots\dots\dots (2.11)$$

Bahan dielektrik yang ideal dicirikan oleh fakta bahwa bahan tersebut tidak memiliki muatan bebas namun memiliki muatan terikat. Pada tingkat mikroskopis, muatan terikat ini dapat dipindahkan oleh medan listrik eksternal dan menghasilkan dipol listrik yang diinduksi. Dipol listrik yang diinduksi ini merupakan pasangan muatan elektron yang akan sejajar dengan medan listrik. Dipol listrik tersebut akan menghasilkan medan listrik di dalam bahan dielektrik yang berbeda dari ruang bebas. Untuk mendapatkan deskripsi makroskopik dari fenomena ini, akan lebih mudah untuk memperkenalkan medan vektor polarisasi (P) dan kerapatan muatan polarisasi (ρ_p), seperti pada Persamaan 2.12 [27].

$$\rho_p = -\nabla \cdot P \dots\dots\dots (2.12)$$

Efek polarisasi secara lokal akan memodifikasi medan listrik di bagian dalam material sesuai dengan Persamaan 2.13 [27]:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho + \rho_p}{\epsilon_0} \dots\dots\dots (2.13)$$

Atau dapat disamakan dengan Persamaan 2.14 [27]:

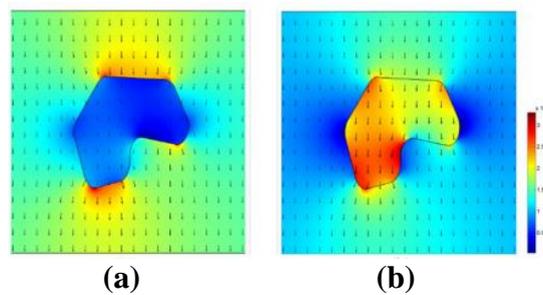
$$\nabla \cdot (\epsilon_0 E + P) = \rho \dots\dots\dots (2.14)$$

Bedasarkan perhitungan tersebut, bahwa besaran medan perpindahan listrik dapat didefinisikan dengan Persamaan 2.15 dan Persamaan 2.16 [27]:

$$\nabla \cdot D = \rho \dots\dots\dots (2.15)$$

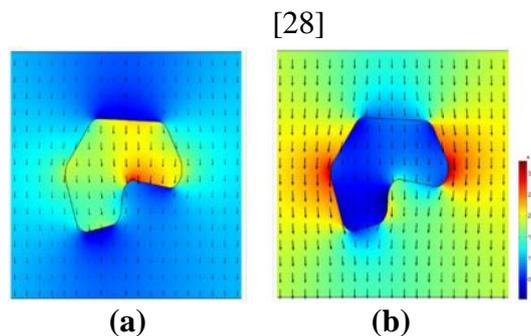
$$-\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla V - P) = \rho \dots\dots\dots (2.16)$$

Medan di sekitar objek dengan permitivitas lebih tinggi dari sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 2.5. Gambar tersebut menunjukkan material dielektrik, ($\epsilon_r = 2$) dikelilingi oleh udara ($\epsilon_r = 1$) di antara dua pelat kapasitor. Elektroda atas dan bawah masing-masing memiliki potensial listrik positif dan negatif. Gambar 2.5 (a) Besar Medan Listrik menunjukkan besar medan listrik E berwarna dan arahnya dengan tanda panah. Sedangkan Gambar 2.5 (b) Besar Perpindahan Medan Listrik menunjukkan besarnya medan perpindahan listrik D dalam warna dan arahnya dengan panah. Merah dan biru masing-masing mewakili nilai *magnitude* tinggi dan rendah.



Gambar 2.5 Medan Objek dengan Permittivitas Lebih Tinggi dari Sekitar Objek

(a) Besar Medan Listrik, (b) Besar Medan Perpindahan Listrik



Gambar 2.6 Medan Objek dengan Permittivitas Lebih Rendah dari Sekitar Objek

(a) Besar Medan Listrik, (b) Besar Medan Perpindahan Listrik

[28]

Medan di sekitar objek dengan permitivitas lebih rendah dari sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 2.6. Gambar menunjukkan rongga udara ($\epsilon_r = 1$) dikelilingi oleh bahan dielektrik ($\epsilon_r = 2$) antara dua pelat kapasitor. Elektroda atas dan bawah masing-masing memiliki potensial listrik positif dan negatif. Gambar 2.6 (a) Besar Medan Listrik menunjukkan besar medan listrik E berwarna dan arahnya dengan tanda panah. Sedangkan Gambar 2.6 (b) Besar Perpindahan Medan Listrik menunjukkan besarnya medan perpindahan listrik D dalam warna dan arahnya dengan panah. Merah dan biru masing-masing mewakili nilai *magnitude* tinggi dan rendah.

Energi *electrostatics* yang terkandung dalam suatu medan dapat dinyatakan dalam berbagai cara. Untuk media dielektrik, energi *electrostatics* dalam volume dapat dinyatakan dalam besaran medan pada Persamaan 2.17. [27].

$$W_\epsilon = \frac{1}{2} \int_V D \cdot E dV \dots\dots\dots (2.17)$$

Dimana kerapatan energi *electrostatics* didefinisikan pada Persamaan 2.18. [27].

$$W_\epsilon = \frac{1}{2} D \cdot E \dots\dots\dots (2.18)$$

Konsep energi *electrostatics* berguna ketika menghitung gaya *electrostatics* dan nilai kapasitansi [27].

2.8 *Vector Network Analyzer* (VNA)

Vector Network Analyzer (VNA) merupakan instrumen yang digunakan untuk mengkarakterisasi komponen yang memiliki frekuensi seperti radio. VNA digunakan untuk pengukuran koefisien transmisi (TC) dan koefisien refleksi (RC) pada suatu material dengan frekuensi gelombang mikro. Koefisien transmisi (TC)

dan koefisien refleksi (RC) yang diperoleh digunakan untuk mendapatkan nilai *permittivity* (dielektrik) dan *permeability* (*magnetic*). Koefisien transmisi (TC) adalah perbandingan antara energi gelombang mikro yang melewati suatu material dengan energi gelombang mikro yang datang pada material tersebut. Koefisien refleksi (RC) adalah perbandingan antara energi gelombang mikro yang dipantulkan oleh suatu material dengan energi gelombang mikro yang datang pada material tersebut. Prinsip pengukuran VNA adalah pengukuran rasio koheren antara sinyal yang ditransmisikan dan diterima melalui pemancar atau penerima yang dihubungkan ke VNA. Sebagian besar VNA memiliki dua tipe *port*. Pertama adalah *port* refleksi dimana satu *port* yang ada pada VNA berfungsi sebagai input dan output, memiliki parameter S_{11} . *Port* akan menghasilkan *incident signal*, biasanya berupa frekuensi linier atau logaritmik yang dapat menangkap gelombang elektromagnetik. Selain *port* refleksi, terdapat *port* transmisi dimana ini menggunakan dua *port* yang ada pada VNA dan memiliki parameter S_{21} . Parameter S_{11} adalah parameter refleksi, yang mengukur jumlah daya yang dipantulkan kembali ke *port 1* dari rangkaian atau mengukur refleksi dari sinyal yang dikirimkan ke *port 1* dari perangkat atau komponen yang diuji. Parameter S_{21} adalah parameter transmisi, yang mengukur jumlah daya yang ditransmisikan dari *port 1* ke *port 2* dari rangkaian atau mengukur transmisi sinyal dari *port 1* ke *port 2* pada perangkat atau komponen yang diuji. VNA dapat menghitung, menyimpan, dan menampilkan *scattering parameters* ketika dihubungkan pada suatu objek yang memiliki energi kelistrikan. S_{11} dan S_{21} didefinisikan sebagai rasio kompleks dari sinyal yang direfleksikan atau ditransmisikan ke *incident signal* [29].

Parameter yang dapat diperoleh dari VNA di antaranya dalam besaran *magnitude/phase form, real/imaginary form, group delay*, impedansi, dan lain-lain. Dari data *real* dan imajiner yang dihasilkan VNA, terdapat korelasi antar kedua komponen. Estimasi koefisien korelasi antara komponen real dan imajiner dapat dituliskan pada Persamaan 2.19 [25].

$$R(x, y) = \frac{u(x,y)}{u(x)u(y)} \dots\dots\dots (2.19)$$

Dimana $u(x,y)$ adalah estimasi kovarian dengan rata-rata ukuran komponen x *real* dan komponen y imajiner. Sementara $u(x)$ dan $u(y)$ adalah estimasi ketidakpastian standar pada rata-rata pengukuran masing-masing komponen (Patel, Negi & Kothari, 2009). Penggunaan VNA dapat dimanfaatkan untuk mengetahui nilai impedansi dan kapasitansi dari hasil pengukuran. Ketika VNA menghasilkan nilai *real* dan imajiner, maka dapat digunakan Persamaan 2.20 dan Persamaan 2.21 untuk mengetahui nilai impedansi serta kapasitansi [25].

$$Z = \sqrt{Real^2 + Imajiner^2} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times F \times Z} \dots\dots\dots (2.21)$$

Dimana C adalah nilai kapasitansi, F adalah frekuensi dan Z adalah nilai impedansi



Gambar 2.7 Pengoperasian VNA Menggunakan Kabel Koaksial [25]