

TECHNICAL REPORT

Desain Sensor Kapasitif Model Kotak untuk Mengukur
Ketebalan Lapisan Cat pada Substrat



Disusun oleh:

Dr. Ir. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si.

Yusuf Ilham Panca Kusuma

Jurusan Teknik Metalurgi

Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

2024

RANGKUMAN EKSEKUTIF

Material memiliki sifat-sifat tertentu yang jika digunakan secara terus menerus akan mengalami penurunan performa karena kondisi operasi, sehingga menyebabkan material terdegradasi. Pencegahan perlu dilakukan agar tidak terjadi kerugian, yaitu dengan metode *coating*. *Coating* adalah lapisan penutup pada permukaan sebuah material untuk melindungi material tersebut dari kontak langsung dengan lingkungan. Bagian terpenting dari *coating* yaitu ketebalan lapisan yang diterapkan pada material. Oleh karena itu, perlu adanya tahapan inspeksi untuk mengetahui ketebalan lapisan yang dihasilkan setelah dilakukan proses *coating*, salah satunya yaitu menggunakan sensor kapasitif. Pengukuran dengan sensor kapasitif dilakukan dengan mendapatkan nilai kapasitansi menggunakan alat *Vector Network Analyzer* (VNA). Dengan mengukur nilai kapasitansi material, sensor kapasitif dapat mengetahui ketebalan lapisan. Tujuan dari penelitian ini adalah menentukan ketebalan lapisan berdasarkan perubahan nilai kapasitansi serta membandingkannya dengan pengukuran menggunakan mikrometer digital. Pengukuran ketebalan lapisan menggunakan sensor kapasitif model kotak dan model kotak spiral dilakukan pada frekuensi 100 kHz – 1 MHz, data tersebut akan diolah untuk mendapatkan nilai impedansi dan nilai kapasitansi untuk memperoleh nilai ketebalan akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan. Sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) memiliki hasil pengukuran ketebalan pada akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan yang paling optimum dibandingkan dengan sensor kapasitif model lainnya karena memiliki nilai standar deviasi yang paling rendah sehingga hasil ketebalannya paling mendekati nilai sebenarnya dari pengukuran mikrometer digital. Sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) mendapatkan nilai kapasitansi pada akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan adalah $3,64 \times 10^{-3}$ pF, $3,57 \times 10^{-3}$ pF, $3,53 \times 10^{-3}$ pF, dan $3,46 \times 10^{-3}$ pF. Pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) didapatkan ketebalan akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan adalah 2,80 mm, 2,85 mm, 2,88 mm, dan 2,94 mm. Hasil pengukuran dengan menggunakan mikrometer digital diperoleh untuk akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan adalah 2,81 mm, 2,84 mm, 2,86 mm, dan 2,93 mm. Adapun perbandingan dari ketebalan lapisan yang diperoleh dari mikrometer digital dengan sensor kapasitif model kotak untuk akrilik 3, 5, dan 7 lapisan adalah 0,01 mm dengan standar deviasi 1%, 0,01 mm dengan standar deviasi 1%, 0,02 mm dengan standar deviasi 1%, dan 0,01 mm dengan standar deviasi 1%. Pada penelitian ini, sensor kapasitif diuji performanya menggunakan *Vector Network Analyzer* (VNA) untuk mengukur ketebalan lapisan pada material. Pengujian dilakukan dengan berbagai variasi ketebalan lapisan. Hasil pengujian VNA membuktikan bahwa sensor kapasitif yang dibuat mampu membedakan dan mendeteksi perubahan nilai kapasitansi, sehingga menghasilkan nilai ketebalan lapisan yang akurat dan mendekati nilai sebenarnya dari pengukuran mikrometer digital.

Kata Kunci: Degradasi Material, Ketebalan Lapisan, Kapasitansi, Sensor Kapasitif

1. LATAR BELAKANG

Dalam bidang teknik, degradasi material adalah sebuah proses penurunan performa karena adanya pengoperasian material seperti suhu, kekuatan mekanik dan lingkungan secara bertahap. Degradasi material disebabkan oleh permukaan material yang terpapar langsung lingkungan operasi. Dalam bidang teknik, hal tersebut dapat menjadi sebuah kerugian. Salah satu pencegahan yang dilakukan adalah *coating* yaitu lapisan penutup pada permukaan sebuah material untuk melindungi material tersebut dari kontak langsung dengan lingkungan. Proses ini sangat dibutuhkan dalam dunia industri dan bertujuan untuk meningkatkan sifat permukaan seperti ketahanan terhadap korosi, goresan dan keausan dari material yang dilapisi. Secara umum, *coating* dipergunakan untuk memproteksi permukaan besi/logam. Namun *coating* dipergunakan juga pada permukaan non logam seperti kayu dan tembok untuk perlindungan ganda dan estetika, baik konstruksi baru ataupun untuk keperluan perawatan. Lapisan yang tidak merata bisa mempercepat terjadinya degradasi material sehingga mengurangi umur pakai dari material. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui ketebalan lapisan yang dihasilkan setelah dilakukan proses *coating* (Grainger & Blunt, 1989).

Pengujian tidak merusak atau *Non-Destructive Test* (NDT) merupakan metode yang sering digunakan untuk mengukur ketebalan. Teknik NDT yang umum digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan adalah *ultrasonic testing*. Adapun aplikasi lain dari *ultra testing* yaitu untuk mengetahui cacat,

retak serta pengukuran dimensi pada material. Prinsip *ultrasonic testing* adalah memanfaatkan gelombang ultrasonik yang dikeluarkan oleh *transducer* pada benda kerja/material lalu gelombang baliknya ditangkap oleh *receiver* (Debora, 2013). *Ultrasonic testing* memiliki beberapa kekurangan seperti diperlukannya *couplant* (cairan untuk media transmisi), tidak bisa dilakukan terhadap benda uji dengan permukaan kasar, bentuk tidak beraturan, ukurannya kecil dan tipis, serta tidak homogen karena gelombang ultrasonik dapat terhambat, terdispersi atau merambat dengan kecepatan yang berbeda di area yang berbeda menghasilkan hasil yang tidak akurat. Maka dari itu, metode alternatif sebagai penyempurnaan untuk mengukur ketebalan lapisan yang dapat mengatasi kekurangan secara prinsip kerja dari metode *ultrasonic testing* yaitu dengan menggunakan sensor kapasitif.

Sensor kapasitif telah digunakan di berbagai aplikasi, salah satunya dalam mengukur ketebalan lapisan karena mempunyai kelebihan seperti biaya yang murah, *non-intrusive* (tanpa memasukkan alat). Sensor kapasitif beroperasi tanpa kontak fisik dengan material sehingga meminimalkan risiko kerusakan pada material yang sensitif atau halus. Sensor kapasitif mampu mendeteksi perubahan kecil dalam jarak antara lempengan sehingga memungkinkan pengukuran ketebalan lapisan dengan resolusi yang sangat tinggi (dalam skala mikron atau bahkan nanometer), fleksibilitas dalam desain elektroda atau fleksibilitas konfigurasi sensor kapasitif dapat disesuaikan dengan berbagai ukuran dan bentuk material

yang diukur. Kecepatan pengukuran sensor kapasitif memiliki waktu respons yang cepat, memungkinkan pengukuran ketebalan lapisan secara *real-time*. Ketahanan lingkungan sensor kapasitif tertentu dapat dibuat tahan terhadap kondisi lingkungan yang keras seperti suhu ekstrem, kelembaban tinggi, atau bahan kimia korosif. Sensor kapasitif dapat digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan pada berbagai macam material, dan tidak ada efek radiasi dalam penggunaan sensor kapasitif (Hu & Yang, 2010).

Perubahan ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik akan menyebabkan adanya perubahan nilai kapasitansi pada sensor kapasitif yang dapat diketahui dengan mengukur menggunakan alat *vector network analyzer* (VNA) berupa data *real* dan imajiner, yang nantinya data tersebut akan diolah untuk mendapatkan besaran nilai impedansi dan nilai kapasitansi. Pada penelitian sebelumnya, telah dilakukan pembuatan sensor kapasitif dengan menggunakan 9 elektroda yang berhasil didesain dan difabrikasi serta berhasil mengukur ketebalan lapisan *coating* tetapi masih belum akurat (Yuditama, 2022). Hal ini dapat diketahui dari selisih perbandingan nilai ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik hasil pengolahan data *vector network analyzer* (VNA) dari sensor kapasitif dengan hasil pengukuran menggunakan mikrometer sekrup, yaitu untuk akrilik tanpa lapisan 0,11 mm, akrilik 1 lapisan 0,19 mm, dan akrilik 3 lapisan 0,17 mm. Akurat yang dimaksud dalam mengukur ketebalan secara konsisten adalah kemampuan sensor untuk memberikan hasil pengukuran

yang sama atau mendekati nilai yang sebenarnya setiap kali dilakukan pengukuran.

Pada penelitian ini, akan dilakukan pembuatan sensor kapasitif dengan memodifikasi dari bentuk geometri desain sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral. Sebelum dilakukan prototipe akan dilakukan pembuatan simulasi sensor kapasitif menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* 4.4 hal ini membantu memvisualisasi distribusi medan listrik dan memahami cara kerja sensor, menganalisis pengaruh berbagai parameter desain pada kinerja sensor, menghitung kapasitansi sensor berdasarkan medan listrik yang disimulasikan, menganalisis pengaruh dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral terhadap nilai kapasitansi.

Sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak memiliki sensitivitas tinggi dan akurasi dalam pengukuran keseluruhan ketebalan lapisan pada suatu area. Di sisi lain, bentuk elektroda model kotak spiral menawarkan keunggulan dalam medan listrik yang lebih terfokus, memungkinkan pengukuran yang presisi terhadap distribusi ketebalan. Pola elektroda model kotak spiral sensor dapat memberikan detail dan sensitivitas yang lebih baik terhadap variasi ketebalan yang mungkin tidak terdeteksi oleh elektroda model kotak. Pemilihan antara keduanya tergantung pada kebutuhan aplikasi, di mana bentuk elektroda model kotak cocok untuk pengukuran keseluruhan dengan sensitivitas tinggi, sementara bentuk elektroda model kotak spiral lebih sesuai untuk mendapatkan ketelitian

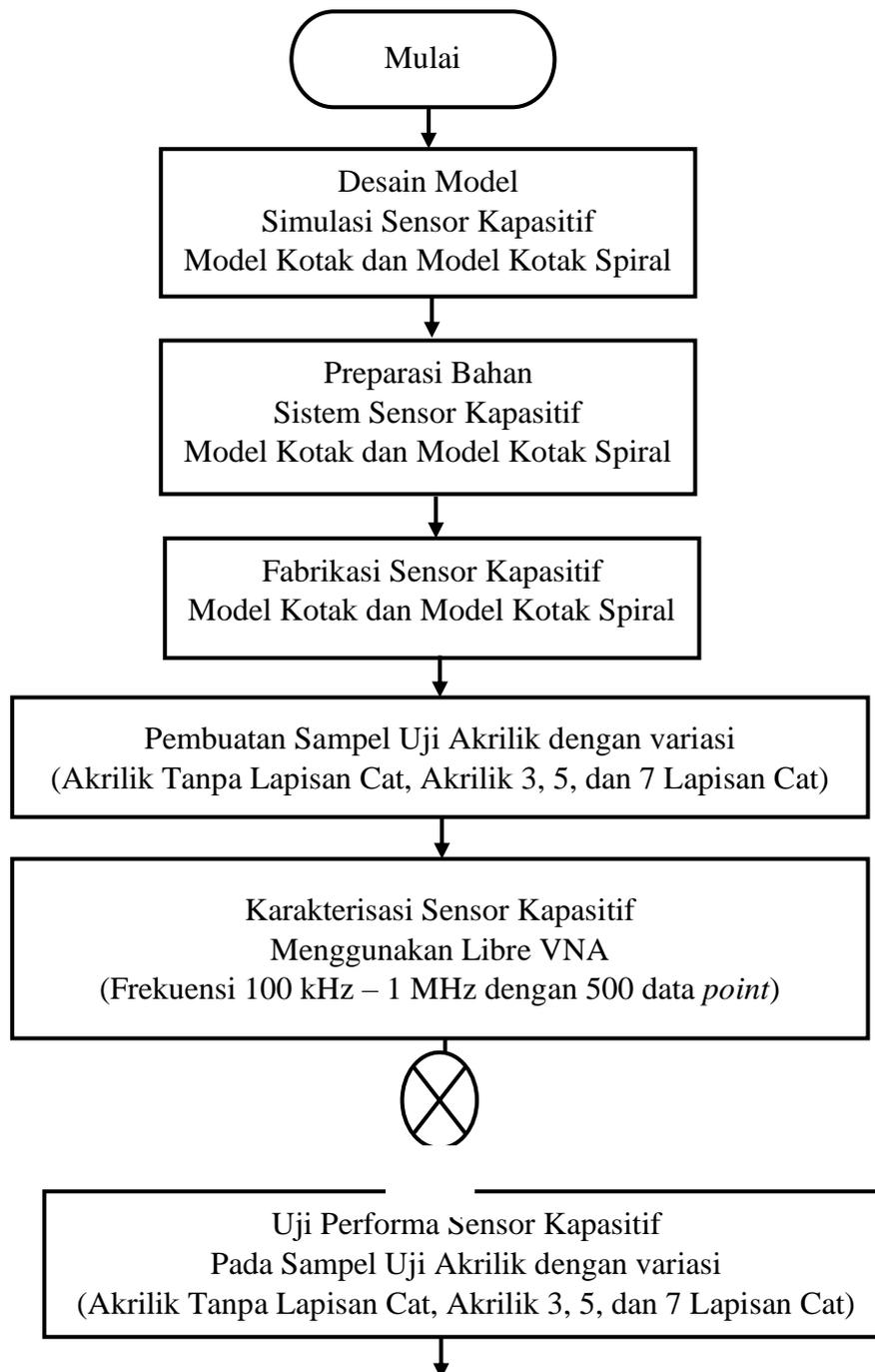
pada distribusi ketebalan yang kompleks (Chen, T., & Bowler, 2013). Oleh karena itu, sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral akan dapat dibandingkan hasilnya.

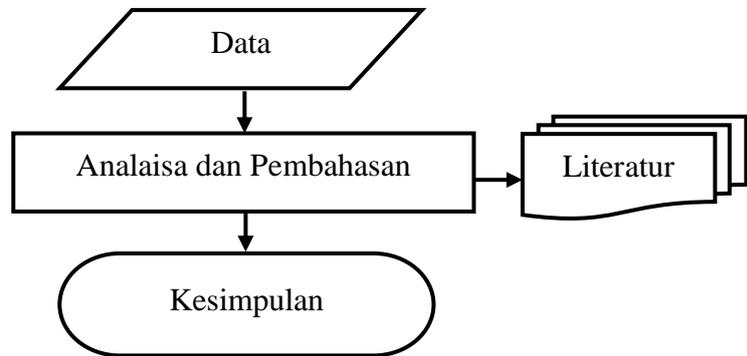
Dengan demikian, tujuan akhir yang diharapkan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan sensor kapasitif dengan desain bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral yang dapat mengidentifikasi perubahan nilai kapasitansi dengan akurat serta konsisten dalam mengukur beragam ketebalan lapisan cat pada substrat.

Berdasarkan latar belakang penelitian, sensor kapasitif mampu mengukur beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik tetapi masih belum akurat. Oleh karena itu, perlu dilakukan modifikasi desain sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral sehingga diharapkan mampu menghasilkan sensitivitas yang tinggi dan pemeriksaan ulang penggunaan beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik. Karakterisasi sensor dilakukan untuk menentukan frekuensi optimal sensor dan juga untuk menguji performa sensor dalam mengukur impedansi dan kapasitansi. Oleh karena itu, diharapkan nilai kapasitansi yang diperoleh dari hasil pengukuran dapat dikorelasikan dengan beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik.

2. METODE PENDEKATAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa proses yaitu desain dan simulasi sensor, fabrikasi sensor, karakterisasi dan uji performa sensor, serta analisis dan pembahasan. Rangkaian tersebut akan dilakukan sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 1.





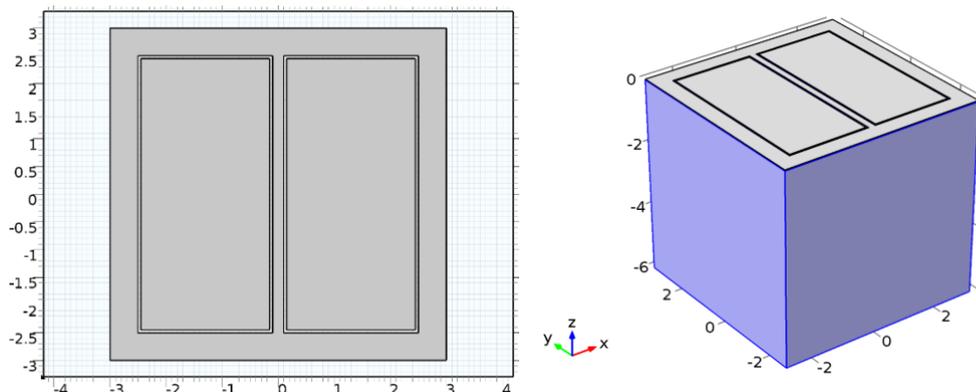
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

2.1. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

Desain Model

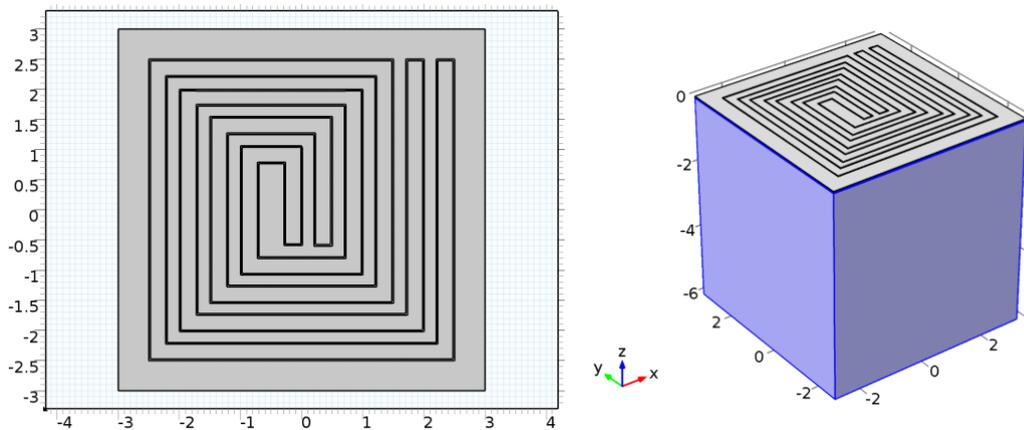
Desain sensor yang disimulasikan menggunakan modul AC/DC dan elektrostatik sebagai fisis untuk mendapatkan nilai kapasitansi. Sensor kapasitif didesain dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral dengan detail yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3 serta ukuran geometri pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 2 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak

Tabel 1 Ukuran Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak

Panjang	6 cm
Lebar	6 cm
Tinggi	6 cm



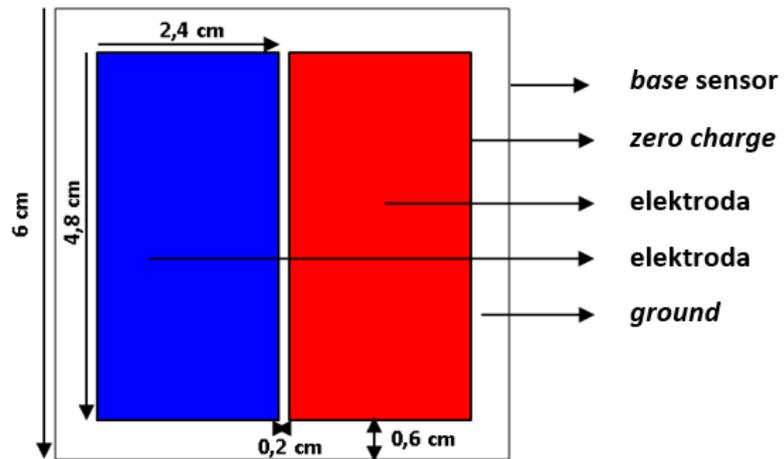
Gambar 3 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Tabel 2 Ukuran Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

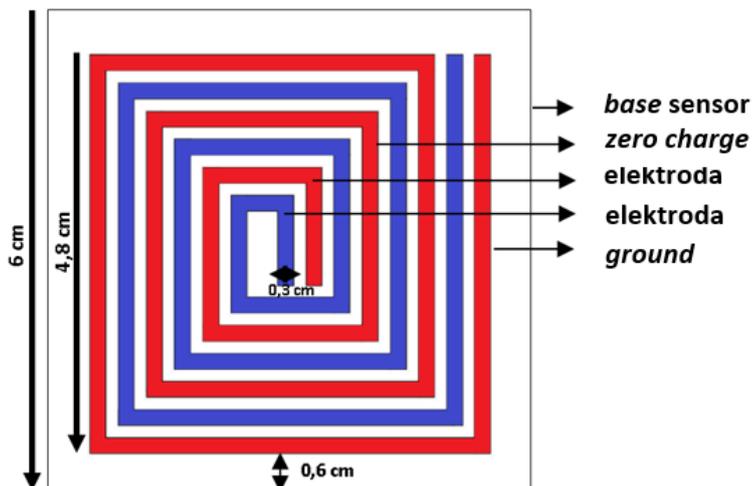
Panjang	6 cm
Lebar	6 cm
Tinggi	6 cm

Selain itu, terdapat lapisan-lapisan yang termasuk dalam bagian sensor.

Lapisan tersebut yaitu *base sensor*, *ground*, *zero charge*, dan *electroda*.



Gambar 4 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak

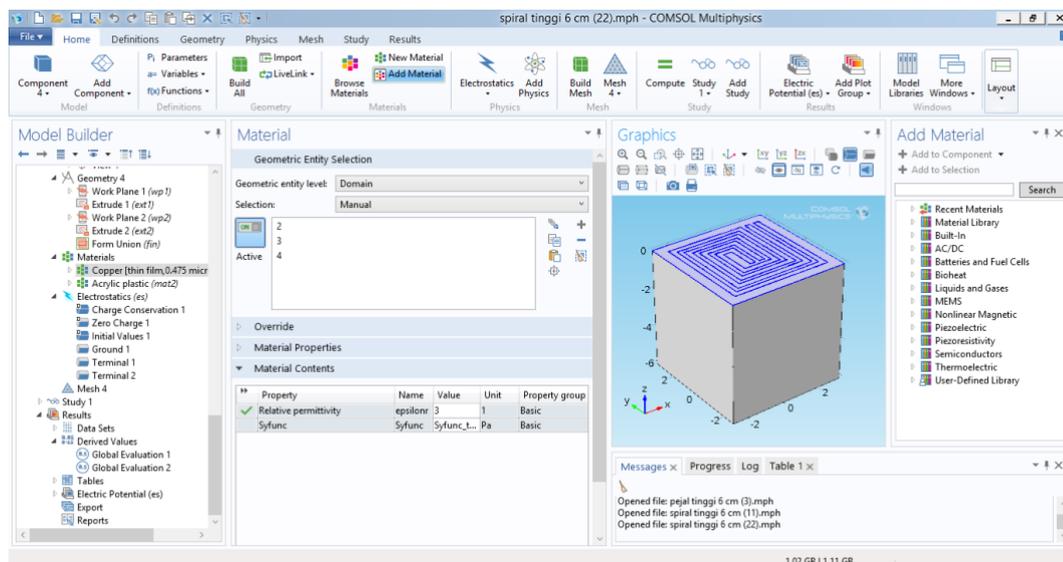


Gambar 5 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Pembuatan desain 3D dan simulasi sensor dilakukan dengan menggunakan *software* COMSOL *Multyphysics* 4.4. desain sensor berukuran 6 cm x 6 cm. Simulasi tersebut akan digunakan untuk memprediksi berbagai parameter fisika dalam percobaan yang akan dianalisis. Sensor yang dibuat dengan memasukkan parameter fisika di antaranya yakni *sebagai* berikut.

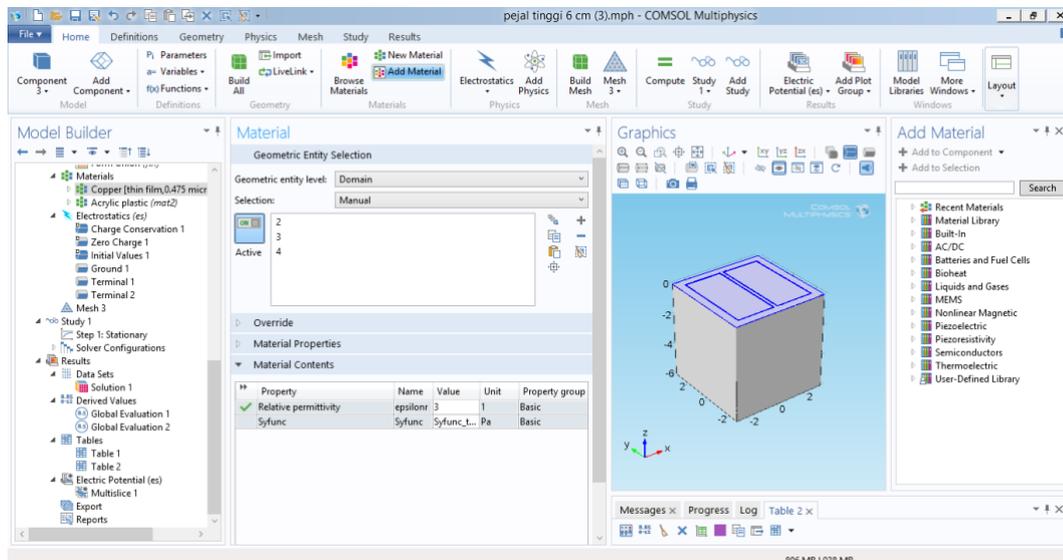
Parameter *Domain*

Parameter *domain* diperlukan untuk karakteristik fisis pada subbidang utama geometri sensor. Adapun karakteristik fisis yang digunakan yaitu medan elektrostatis (es) pada simulasi sensor kapasitif. Setelah itu parameter yang digunakan adalah pemilihan material dan nilai permitivitas relatif (ϵ_r). Material yang dipilih adalah akrilik dan tembaga dengan memasukkan nilai permitivitas relatif (ϵ_r) yaitu 3 dan 6 yang digunakan dalam proses simulasi sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral. Setelah itu, menentukan bagian sensor kapasitif yang akan menggunakan material akrilik dan tembaga, baik pada model elektroda kotak maupun model elektroda spiral. Tampilan parameter *domain* pada COMSOL *Multiphysics* 4.4 dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6 Pengaturan *Domain* pada Material Sensor Kapasitif Model Kotak

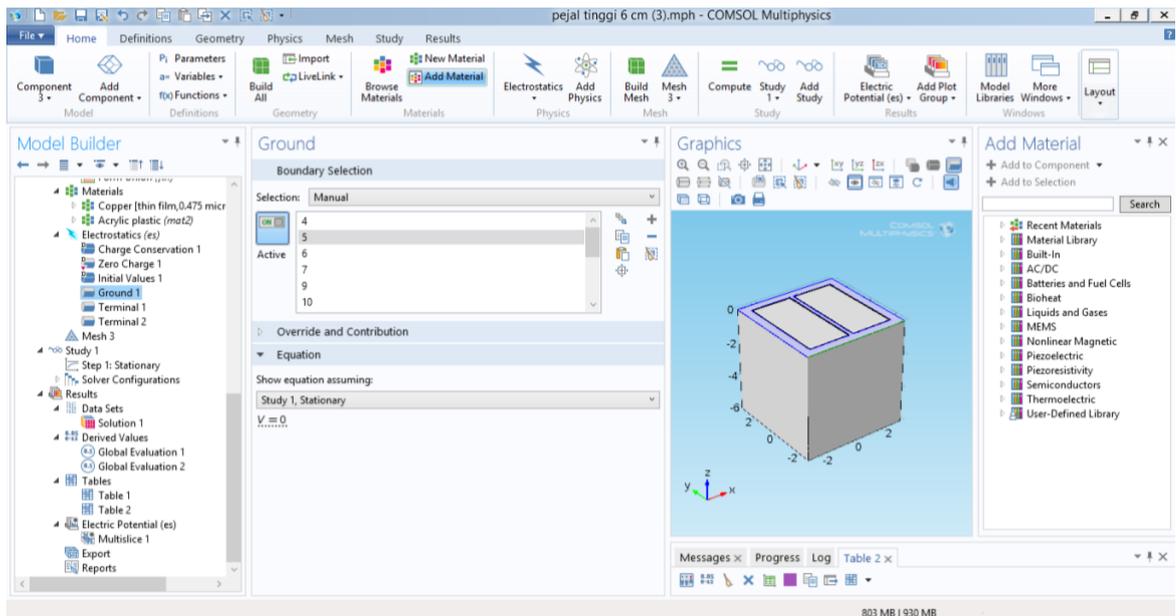
Gambar 7 Pengaturan *Domain* pada



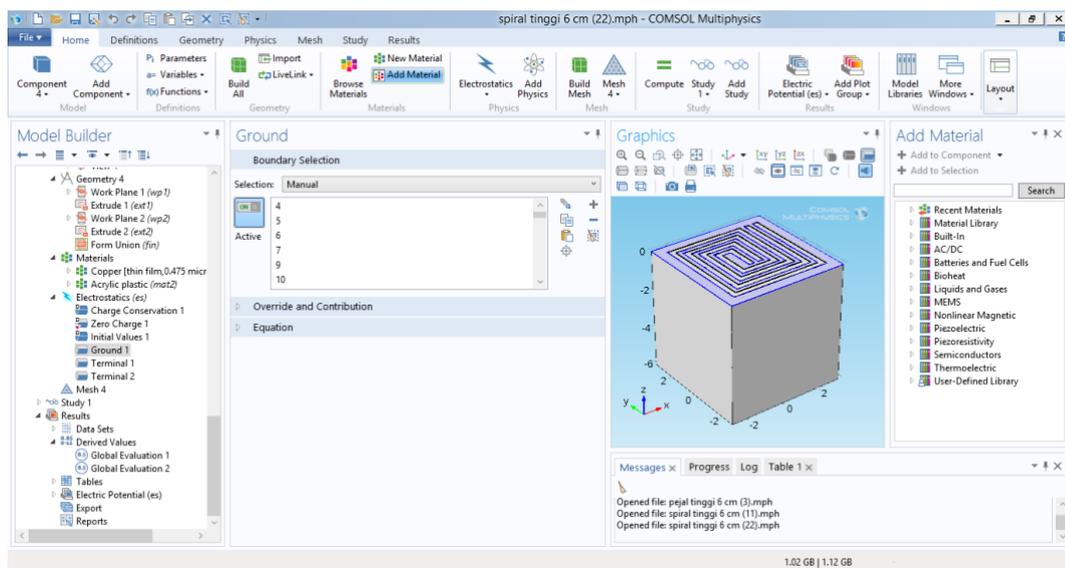
Material Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Parameter *Boundary*

Parameter *boundary* diperlukan untuk memilih dan menentukan bagian-bagian pada simulasi yang dibuat. Dengan demikian, bagian-bagian pada geometri akan saling terhubung dengan kondisi sekelilingnya. Daerah medan elektrostatis dipilih menggunakan setting *boundary selection* yang dapat dilihat pada Gambar. Parameter yang digunakan yaitu *ground* dan terminal atau elektroda (1 hingga 2). Setelah itu menentukan bagian-bagian yang akan digunakan sebagai *ground*. Lalu menentukan bagian-bagian yang akan digunakan sebagai terminal atau elektroda (1 hingga 2) dan memasukkan nilai tegangan 5 V pada terminal 1, nilai tegangan 0 V pada terminal 2 untuk sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral.



Gambar 8 Setting Boundary Selection pada Ground Sensor Kapasitif Model Kotak

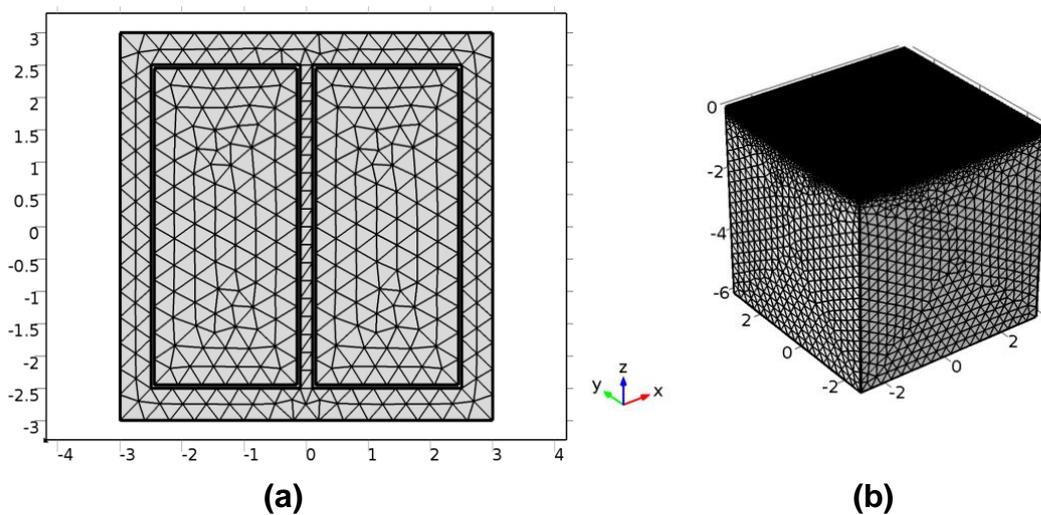


Gambar 9 Setting Boundary Selection pada Ground Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

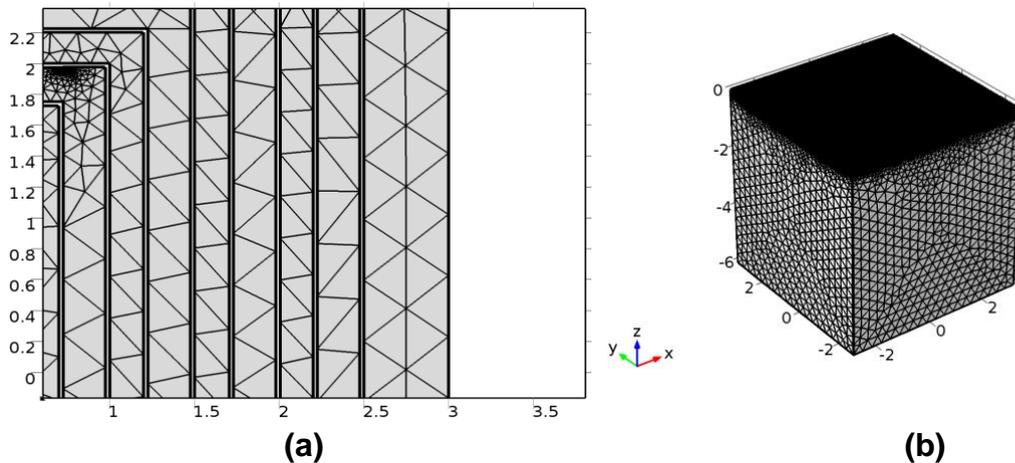
Parameter Meshing

Meshing adalah proses membagi komponen yang akan dianalisis menjadi elemen-elemen kecil atau diskrit. Semakin baik kualitas *mesh* maka akan semakin tinggi tingkat kedetailannya. Tingkat detail hasil *meshing* yang

semakin halus dan kecil maka semakin teliti hasil komputasi yang didapatkan sehingga semakin sedikit *error* yang dihasilkan pada geometri sensor tersebut. Secara umum parameter yang digunakan bentuk sel dari proses *meshing* dibagi menjadi dua jenis, yaitu dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D). Untuk sel 2D terdapat dua jenis bentuk sel yaitu *triangle* dan *quadrilateral*. Sedangkan pada bentuk sel 3D terbagi ke dalam empat jenis, yaitu *tetrahedral*, *pyramid*, *triangular prism*, *hexahedron*. Pada penelitian ini akan menggunakan parameter *meshing* 3 dimensi jenis tetrahedral dengan tingkat *finer*, karena memiliki kualitas *meshing* yang baik secara halus dan detail sehingga dapat mempengaruhi ketika dilakukan komputasi. Nilai *size* dari tingkat *finer* itu sendiri yaitu element size sebesar 0.0241 – 0.332 cm dan *maximum element growth rate* sebesar 1,4 untuk sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral. Hasil *meshing* geometri sensor ini dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 (a) Meshing Layer pada Sensor (b) Meshing Keseluruhan Sensor Kapasitif Model Kotak

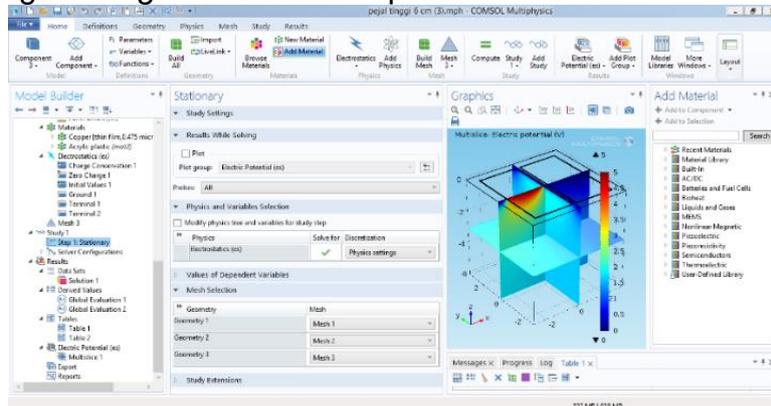


Gambar 11 (a) Meshing Layer pada Sensor (b) Meshing Keseluruhan
Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

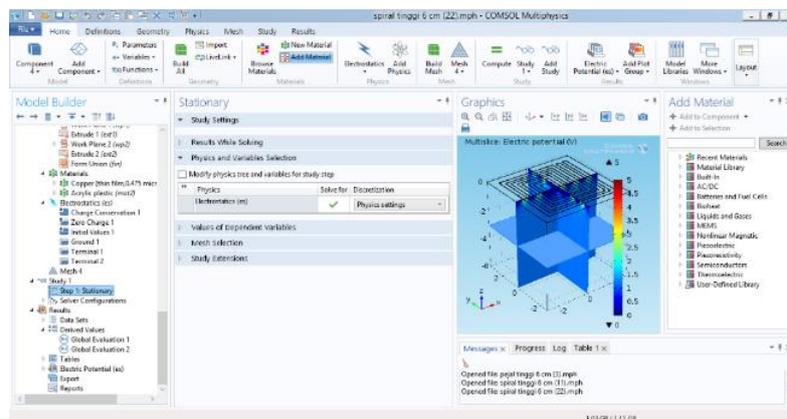
Parameter Study

Setelah semua parameter dimasukkan ke dalam simulasi, selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil nilai kapasitansi pada sensor yang telah dibuat. Terdapat menu *study* yang berfungsi untuk melakukan komputasi dari proses yang akan dilakukan yang pada kasus ini yaitu menggunakan parameter fisis *electrostatics* sehingga akan diketahui nilai kapasitansi berdasarkan parameter yang sudah dimasukkan. Menu *Study* pada modul *stationary* berfungsi untuk menghitung medan listrik, magnet statis, serta arus searah. Modul *stationary* tersebut digunakan untuk mencari nilai kapasitansi. Setelah itu, hasil perhitungan diatur pada *global evaluation* dengan memilih *expression* *es.C11* dan *es.C21* pada modul *physics electrostatics*, *es.C11* menunjukkan kapasitansi antara terminal yang sama antara terminal 1 sebagai *transmitter* dan terminal 1 sebagai *receiver*, sementara *es.C21* menunjukkan kapasitansi antara terminal yang berbeda

antara terminal 1 sebagai *transmitter* dan terminal 2 sebagai *receiver*. Gambar 12 dan Gambar 13 menunjukkan tampilan *study* modul *stationary* dan pengaturan *global evaluation* pada menu *results*.



Gambar 3.12 Study Modul Stationary dan Global Evaluation pada Menu Results Sensor Kapasitif Model Kotak

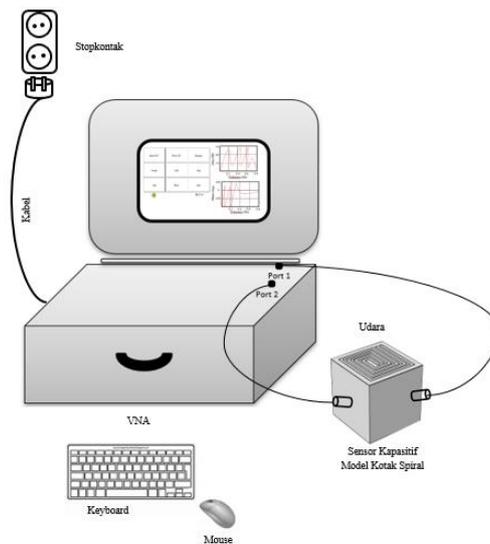


Gambar 3.13 Study Modul Stationary dan Global Evaluation pada Menu Results Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Karakterisasi Sensor Kapasitif

Karakterisasi sensor dilakukan menggunakan libre VNA dengan parameter yang digunakan meliputi frekuensi dimulai dari 1 kHz – 1 MHz dengan menggunakan 500 data *point*, mengatur IFBW sebesar 100, LVL sebesar 10, AVG sebesar 1 serta parameter S21 digunakan sebagai metode

pengukuran menghubungkan VNA dengan kabel konektor *transmitter (TX)* sensor ke *port 1* dan kabel konektor *receiver (RX)* sensor ke *port 2*. Sebelum melakukan pengukuran dilakukan poses kalibrasi bertujuan untuk mengurangi kesalahan pengukuran pada sensor dengan menggunakan modul *Open*, *Short*, dan *Load*. Pengukuran karakterisasi sensor ini dilakukan pada kondisi temperatur ruang, dimana sampel akrilik diletakkan di atas sensor secara bergantian. Kondisi waktu yang konsisten saat pengukuran dilakukan untuk mengetahui karakteristik sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral.



Gambar 14 Skema Karakterisasi Sensor Kapasitif Model Kotak dan Model Kotak Spiral

Uji Performa Sensor Kapasitif

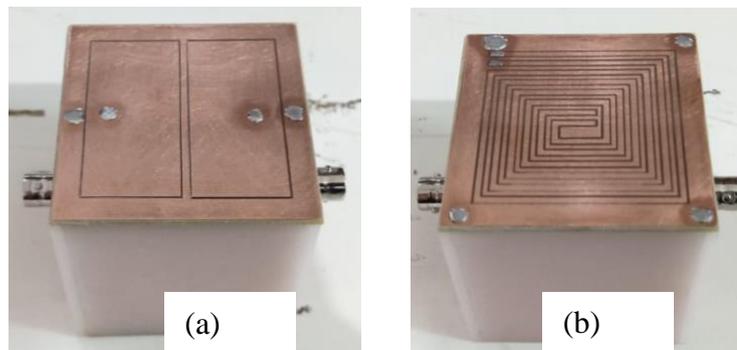
Uji performa sensor dilakukan dengan menggunakan *Vector Network Analyzer (VNA)*. Sensor yang telah dirangkai disambungkan pada Libre

VNA dengan menggunakan rentang frekuensi sebesar 100 kHz – 1 MHz dengan 500 data *point*. Berikut tahapan uji performa sensor:

1. Menyalakan Libre VNA, membuka *software* Libre VNA dan membuka *software spyder*.
2. Melakukan proses kalibrasi LibreVNA terlebih dulu, dengan menggunakan modul *Open*, *Short*, dan *Load*. Proses kalibrasi bertujuan untuk mengurangi kesalahan pengukuran pada sensor.
3. Sensor kapasitif model kotak dihubungkan pada LibreVNA.
4. Sampel uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, dan akrilik 7 lapisan secara bergantian diletakkan di atas permukaan sensor kapasitif model kotak untuk dilakukan pengukuran sebanyak 100 data tiap sampel uji.
5. Hasil yang diperoleh dari VNA berupa bilangan imajiner dan riil.
6. Hasil data yang diperoleh akan diolah untuk mendapatkan nilai impedansi dan kapasitans.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebelum melakukan fabrikasi sensor, hal yang dilakukan adalah membuat desain serta simulasi sensor kapasitif menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* 4.4 untuk membantu memvisualisasi distribusi medan listrik dan memahami cara kerja sensor, menganalisis pengaruh berbagai parameter desain pada kinerja sensor, menghitung kapasitansi sensor berdasarkan medan listrik yang disimulasikan, menganalisis pengaruh bentuk elektroda kotak atau kotak spiral terhadap nilai kapasitansi. Oleh karena itu, dilakukan simulasi sebelum pembuatan prototipe sensor kapasitif. Setelah dilakukan pembuatan prototipe sensor kapasitif dan fabrikasi dilanjutkan dengan proses karakterisasi dan uji performa sensor kapasitif. Hasil fabrikasi sensor dapat dilihat pada Gambar 15.

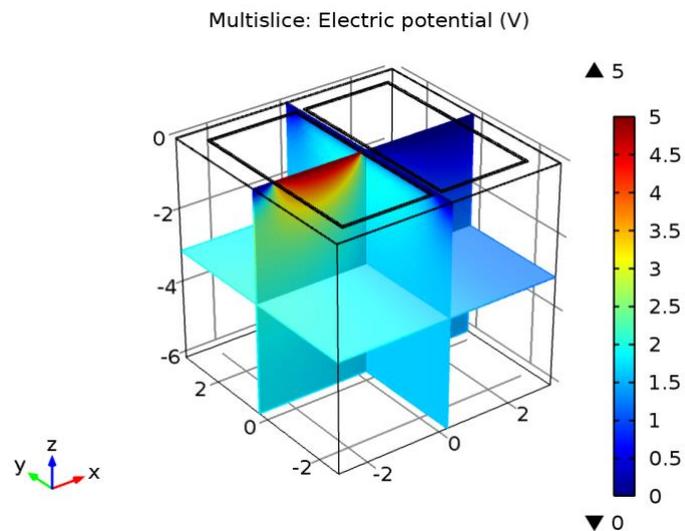


Gambar 15 Sensor Kapasitif Model **(a)** Kotak dan **(b)** Kotak Spiral

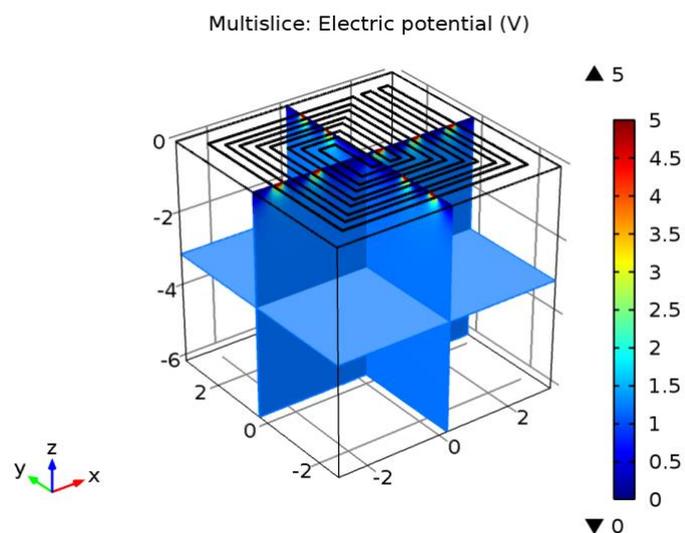
Simulasi Desain Sensor Kapasitif dengan Menggunakan COMSOL

Multiphysics 4.4

Sensor kapasitif dengan model bentuk elektroda kotak dan kotak spiral disimulasikan dengan menggunakan *software* COMSOL *Multyphysics 4.4* dengan desain mempunyai luas 6 x 6 cm dan memiliki 2 elektroda.



Gambar 16 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak



Gambar 17 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak

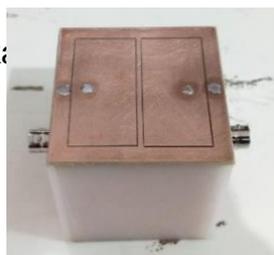
Spiral

Pada Gambar 16 dan Gambar 17 dijelaskan proses simulasi dilakukan dengan memberikan tegangan 5 V listrik pada elektroda sensor yang aktif. Medan listrik keluar dari detektor yang bermuatan positif/*transmitter*/Tx (tegangan tinggi) kemudian masuk menuju detektor bermuatan negatif/*receiver*/Rx (tegangan rendah). Potensial listrik paling tinggi terdapat di elektroda Tx (merah) dan potensial listrik akan semakin berkurang ke arah Rx (biru muda). Potensial listrik berpengaruh terhadap medan listrik yang dihasilkan. Semakin besar nilai potensial listrik maka semakin besar juga medan listrik yang dihasilkan. Nilai medan listrik pada daerah Tx 5 V/m sedangkan daerah benda uji berada pada range 3-4.5 V/m. Dengan adanya beda tegangan yang diberikan pada sensor, maka terjadi distribusi medan listrik ke seluruh daerah pengukuran sensor. Kapasitansi yang didapatkan sensor kapasitif model kotak setelah diberikan tegangan elektrostatik menghasilkan nilai es.C11 dengan kapasitansi 4.26765×10^{-12} pF dan menghasilkan nilai es.C21 dengan kapasitansi -8.03222×10^{-13} pF. Kapasitansi yang didapatkan sensor kapasitif model kotak spiral setelah diberikan tegangan elektrostatik menghasilkan nilai es.C11 dengan kapasitansi 1.2151×10^{-9} pF dan menghasilkan nilai es.C21 dengan kapasitansi -1.46377×10^{-10} pF. Nilai kapasitansi yang dihasilkan pada proses simulasi sensor dapat menjadi sebuah acuan kinerja sensor sebelum dilakukan pembuatan prototipe. Sensor diberi tegangan elektrostatik pada elektroda *transmitter* dan tegangan tersebut akan menghasilkan kapasitansi dari hubungan elektrik dua elektroda.

Elektrostatik sebagai parameter fisis dipilih untuk mengetahui sifat dari desain sensor ketika diberi medan listrik karena pada dasarnya setiap bahan memiliki karakteristik yang berbeda-beda (Setiawan, R., dkk. 2019).

Karakterisasi Sensor Kapasitif

Karakterisasi sensor merujuk pada serangkaian uji dan analisis yang dilakukan untuk memahami karakteristik dan mengevaluasi kinerja suatu sensor. Proses karakterisasi bertujuan untuk mengetahui frekuensi kerja, impedansi dan kapasitansi yang dihasilkan oleh sensor, sehingga diketahui akurasi serta sensitivitas sensor yang bekerja berdasarkan konsep kapasitif sehingga diketahui hasil yang paling optimum, yang nantinya akan diaplikasikan untuk uji performa sensor. Karakterisasi dilakukan menggunakan sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) serta sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2). Perbedaan dari tipe sensor dipengaruhi oleh komposisi bahan yang digunakan. Dalam pembuatan sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) menggunakan bahan PCB dan akrilik sebagai elektroda serta *ground*. Sedangkan pada pembuatan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) menggunakan

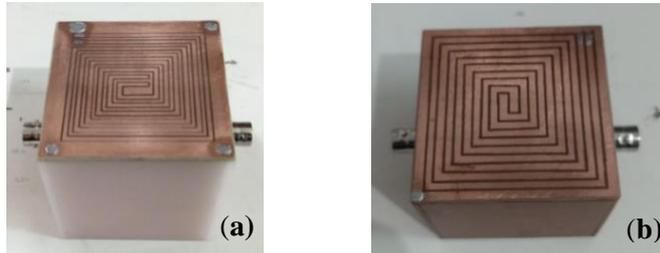


(a)



(b)

Gambar 18 Sensor Kapasitif Model Kotak (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2



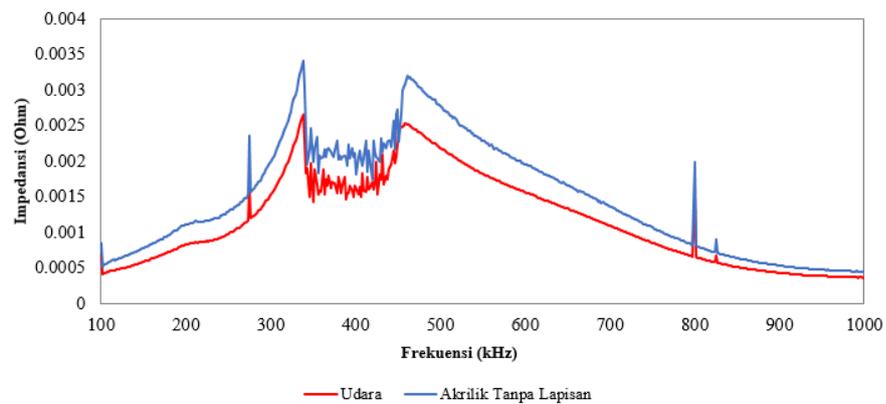
Gambar 19 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2

Karakterisasi sensor kapasitif model kotak dan model kotak spiral dilakukan menggunakan libre VNA dengan frekuensi dimulai dari 1 khz – 1 MHz dengan menggunakan 500 data *point*. Pengukuran karakterisasi sensor ini dilakukan pada kondisi temperatur ruang, dimana sampel akrilik diletakkan di atas sensor secara bergantian. Penggunaan VNA dapat dimanfaatkan untuk mengetahui nilai impedansi dan kapasitansi dari hasil pengukuran.

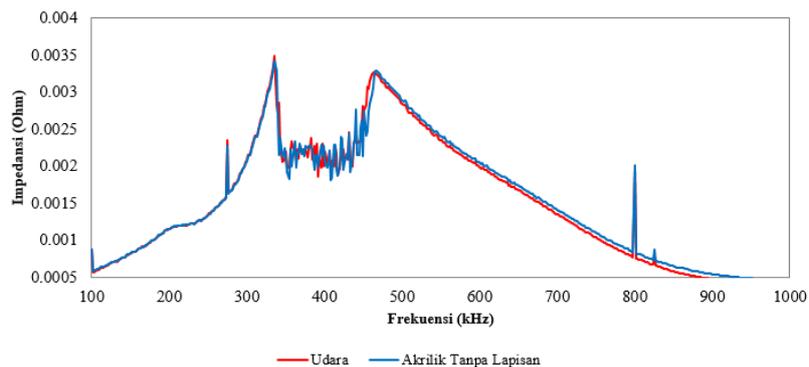
Sensor Kapasitif Model Kotak terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

Grafik hasil karakterisasi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan dapat dilihat pada Gambar 18 dan Gambar 19, grafik menunjukkan adanya *trendline* yang fluktuatif pada *range* frekuensi optimum 100 kHz – 400 kHz meningkat atau pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*) lalu menurun dan pada *range* frekuensi 400 kHz – 500 kHz meningkat atau pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*) lalu menurun stabil sampai frekuensi 1 MHz artinya kedua sensor tersebut memiliki kecenderungan yang sama hanya

stabil pada frekuensi dimana setelah melewati titik tertinggi (*peak*). Berdasarkan hasil karakterisasi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan dengan menggunakan VNA, dalam rentang frekuensi 100 kHz - 1 MHz diperoleh hasil bahwa nilai impedansi akrilik tanpa lapisan lebih besar dibandingkan dengan impedansi udara.



Gambar 20 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



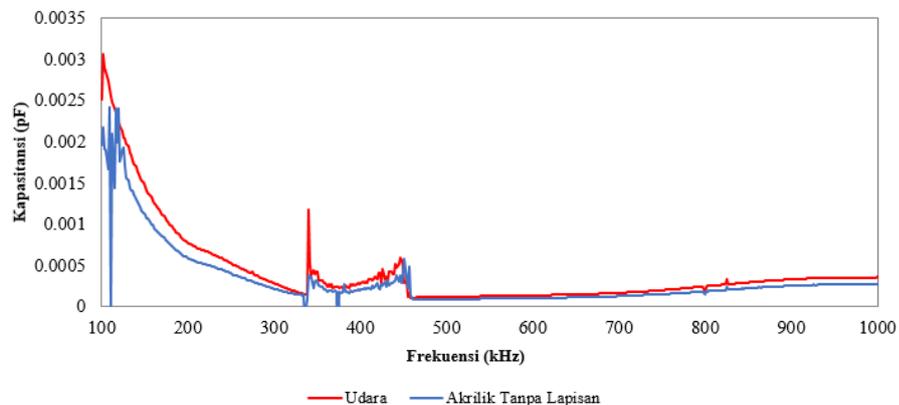
Gambar 21 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

Rata-rata impedansi udara yang diperoleh sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) sebesar $1,17 \times 10^{-3} \Omega$ dan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar

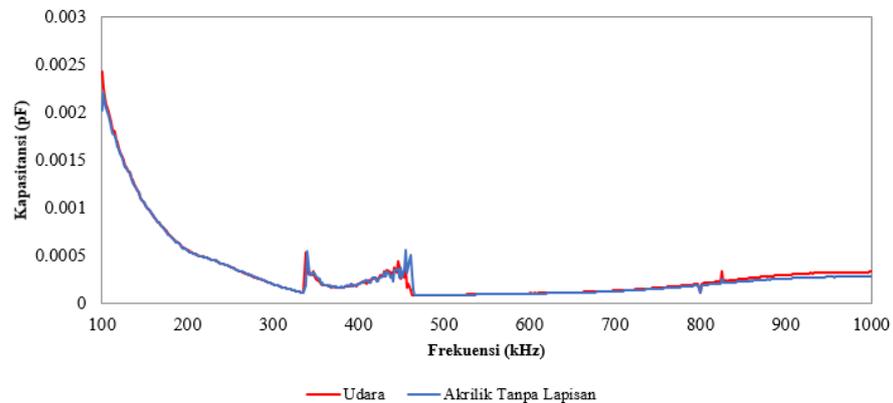
$1,47 \times 10^{-3} \Omega$. Sedangkan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) rata-rata impedansi udara yang diperoleh sebesar $1,49 \times 10^{-3} \Omega$ dan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,52 \times 10^{-3} \Omega$. Hal ini dikarenakan sensor mengukur benda uji yang memiliki nilai konstanta dielektrik (Terzic, 2012). Hasil karakterisasi mengidentifikasi bahwa kedua sensor tersebut dapat mengukur perubahan impedansi yang diterima ketika mengganti benda uji udara dengan akrilik tanpa lapisan.

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. Kapasitansi akan digunakan untuk menghitung ketebalan lapisan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui perbedaan nilai kapasitansi antara benda uji udara dengan akrilik tanpa lapisan saat dilakukan karakterisasi. Dalam hal ini peningkatan nilai kapasitansi akan menurunkan hasil impedansi yang diukur, begitupun sebaliknya (Mansor, 2017). Hal ini dikarenakan perhitungan kapasitansi dipengaruhi oleh nilai impedansi (Z). Berdasarkan Gambar 4.8 dan Gambar 4.9, grafik karakterisasi kapasitansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan dengan menggunakan VNA, dalam rentang frekuensi 100 kHz - 1 MHz diperoleh hasil bahwa nilai kapasitansi udara lebih besar dibandingkan dengan kapasitansi akrilik tanpa lapisan. Rata-rata kapasitansi udara yang diperoleh sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) sebesar $4,23 \times 10^{-4}$ pF dan

kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $3,19 \times 10^{-4}$ pF. Sedangkan rata-rata kapasitansi udara yang diperoleh sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) sebesar $3,27 \times 10^{-4}$ pF dan kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $3,17 \times 10^{-4}$ pF. Jika dibandingkan keduanya, nilai impedansi dan kapasitansi, yang diperoleh pada percobaan menghasilkan nilai yang berbanding terbalik (Kumar, 2015). Hal ini disebabkan oleh perbedaan konstanta dielektrik antara udara dan akrilik tanpa lapisan, yang menyebabkan fenomena tersebut. Hasil karakterisasi mengidentifikasi bahwa sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) dapat mengukur perubahan kapasitansi yang diterima ketika mengganti benda uji udara dengan akrilik tanpa lapisan. Kapasitansi akan meningkat atau menurun tergantung pada jenis material dielektrik yang digunakan.



Gambar 22 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



Gambar 23 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

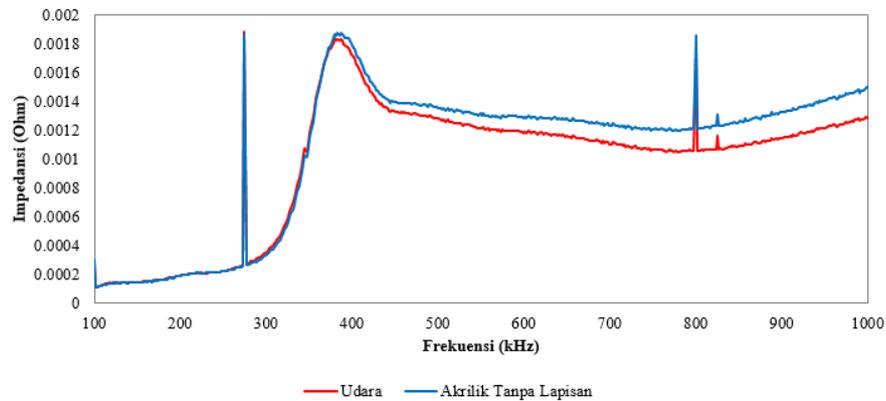
Berdasarkan data yang diperoleh diketahui bahwa kedua sensor tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji udara dan akrilik tanpa lapisan. Jika dibandingkan antara grafik impedansi dan kapasitansi kedua sensor kapasitif cenderung sama hal tersebut dipengaruhi oleh luas permukaan, jarak dan bahan dielektrik digunakan. Rata-rata impedansi akrilik tanpa lapisan lebih besar dibandingkan rata-rata impedansi udara, sedangkan kapasitansi udara lebih besar dibandingkan rata-rata impedansi akrilik tanpa lapisan. Pengaruh impedansi akrilik akrilik tanpa lapisan yang lebih tinggi dibandingkan udara pada sensor kapasitif bisa dijelaskan dengan sifat dasar material tersebut. Impedansi adalah ukuran resistansi total terhadap arus listrik yang melewati sebuah medium. Akrilik tanpa lapisan memiliki impedansi yang lebih tinggi dibandingkan udara karena sifat dielektriknya yang lebih besar. Dalam konteks sensor kapasitif, ini berarti bahwa akrilik akan menghambat aliran medan listrik lebih banyak daripada udara. Ketika

sebuah sensor kapasitif digunakan, perubahan dalam kapasitansi akan terjadi ketika benda atau medium berada dalam jarak yang berdekatan dengan sensor. Akrilik tanpa lapisan, dengan impedansinya yang tinggi, akan memiliki efek yang lebih besar pada kapasitansi sensor ketika berada dalam jarak yang sama dengan udara. Hal ini karena akrilik tanpa lapisan memungkinkan medan listrik untuk merambat dengan kecepatan yang lebih lambat, sehingga mempengaruhi kapasitansi sensor secara lebih signifikan. Pengaruh kapasitansi udara yang lebih tinggi dibandingkan akrilik tanpa lapisan pada sensor kapasitif dapat disebabkan oleh sifat akrilik tanpa lapisan yang lebih padat dan memiliki dielektrik yang lebih tinggi. Udara memiliki impedansi yang lebih rendah, yang berarti memungkinkan medan listrik untuk merambat dengan lebih cepat dan dengan efisiensi yang lebih tinggi daripada akrilik tanpa lapisan (Sun, dkk. 2018).

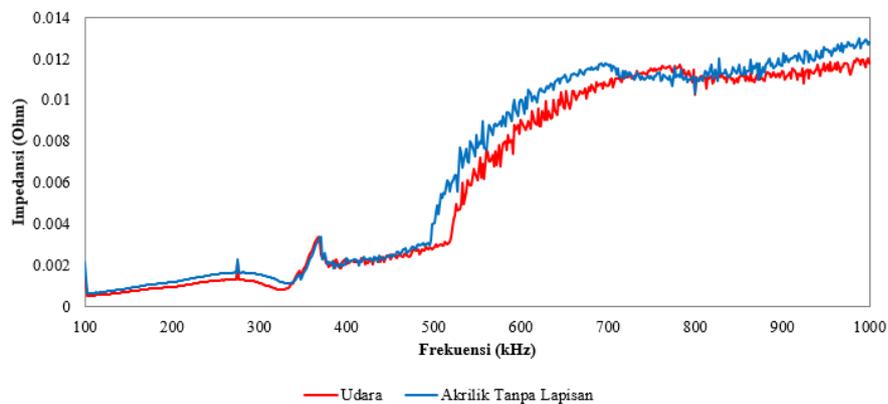
Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

Grafik hasil karakterisasi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11. Grafik tersebut menunjukkan adanya tren fluktuatif pada rentang frekuensi optimum 100 kHz – 400 kHz, dengan peningkatan atau mencapai posisi titik tertinggi impedansi (*peak*), diikuti oleh penurunan. Pada rentang frekuensi 400 kHz – 500 kHz, terdapat peningkatan, dan pada rentang frekuensi 500 kHz – 1

MHz, sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) cenderung stabil dengan tetap pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*). Sementara itu, sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) menunjukkan *trendline* peningkatan yang terus menerus pada rentang frekuensi optimum 100 kHz – 400 kHz, kemudian peningkatan lagi pada rentang frekuensi 400 kHz – 500 kHz. Peningkatan signifikan terjadi pada rentang frekuensi optimum 500 kHz – 700 kHz, mencapai posisi titik tertinggi impedansi (*peak*), dan tetap meningkat secara stabil pada rentang frekuensi 700 kHz – 1 MHz. Dengan kata lain, keduanya memiliki kecenderungan yang sama, namun stabil setelah melewati titik tertinggi (*peak*). Berdasarkan hasil karakterisasi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan menggunakan VNA dalam rentang frekuensi 100 kHz - 1 MHz, diperoleh hasil bahwa nilai impedansi akrilik tanpa lapisan lebih besar dibandingkan dengan impedansi udara.



Gambar 24 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak



Spiral (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

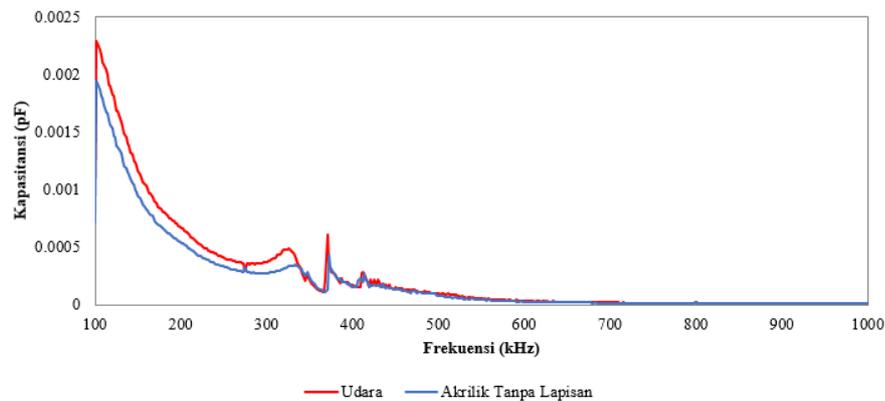
Gambar 25 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak
Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

Rata-rata impedansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) sebesar $9,70 \times 10^{-4} \Omega$, sedangkan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,05 \times 10^{-3} \Omega$. Sementara itu, sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) memiliki rata-rata impedansi udara sebesar $6,20 \times 10^{-3} \Omega$, dan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar $6,70 \times 10^{-3} \Omega$. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh nilai konstanta dielektrik dari benda uji yang diukur oleh sensor (Terzic, 2012). Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa kedua

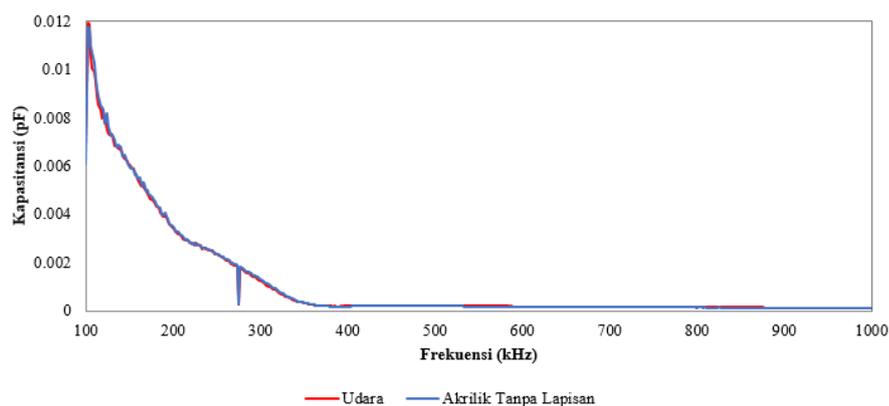
sensor dapat mengukur perubahan impedansi yang terjadi saat benda uji diganti dari udara ke akrilik tanpa lapisan.

Berdasarkan Gambar 24 dan Gambar 25 yang menunjukkan grafik karakterisasi kapasitansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) terhadap udara dan akrilik tanpa lapisan menggunakan VNA, diperoleh hasil bahwa nilai kapasitansi udara lebih besar dibandingkan dengan kapasitansi akrilik tanpa lapisan. Rata-rata kapasitansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) sebesar $1,12 \times 10^{-3}$ pF, sedangkan kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,13 \times 10^{-3}$ pF. Di sisi lain, rata-rata kapasitansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) sebesar $2,56 \times 10^{-4}$ pF, dan kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $2,12 \times 10^{-4}$ pF. Ketika dibandingkan, terlihat bahwa nilai impedansi dan kapasitansi yang diperoleh dari percobaan menghasilkan nilai yang berbanding terbalik (Kumar, 2015). Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh adanya perbedaan konstanta dielektrik antara udara dan akrilik tanpa lapisan, yang mempengaruhi sifat kapasitif kedua sensor. Hasil karakterisasi ini mengidentifikasi bahwa sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) mampu mengukur perubahan kapasitansi yang terjadi saat benda uji diganti dari udara ke akrilik tanpa lapisan. Kapasitansi pada kedua sensor akan mengalami peningkatan atau

penurunan, bergantung pada jenis material dielektrik yang digunakan, yang sesuai dengan prinsip dasar sifat dielektrik pada sensor kapasitif.



Gambar 26 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



Gambar 27 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa kedua sensor tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji udara dan akrilik tanpa lapisan. Jika dibandingkan antara grafik impedansi dan kapasitansi yang dipengaruhi oleh luas permukaan, jarak, dan bahan dielektrik yang digunakan. Pengaruh impedansi yang lebih tinggi dari akrilik tanpa lapisan daripada udara pada sensor kapasitif dapat

dijelaskan oleh karakteristik dasar dari kedua bahan tersebut. Akrilik tanpa lapisan memiliki impedansi yang lebih tinggi dibandingkan udara karena memiliki sifat dielektrik yang lebih dominan. Dalam konteks sensor kapasitif, ini berarti bahwa akrilik tanpa lapisan akan menghambat aliran medan listrik lebih banyak daripada udara. Ketika menggunakan sensor kapasitif, perubahan dalam kapasitansi terjadi ketika benda atau medium berada dalam jarak dekat dengan sensor. Akrilik tanpa lapisan, dengan impedansinya yang tinggi, akan memiliki dampak yang lebih besar terhadap kapasitansi sensor ketika berada dalam jarak yang sama dengan udara. Ini disebabkan oleh kemampuan akrilik tanpa lapisan untuk memperlambat merambatnya medan listrik, sehingga secara signifikan mempengaruhi kapasitansi sensor. Sementara itu, pengaruh kapasitansi udara yang lebih tinggi daripada akrilik tanpa lapisan pada sensor kapasitif dapat disebabkan oleh sifat padat dan nilai dielektrik yang lebih tinggi dari akrilik tanpa lapisan (Sun, dkk. 2018).

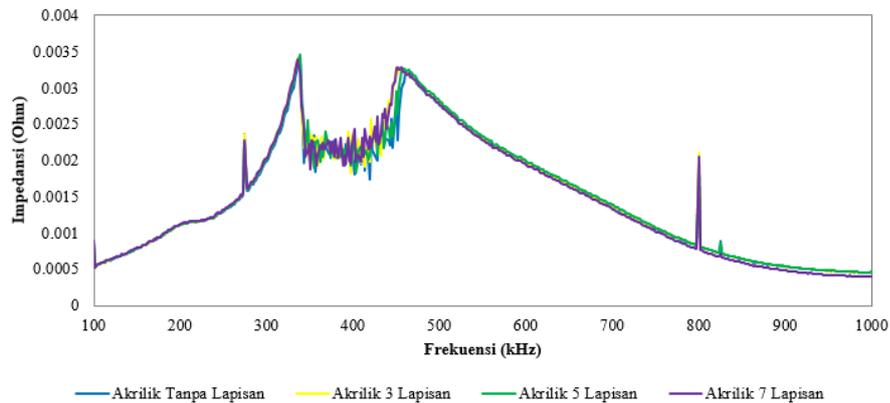
Uji Performa Sensor Kapasitif

Uji performa sensor dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor yang telah dibuat dan digunakan. Adapun benda uji yang digunakan yaitu berupa akrilik tanpa lapisan, 3 lapisan, 5 lapisan dan 7 lapisan. Alat yang digunakan uji performa sensor yaitu *libre Vector Network Analyzer (VNA)*. Hasil dari pengukuran berupa nilai impedansi dan kapasitansi yang nantinya nilai kapasitansi akan digunakan untuk mengetahui perubahan

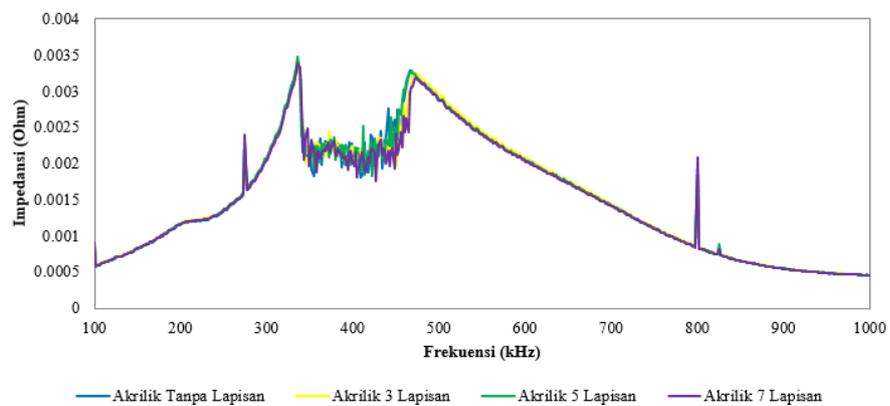
lapisan ketebalan dari benda uji. Uji performa sensor kapasitif model kotak dan model kotak spiral dilakukan menggunakan libre VNA dengan frekuensi dimulai dari 1 kHz – 1 MHz dengan menggunakan 500 data *point*.

Sensor Kapasitif Model Kotak

Grafik impedansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 28, grafik menunjukkan adanya *trendline* yang fluktuatif pada *range* frekuensi optimum 100 kHz – 334,468 kHz meningkat atau pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*). Berdasarkan grafik tersebut dapat diketahui bahwa posisi titik tertinggi impedansi (*peak*) disekitar *range* frekuensi tersebut yang optimum. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan rata-rata impedansi akrilik tanpa lapisan 3,18 x 10⁻⁴ Ω akrilik 3 lapisan 3,27 x 10⁻⁴ Ω, akrilik 5 lapisan 3,32 x 10⁻⁴ Ω, dan akrilik 7 lapisan 3,8 x 10⁻⁴ Ω yang diperoleh. Pada Gambar 29, grafik impedansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) terhadap ketebalan lapisan akrilik menunjukkan adanya *trendline* pada *range* frekuensi optimum 100 kHz – 482,364 kHz meningkat atau pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*). Dilakukan perhitungan rata-rata impedansi impedansi akrilik tanpa lapisan 1,76 x 10⁻³ Ω akrilik 3 lapisan 1,76 x 10⁻³ Ω, akrilik 5 lapisan 1,77 x 10⁻³ Ω, dan akrilik 7 lapisan 1,73 x 10⁻³ Ω yang diperoleh.

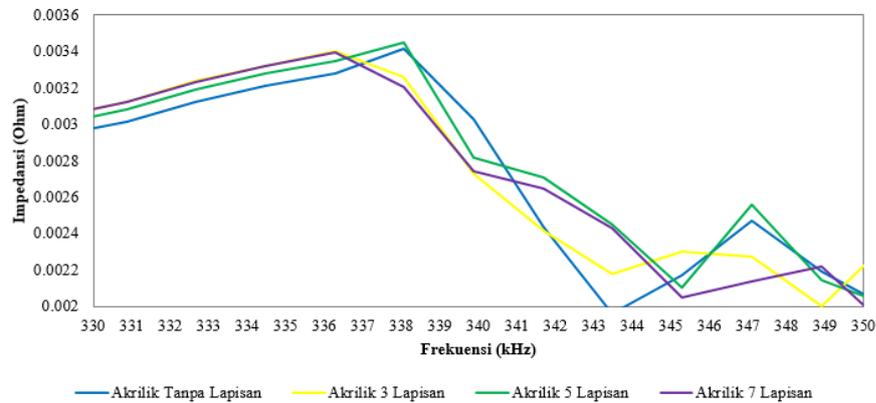


Gambar 28 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

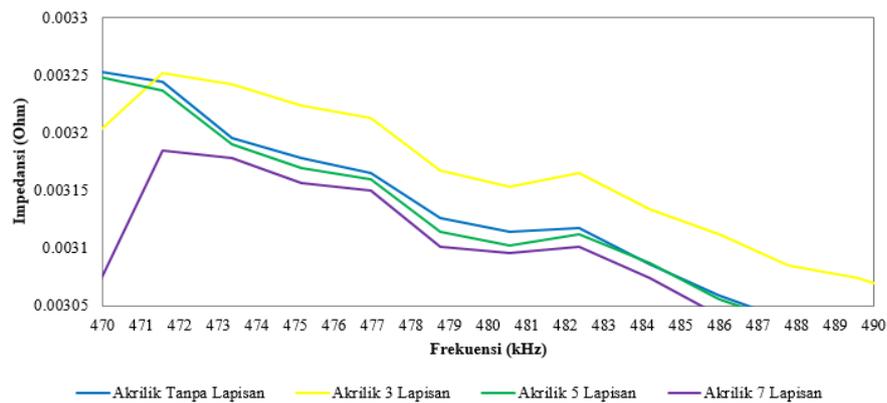


Gambar 29 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Sedangkan grafik normalisasi impedansi kedua sensor tersebut terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 30 dan Gambar 31, menunjukkan adanya perbedaan ketebalan lapisan pada tiap benda uji dan *trendline* stabil artinya kedua sensor mampu mendeteksi perubahan impedansi yang terjadi. Pentingnya *trendline* yang stabil dalam grafik menegaskan bahwa sensor mampu mempertahankan konsistensi dalam mendeteksi perubahan impedansi.



Gambar 30 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



Gambar 31 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Impedansi disebut juga resistansi atau hambatan yang dipengaruhi oleh adanya perbedaan tegangan dan fasa. Pada sensor kapasitif, kapasitansi terkait dengan kemampuan sensor untuk menyimpan muatan listrik. Kapasitansi sensor dipengaruhi oleh konstanta dielektrik atau permittivitas dielektrik di antara elektroda dan objek yang diukur. Perubahan ketebalan lapisan atau sifat dielektrik objek akan mempengaruhi kapasitansi sensor.

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 (Y. Zhang et al, 2022). 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 1 (Terzic, 2012).

$$d = \frac{\epsilon \times \epsilon^0 \times A}{C} \dots\dots\dots (1)$$

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)

Standar deviasi adalah ukuran seberapa tersebar data dari rata-ratanya. Dalam perhitungan perbandingan ketebalan lapisan, standar deviasi dapat digunakan untuk menganalisis seberapa akurat hasil pengukuran. Jika standar deviasinya rendah, maka hasil dapat dikatakan

akurat. Jika standar deviasinya tinggi, maka hasil pengukuran dapat dikatakan kurang akurat. Rumus untuk menghitung standar deviasi berdasarkan kapasitansi seperti Persamaan 2 (Simbolon, E., et al., 2021).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \dots\dots\dots (4.2)$$

Keterangan:

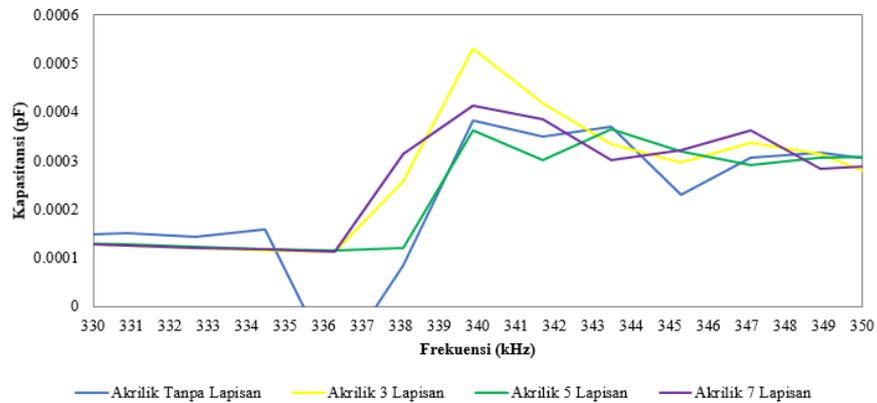
σ = Standar deviasi

x_i = Setiap nilai dari data

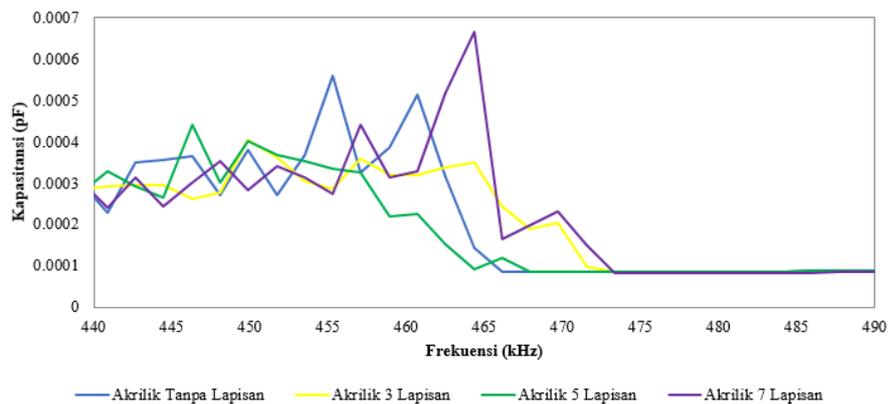
μ = Rata-rata data

N = Jumlah data

Pada grafik kapasitansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19, menunjukkan grafik kapasitansi yang didapatkan oleh kedua sensor kapasitif. Setelah didapatkan nilai rata-rata impedansi pada benda uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan. Dilakukan perhitungan kapasitansi sehingga didapatkan nilai rata-rata kapasitansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) pada akrilik tanpa lapisan $3,64 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 3 lapisan $3,57 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 5 lapisan $3,53 \times 10^{-3}$ pF, dan akrilik 7 lapisan $3,46 \times 10^{-3}$ pF. Pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) nilai rata-rata kapasitansi akrilik tanpa lapisan $5,11 \times 10^{-4}$ pF, akrilik 3 lapisan $5,07 \times 10^{-4}$ pF, akrilik 5 lapisan $5,00 \times 10^{-4}$ pF, dan akrilik 7 lapisan $3,46 \times 10^{-4}$ pF.



Gambar 32 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



Gambar 33 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 3, pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan 2,80 mm, akrilik 3 lapisan 2,85 mm, akrilik 5 lapisan 2,88, dan akrilik 7 lapisan 2,94 mm. Sedangkan, nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) terhadap akrilik tanpa lapisan

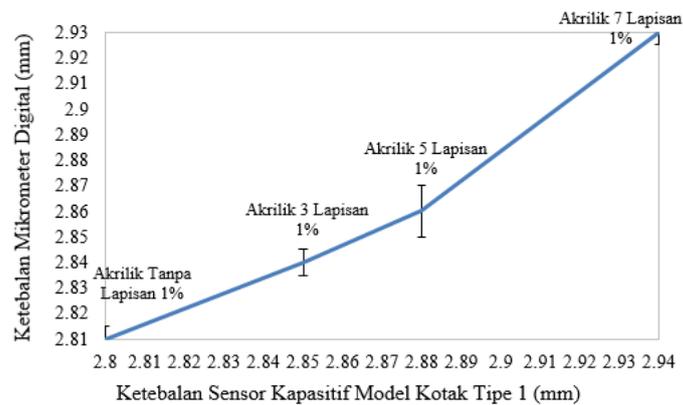
2,81 mm, akrilik 3 lapisan 2,83 mm, akrilik 5 lapisan 2,84, dan akrilik 7 lapisan 2,87 mm.

Tabel 3 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2)

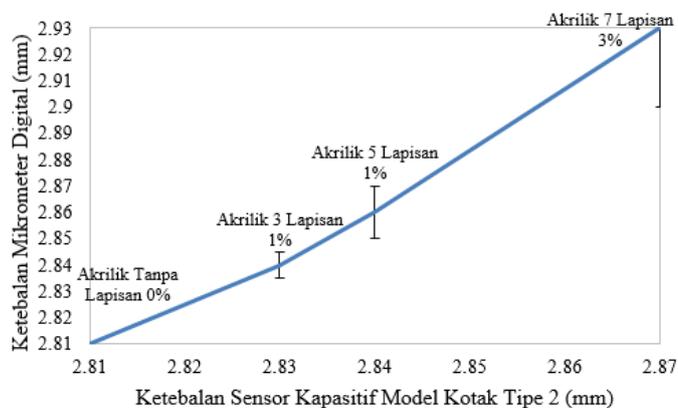
Jenis Sampel	T	T	T	ΔT Mikrometer Digital - Sensor Kotak (Tipe 1)		ΔT Mikrometer Digital - Sensor Kotak (Tipe 2)	
	Mikrometer Digital (mm)	Sensor Kotak (Tipe 1) (mm)	Sensor Kotak (Tipe 2) (mm)	Selisih Ketebalan (mm)	Standar Deviasi (%)	Selisih Ketebalan (mm)	Standar Deviasi (%)
Akrilik Tanpa Lapisan	2,81	2,80	2,81	0,01	1%	0	0%
Akrilik 3 Lapisan	2,84	2,85	2,83	0,01	1%	0,01	1%
Akrilik 5 Lapisan	2,86	2,88	2,84	0,02	1%	0,02	1%
Akrilik 7 Lapisan	2,93	2,94	2,87	0,01	1%	0,06	3%

Hasil perhitungan ketebalan lapisan dapat dilihat pada Tabel 3, dari sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) didapatkan hasil pada variasi sampel akrilik tanpa lapisan sebesar 2,80 mm dan 2,81 mm atau selisih 0,01 mm dengan standar deviasi 1%. Pada variasi sampel akrilik 3 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,84 mm dan 2,85 mm atau selisih 0,01 mm dengan standar deviasi 1%. Pada variasi sampel akrilik 5 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,86 mm dan 2,88 mm atau selisih 0,02 mm dengan standar deviasi 1%. Pada variasi sampel akrilik 7 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,93 mm dan 2,94 mm atau selisih 0,01 mm dengan standar deviasi 1%. Sedangkan, hasil perhitungan ketebalan dari sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) didapatkan hasil pada variasi sampel akrilik tanpa lapisan sebesar 2,81 mm dan 2,81 mm atau selisih 0 mm dengan standar deviasi 0%. Pada variasi sampel akrilik 3 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,84 mm dan 2,83 mm atau selisih 0,01 mm dengan standar deviasi 1%. Pada variasi sampel akrilik 5 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,86 mm dan 2,84 mm atau selisih 0,02 mm dengan standar

deviasi 1%. Pada variasi sampel akrilik 7 lapisan diperoleh hasil sebesar 2,93 mm atau 2,87 mm atau selisih 0,06 mm dengan standar deviasi 3%. Hasil grafik perbandingan mikrometer digital dengan sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21.



Gambar 34 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1)



Gambar 35 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2)

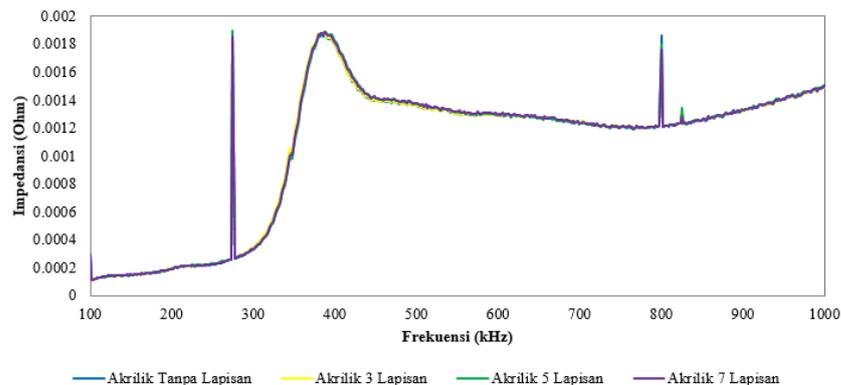
Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan. Kedua sensor dapat

mengukur ketebalan lapisan secara akurasi mendekati nilai sebenarnya dari mikrometer digital. Sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) memiliki sensitivitas yang baik dalam mengukur ketebalan lapisan. Perubahan ketebalan lapisan atau sifat dielektrik objek dapat mempengaruhi kapasitansi sensor. Berdasarkan nilai kapasitansi yang diperoleh, terdapat korelasi yang sesuai antara ketebalan lapisan dan kapasitansi, yakni hubungan yang terbalik. Artinya, semakin tebal lapisan, semakin kecil nilai kapasitansinya. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa semakin tebal lapisan, semakin banyak ruang yang tersedia untuk penyimpanan muatan listrik. Sebagai hasilnya, kapasitansi sensor akan menunjukkan penurunan seiring dengan peningkatan ketebalan lapisan pada objek yang diukur. Sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) lebih baik dalam mengukur ketebalan lapisan karena memiliki standar deviasi dengan *range* 1%, sedangkan sensor kapasitif model kotak (Tipe 2) memiliki standar deviasi dengan *range* 0-3%.

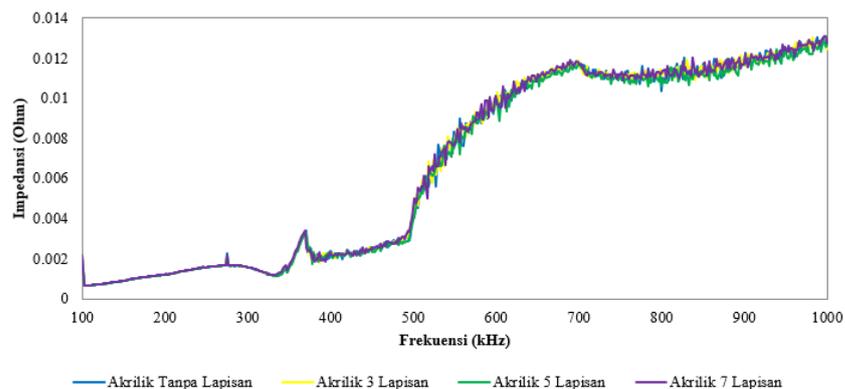
Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Grafik impedansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 36. Grafik tersebut menunjukkan adanya *trendline* yang fluktuatif pada rentang frekuensi optimum 100 kHz – 388,577 kHz, meningkat pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*). Berdasarkan grafik tersebut, dapat diketahui bahwa posisi titik tertinggi impedansi (*peak*) berada di sekitar rentang frekuensi

tersebut yang dianggap optimum. Oleh karena itu, perlu dilakukan perhitungan rata-rata impedansi, dengan hasil akrilik tanpa lapisan sebesar $4,72 \times 10^{-4} \Omega$, akrilik 3 lapisan sebesar $4,80 \times 10^{-4} \Omega$, akrilik 5 lapisan sebesar $4,69 \times 10^{-4} \Omega$, dan akrilik 7 lapisan sebesar $4,72 \times 10^{-4} \Omega$. Pada Gambar 4.23, grafik impedansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) terhadap ketebalan lapisan akrilik menunjukkan adanya *trendline* pada rentang frekuensi optimum 100 kHz – 687,975 kHz, meningkat pada posisi titik tertinggi impedansi (*peak*). Dilakukan perhitungan rata-rata impedansi dengan hasil akrilik tanpa lapisan sebesar $4,08 \times 10^{-3} \Omega$, akrilik 3 lapisan sebesar $4,11 \times 10^{-3} \Omega$, akrilik 5 lapisan sebesar $4,03 \times 10^{-3} \Omega$, dan akrilik 7 lapisan sebesar $4,12 \times 10^{-3} \Omega$.

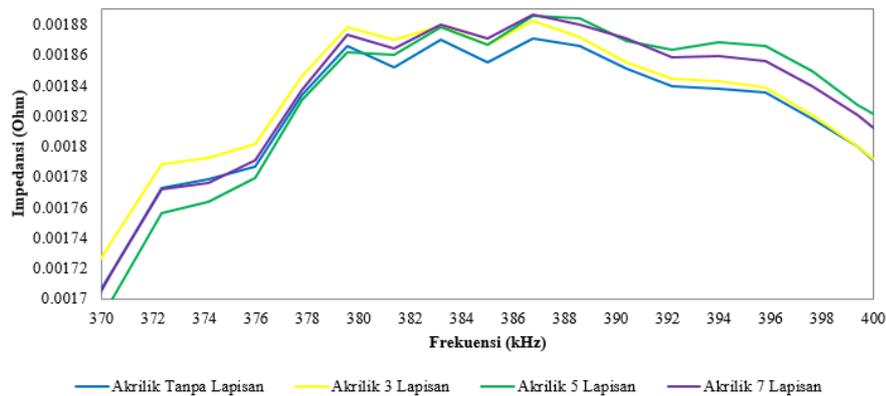


Gambar 37 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

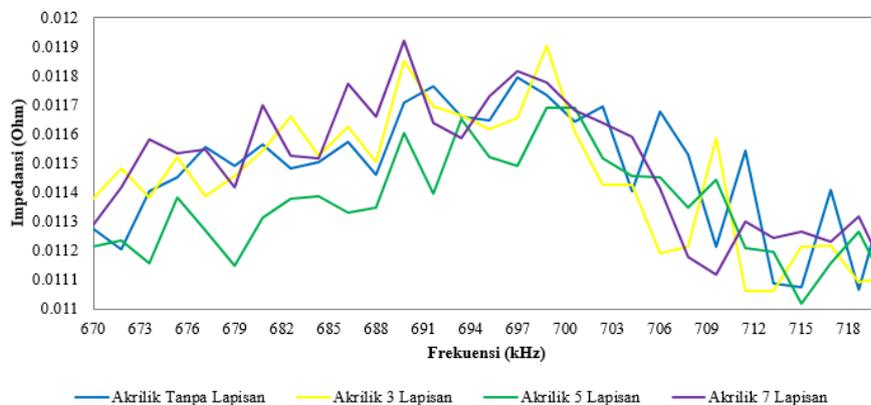


Gambar 38 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Grafik normalisasi impedansi kedua sensor terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 39 dan Gambar 40, menunjukkan adanya perbedaan ketebalan lapisan pada tiap benda uji dan *trendline* yang stabil. Artinya, kedua sensor mampu mendeteksi perubahan impedansi yang terjadi seiring dengan variasi ketebalan lapisan pada benda uji.



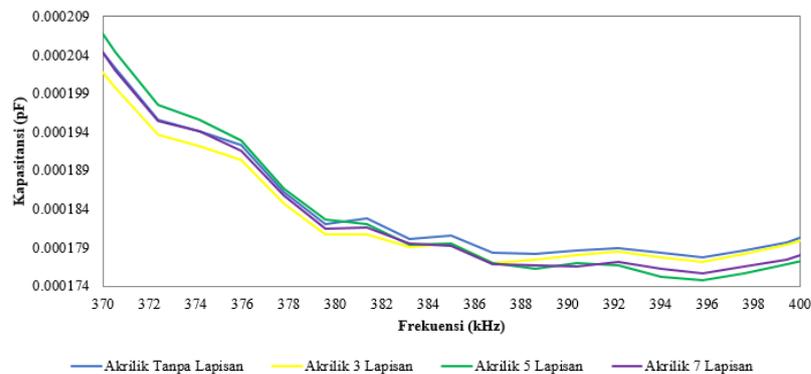
Gambar 39 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7



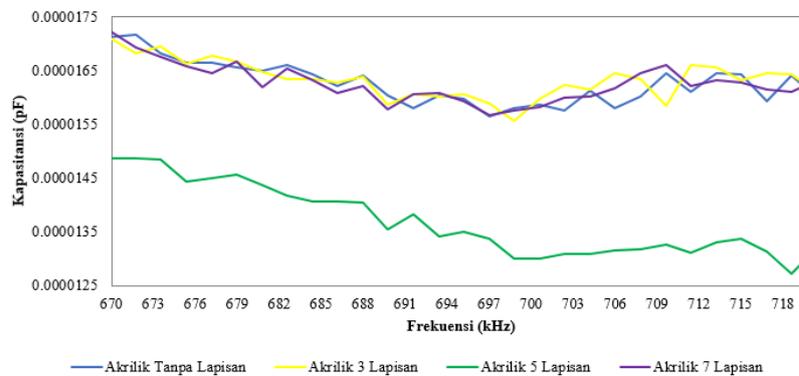
Lapisan

Gambar 40 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Pada grafik kapasitansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2) terhadap ketebalan lapisan akrilik, dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27. Grafik tersebut menunjukkan kapasitansi yang dihasilkan oleh kedua sensor kapasitif. Setelah memperoleh nilai rata-rata impedansi untuk benda uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan, dilakukan perhitungan kapasitansi. Hasilnya, nilai rata-rata kapasitansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) pada akrilik tanpa lapisan sebesar $3,18 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 3 lapisan sebesar $3,16 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 5 lapisan sebesar $3,14 \times 10^{-3}$ pF, dan akrilik 7 lapisan sebesar $3,13 \times 10^{-3}$ pF. Pada sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) nilai rata-rata kapasitansi untuk akrilik tanpa lapisan adalah $3,18 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 3 lapisan sebesar $3,16 \times 10^{-3}$ pF, akrilik 5 lapisan sebesar $3,15 \times 10^{-3}$ pF, dan akrilik 7 lapisan sebesar $3,13 \times 10^{-3}$ pF.



Gambar 41 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



Gambar 42 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

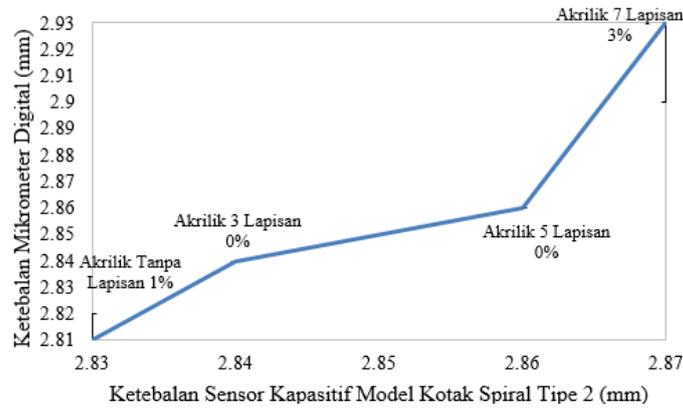
Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 4, pada sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan adalah 2,82 mm, akrilik 3 lapisan 2,84 mm, akrilik 5 lapisan 2,86 mm, dan akrilik 7 lapisan 2,87 mm. Sedangkan, nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi pada sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) terhadap akrilik tanpa lapisan adalah 2,83 mm, akrilik 3 lapisan 2,84 mm, akrilik 5 lapisan 2,86 mm, dan akrilik 7 lapisan 2,87 mm.

Tabel 4.2 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2)

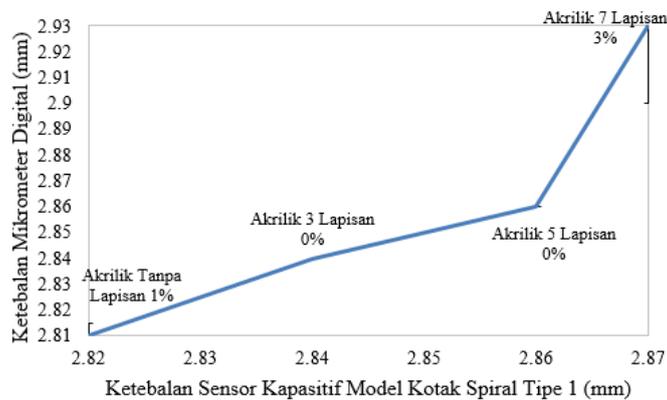
Jenis Sampel	T	T	T	ΔT Mikrometer Digital - Sensor Kotak Spiral (Tipe 1)		ΔT Mikrometer Digital - Sensor Kotak Spiral (Tipe 2)	
	Mikrometer Digital (mm)	Sensor Kotak Spiral (Tipe 1) (mm)	Sensor Kotak Spiral (Tipe 2) (mm)	Selisih Ketebalan (mm)	Standar Deviasi (%)	Selisih Ketebalan (mm)	Standar Deviasi (%)
Akrilik Tanpa Lapisan	2,81	2,82	2,83	0,01	1%	0,02	1%
Akrilik 3 Lapisan	2,84	2,84	2,84	0	0%	0	0%
Akrilik 5 Lapisan	2,86	2,86	2,86	0	0%	0	0%
Akrilik 7 Lapisan	2,93	2,87	2,87	0,06	3%	0,06	3%

Hasil perhitungan ketebalan dapat dilihat pada Tabel 4, dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) menghasilkan variasi pada sampel akrilik tanpa lapisan sebesar 2,81 mm dan 2,82 mm, dengan selisih 0,01 mm dan standar deviasi sebesar 1%. Pada variasi sampel akrilik 3 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,84 mm dan 2,84 mm, dengan selisih 0 mm dan standar deviasi sebesar 0%. Pada variasi sampel akrilik 5 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,86 mm dan 2,86 mm, dengan selisih 0 mm dan standar deviasi sebesar 0%. Pada variasi sampel akrilik 7 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,93 mm dan 2,87 mm, dengan selisih 0,06 mm dan standar deviasi sebesar 3%. Sementara itu, hasil perhitungan ketebalan dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) menunjukkan variasi pada sampel akrilik tanpa lapisan sebesar 2,81 mm dan 2,83 mm, dengan selisih 0,02 mm dan standar deviasi sebesar 1%. Pada variasi sampel akrilik 3 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,84 mm dan 2,84 mm, dengan selisih 0 mm dan standar deviasi sebesar 1%. Pada variasi sampel akrilik 5 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,86 mm dan 2,86 mm, dengan selisih 0 mm dan standar deviasi sebesar 0%. Pada variasi sampel akrilik 7 lapisan, diperoleh hasil sebesar 2,93 mm dan 2,87 mm, dengan selisih 0,06 mm dan standar deviasi sebesar 3%. Hasil grafik perbandingan mikrometer digital dengan sensor kapasitif model kotak spiral

(Tipe 1) dan sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) dapat dilihat pada Gambar 43 dan Gambar 44



Gambar 43 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1)



Gambar 44 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2)

Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa kedua sensor tersebut mampu mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji, baik itu akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, maupun akrilik 7 lapisan. Kedua sensor dapat mengukur ketebalan lapisan dengan akurasi mendekati nilai sebenarnya menggunakan

mikrometer digital. Perubahan dalam ketebalan lapisan atau sifat dielektrik objek dapat memengaruhi kapasitansi sensor. Dari nilai kapasitansi yang diperoleh, terdapat korelasi yang sesuai antara ketebalan lapisan dan kapasitansi, yaitu hubungan yang terbalik. Artinya, semakin tebal lapisan, semakin kecil nilai kapasitansinya. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh fakta bahwa semakin tebal lapisan, semakin banyak ruang yang tersedia untuk penyimpanan muatan listrik. Sebagai hasilnya, kapasitansi sensor akan menunjukkan penurunan seiring dengan peningkatan ketebalan lapisan pada objek yang diukur. Kedua sensor tersebut memiliki sensitivitas yang baik dalam mengukur ketebalan lapisan. Sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2) memiliki nilai standar deviasi dengan *range* 0-3% artinya keakuratannya sama dalam mengukur ketebalan lapisan akrilik.

Secara keseluruhan hasil sensor kapasitif dengan model kotak (Tipe 1) memiliki kemampuan yang paling optimum dalam mengukur ketebalan lapisan akrilik dibandingkan dengan sensor kapasitif dengan model kotak (Tipe 1), sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2), karena memiliki nilai standar deviasi dengan *range* 1%. Jika standar deviasinya rendah, maka hasil dapat dikatakan akurat dalam mengukur ketebalan lapisan akrilik serta lebih mendekati nilai sebenarnya dari mikrometer digital.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu sebagai berikut.

1. Sensor kapasitif model kotak dan kotak spiral untuk mengukur ketebalan lapisan dengan ukuran 6 cm x 6 cm dan 2 elektroda berhasil difabrikasi.
2. Sensor kapasitif mampu mengukur besaran impedansi dan kapasitasi
3. berdasarkan hasil karakterisasi serta uji performa terhadap ketebalan akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan pada *range* frekuensi mulai dari 100 kHz – 1 MHz.
4. Sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) memiliki hasil pengukuran ketebalan pada akrilik tanpa lapisan, akrilik 3, 5, dan 7 lapisan yang paling optimum dibandingkan dengan sensor kapasitif model lainnya karena memiliki nilai standar deviasi yang paling rendah sehingga hasil ketebalannya paling mendekati nilai sebenarnya dari pengukuran mikrometer digital.

Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, tentunya terdapat evaluasi untuk mengembangkan penelitian ini lebih lanjut. Berikut ini adalah saran yang dapat dilakukan kedepannya yaitu:

1. Membuat desain dan fabrikasi sensor dengan ukuran dan material seperti PCB yang digunakan sama untuk sensor pembanding.
2. Menggunakan material yang dielektriknya diketahui secara riil seperti kayu atau logam sebagai sampel uji ketebalan lapisan sehingga diketahui perbedaanya.

DAFTAR PUSTAKA

Bakhsi, U. A. & Bakhsi, A. O. "*Electromagnetic Field Theory*". India: Technical Publications Pune, 2008.

Bakhtiyar, Arasada. Aplikasi Sensor Ultrasonik Untuk Deteksi Posisi Jarak Pada Ruang Menggunakan Arduino Uno. Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, 2017.

Baxter, L. K. "*Capacitive Sensors: Design and Applications*". New York: The Institute Electrical and Electronics Engineers, 1996.

Bernieri, A. et al. '*Ultrasonic NDT on aluminum bars: An experimental performance comparison of excitation and processing techniques*', Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 128, pp. 393–402. doi:10.1016/j.measurement.2017.10.040, 2018.

Chen, T., & Bowler, N. *Design of interdigital spiral and concentric capacitive sensors for materials evaluation*. doi:10.1063/1.4789232, 2013.

COMSOL *Multiphysics Reference Manual*, 2019.

COMSOL Multiphysics. '*AC / DC Module User 's Guide*', © 1998–2019 Comsol, p. 300, 2019.

COMSOL Multiphysics. '*Comsol Multiphysics Reference Manual: Version 5.6*', Manual. Available at: www.comsol.com/blogs, 2014.

Debora, F. '*Pengukuran Ketebalan serta Posisi Cacat pada Sampel*', Jurnal Fisika Unsri. 1-10, 2013.

Grainger, S. & Blunt, J. *Engineering coatings - design and application*. Cambridge, England. 1989.

Hijazi, A. '*Ultrasonic Testing*', *Applied Welding Engineering*, pp. 293–304. 2012.

Hu, X., & Yang, W. *Planar capacitive sensors—designs and applications. Sensor Review*, 30(1), 24-39, 2010.

I. Lestari, M. Wahyu, R. M. Asmoro, "Measurement of Paint Thickness Using Ultrasonic Sensor," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1371, no. 1, pp. 1-6, 2019.

Jamil, Muhammad. *Internal Cracks and Non-Metallic Inclusions as Root Causes of Casting Failure in Sugar Mill Roller Shafts*. Material. doi:10.3390/ma12152474, 2019.

Jokosisworo, S. et al. 'Proses Pengujian Tidak Merusak', *Kapal*, 4(1), pp. 26– 30. doi: 10.12777/kpl.4.1.26-30, 2012.

Kristianto, D., & Putera, W. H. A. (2013). Studi Penentuan Panjang dan Kedalaman Retak Sambungan Las pada Konstruksi Kapal Menggunakan Pengujian Ultrasonik dengan Variasi Frekuensi dan Ukuran Kristal dan Variasi Kondisi Permukaan Coating dan Uncoating. *Jurnal Teknik ITS*, 2(1), G116-G120, 2013.

Kumar, Deepak. A 1 V Supercapacitor Device with Nanostructured Graphene Oxide/Polyniline Composite Materials. *Indian Academy of Science*. 2015.

M. R. Gaitonde & R. M. Patrikar. "Inductive sensor for non-destructive measurement of thickness of thin conductive films," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 123-124, pp. 71-77, 2005. Malang.

Mansor, Muhammad Asraf., Takeuchi, Masaru., Nakajima, Masahiro. Electrical Impedance Spectroscopy Using for Detection of Cells in Suspensions Using Microfluidic Device with Integrated Microneedles. *applied science*. 2017.

Maulandari, E.Z., Analisis Hasil Pengukuran Impedansi Listrik Dengan Menggunakan Metode Injeksi Arus Tipe Floating Dan Howland. Skripsi UB, 2018.

Mujib, S. 'Perancang Sensor Kelembapan Beras Berbasis Kapasitor.', *Jurnal Sains dan Senipom ITS*, 1(1), pp. 1–6, 2013.
Parental, E. T. et al. 'Key Concepts Key Concepts', pp. 1–41, 2008.

Patel, K., Negi, P.S. & Kothari, P.C. 'Complex S-parameter measurement and its uncertainty evaluation on a vector network analyzer', *Measurement*, 42(1), pp. 145–149. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.04.010>, 2009.

R. Zeng, S. Zhang, H. Chen, and J. Hu. "A capacitive sensor for thickness measurement of thin film coatings," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1397, no. 6, p. 062062, 2019.

Ripka, P., Blažek, J., Mirzaei, M., Lipovský, P., Šmelko, M., & Draganová, K. *Inductive Position and Speed Sensors. Sensors*, 20(1), 65. doi:10.3390/s20010065, 2019.

Sari, Dessy Ana Laila. *Pengukuran Ketebalan Plat Single Dan Multilayer Menggunakan Ultrasonik Dengan Metode Time Of Flight Diffraction (Tofd) Dan Pulse Echo Berbasis Labview*. Sarjana thesis, Universitas Brawijaya, 2017.

Setiawan, R., Rivai, M., & Suwito, S. Implementasi Analog Front End Pada Sensor Kapasitif Untuk Pengaturan Kelembaban Menggunakan Mikrokontroler STM32. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), A81-A87, 2017.

Setyowati, A. D., Darmawan, D., & Suhendi, A. Penentuan Parameter Sensor Pelat Sebidang Secara Eksperimental Untuk Mengukur Kapasitansi Bahan Kayu Dan Logam. *eProceedings of Engineering*, 6(2). 2019.

Simbolon, E., Darmawan, D., & Salam, R. A. Eksperimen Metode Ultrasonik Untuk Mengukur Ketebalan Setiap Lapisan Tanah Yang Berbentuk Granular. *eProceedings of Engineering*, 8(5). 2021.

Su, T. et al. 'Wideband optical vector network analyzer based on polarization modulation', *Optics Communications*, 437, pp. 67–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.12.046>, 2019.

Sun, Yun; Wang, Ying; Wang, Zijun; Li, Chao; Meng, Xiangfei; Qi, Yao. *[IEEE 2018 19th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT)*. 2018.

Terzic, E. et al. 'A neural network approach to fluid quantity measurement in dynamic environments', *A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*, 9781447140, pp. 1–138. 2012.

W. Yao, L. Guo, X. Zhang, and S. Zhang. "A high-precision capacitive sensor for measuring the thickness of coating," *Measurement*, vol. 146, pp. 317-324, 2019.

Y. Zhang, L. Wang, dan Y. Wang. "The Effect of Dielectric Thickness on the Capacitance of a Planar Capacitor". *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004.

Yuditama, Andi. *Pembuatan Sistem Sensor Kapasitif Untuk Optimasi Lapisan Ketebalan Coating*. FT UNTIRTA Cilegon. 2022.

(<https://www.comsol.com/multiphysics/electrostatics-theory?parent=electromagnetics-072-162>., diakses 26 Desember 2023).