

**DESAIN SENSOR KAPASITIF MODEL KOTAK UNTUK
MENGUKUR KETEBALAN LAPISAN CAT
PADA SUBSTRAT**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari
Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Oleh:

YUSUF ILHAM PANCA KUSUMA
3334190031

**JURUSAN TEKNIK METALURGI FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON - BANTEN**

2024

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN SENSOR KAPASITIF MODEL KOTAK UNTUK
MENGUKUR KETEBALAN LAPISAN CAT
PADA SUBSTRAT**

SKRIPSI

Dibuat untuk memenuhi syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Jurusan
Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disetujui untuk Jurusan Teknik Metalurgi oleh:

Pembimbing I



Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si
NIP. 197905022005012005

Pembimbing II



Imamul Muttakin, ST., M.Eng., Ph.D
NIP. 198705262014041001

LEMBAR PERSETUJUAN

**DESAIN SENSOR KAPASITIF MODEL KOTAK UNTUK
MENGUKUR KETEBALAN LAPISAN CAT
PADA SUBSTRAT**

SKRIPSI

Disusun dan diajukan oleh:

Yusuf Ilham Panca Kusuma

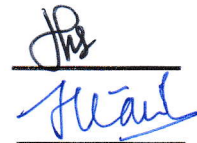
3334190031

Telah disidangkan di depan dewan penguji pada tanggal 5 Februari 2024

Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

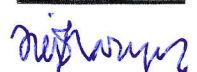
Penguji I : **Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si**



Penguji II : **Imamul Muttakin, ST., M.Eng., Ph.D**



Penguji III : **Dr. Didied Haryono, S.T., M.T.**



Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Metalurgi



Abdul Aziz, S.T., M.T., Ph.D
NIP. 198003072005011002

LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya sebagai penulis skripsi berikut:

Judul : Desain Sensor Kapasitif Model Kotak Untuk Mengukur
Ketebalan Lapisan Cat Pada Substrat

Nama Mahasiswa : Yusuf Ilham Panca Kusuma

NIM : 3334190031

Fakultas : Teknik

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi tersebut di atas adalah benar-benar hasil karya asli saya dan tidak memuat hasil karya orang lain, kecuali dinyatakan melalui rujukan yang benar dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila di kemudian hari ditemukan hal-hal yang menunjukkan bahwa sebagian atau seluruh karya ini bukan karya saya, maka saya bersedia dituntut melalui hukum yang berlaku. Saya juga bersedia menanggung segala akibat hukum yang timbul dari pernyataan yang secara sadar dan sengaja saya nyatakan melalui lembar ini.

Cilegon, 5 Februari 2024



YUSUF ILHAM PANCA KUSUMA
NIM. 3334190031

ABSTRAK

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

ABSTRACT

Materials have certain properties which, if used continuously, will experience a decrease in performance due to operating conditions, causing the material to degrade. Prevention needs to be done to avoid losses, namely by the coating method. Coating is a covering layer on the surface of a material to protect the material from direct contact with the environment. The most important part of coating is the thickness of the layer applied to the material. Therefore, there is a need for an inspection stage to determine the thickness of the layer produced after the coating process, one of which is using a capacitive sensor. Measurements with capacitive sensors are carried out by obtaining capacitance values using a Vector Network Analyzer (VNA). By measuring the capacitance value of the material, the capacitive sensor can determine the layer thickness. The aim of this research is to determine the layer thickness based on changes in capacitance values and compare it with measurements using a digital micrometer. Layer thickness measurements using box model capacitive sensors and spiral box models are carried out at a frequency of 100 kHz – 1 MHz. This data will be processed to obtain impedance values and capacitance values to obtain thickness values for uncoated acrylic, 3, 5 and 7 layer acrylic. The box model capacitive sensor (Type 1) has the most optimum thickness measurement results for uncoated acrylic, 3, 5 and 7 layer acrylic compared to other models of capacitive sensors because it has the lowest standard deviation value so that the thickness results are closest to the actual value. digital micrometer measurements. Box model capacitive sensors (Type 1) get capacitance values for uncoated acrylic, 3, 5 and 7 layer acrylic which are 3.64×10^{-3} pF, 3.57×10^{-3} pF, 3.53×10^{-3} pF, and 3.46×10^{-3} pF. In the box model capacitive sensor (Type 1), the thickness of acrylic without layers, 3, 5 and 7 layers of acrylic is 2.80 mm, 2.85 mm, 2.88 mm and 2.94 mm. The measurement results obtained using a digital micrometer for uncoated acrylic, 3, 5 and 7 layer acrylic were 2.81 mm, 2.84 mm, 2.86 mm and 2.93 mm. The comparison of layer thickness obtained from a digital micrometer with a box model capacitive sensor for 3, 5 and 7 layer acrylic is 0.01 mm with a standard deviation of 1%, 0.01 mm with a standard deviation of 1%, 0.02 mm with standard deviation of 1%, and 0.01 mm with a standard deviation of 1%. In this research, the performance of the capacitive sensor was tested using a Vector Network Analyzer (VNA) to measure the layer thickness of the material. Tests were carried out with various variations in layer thickness. The VNA test results prove that the capacitive sensor created is capable of distinguishing and detecting changes in capacitance values, thereby producing layer thickness values that are accurate and close to the actual values from digital micrometer measurements.

Keywords: Material Degradation, Layer Thickness, Capacitance, Capacitive Sensor

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas segala rahmat yang karunia-Nya, Penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi yang berjudul “Desain Sensor Kapasitif Model Kotak Untuk Mengukur Ketebalan Lapisan Cat Pada Substrat”. Penulisan laporan skripsi ini bertujuan untuk memenuhi syarat dalam mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Penulis menyadari bahwa melibatkan berbagai pihak yang memberi bimbingan dan dukungan dapat menyelesaikan laporan skripsi ini. Oleh karena itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Abdul Aziz, S.T.,M.T.,Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Metalurgi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
2. Bapak Rahman Faiz Suwandana S.T., M.S. selaku Koordinator Skripsi Jurusan Teknik Metalurgi FT Untirta.
3. Ibu Dr. Amalia Sholehah, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I, Dosen Penguji I yang telah memberikan segala saran dan kritik Penulis selama proses penelitian hingga sidang laporan skripsi.
4. Bapak Imamul Muttakin, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing II dan Dosen Penguji II yang telah membimbing Penulis dalam penyusunan laporan skripsi hingga sidang skripsi.

5. Bapak Dr. Didied Haryono, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik dan Kepala Laboratorium Material Maju dan Tomografi yang telah membimbing dan mengarahkan Penulis mulai dari menjadi mahasiswa baru hingga sekarang.
6. Bapak Pariyo dan Ibu Boniyem selaku Orang tua dan keluarga Penulis adik dan kakak yang selalu mencurahkan doa, semangat, serta dukungan kepada penulis selama waktu perkuliahan hingga hari ini.
7. Seluruh pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu per-satu, yang telah membantu Penulis selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Dwi Apriyani, S.Ap. yang selalu mengingatkan saya untuk selalu semangat dan tidak pernah menyerah untuk menyelesaikan perkuliahan.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat membangun untuk perkembangan penelitian yang lebih baik. Semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan ilmu pengetahuan.

Cilegon, 5 Februari 2024

YUSUF ILHAM PANCA KUSUMA
NIM. 3334190031

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Sistematika Penulisan	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengujian Tidak Merusak.....	8
2.2 Sensor Untuk Mengukur Ketebalan Lapisan.....	10
2.2.1 Sensor Ultrasonik	10
2.2.2 Sensor Induktansi	13

2.3	Sensor Kapasitif	15
2.4	Konduktor	20
2.5	Konstanta Dielektrika	21
2.6	Perhitungan Nilai Impedansi dan Kapasitansi	23
2.7	<i>Comsol Multiphysics</i>	24
2.8	<i>Vector Network Analyzer (VNA)</i>	28

BAB III METODE PENELITIAN

3.1	Diagram Alir.....	31
3.2	Alat dan Bahan	32
3.2.1	Alat yang digunakan	32
3.2.2	Bahan yang digunakan.....	33
3.3	Prosedur Penelitian	34
3.3.1	Desain Model	34
3.3.2	Parameter <i>Domain</i>	36
3.3.3	Parameter <i>Boundary</i>	38
3.3.4	Parameter <i>Meshing</i>	39
3.3.5	Parameter <i>Study</i>	41
3.3.6	Pembuatan Sampel dengan Ketebalan Akrik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 5 Lapisan dan Akrilik 7 Lapisan	42
3.3.7	Pembuatan Sensor	44
3.3.7.1	Pembuatan Sensor Kapasitif.....	44
3.3.8	Karakterisasi Sensor Kapasitif	48
3.3.9	Uji Performa Sensor Kapasitif.....	49

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Simulasi Desain Sensor Kapasitif dengan Menggunakan COMSOL <i>Multiphysics</i> 4.4.....	52
4.2 Karakterisasi Sensor Kapasitif	54
4.2.1 Sensor Kapasitif Model Kotak terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	55
4.2.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	60
4.3 Uji Performa Sensor Kapasitif	65
4.3.1 Sensor Kapasitif Model Kotak	65
4.3.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	73

BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	82

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

LAMPIRAN A. Contoh Perhitungan	87
LAMPIRAN B. Data Penelitian	90
LAMPIRAN C. Gambar Alat & Bahan	104

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
Tabel 2.1 Konstanta Dielektrik Material.....	22
Tabel 3.1 Ukuran Geometri Sensor Kotak.....	34
Tabel 3.2 Ukuran Geometri Sensor Kotak Spiral	35
Tabel 3.3 Spesifikasi Sampel Uji Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 7 Lapisan, dan Akrilik 7 Lapisan	43
Tabel 3.4 Spesifikasi (a) <i>Screen</i> Sablon dan Raket (b) Tinta Sablon	43
Tabel 3.5 Spesifikasi (a) <i>Pylox</i> Hitam (b) <i>Print Circuit Board</i> (PCB)	44
Tabel 4.1 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak	71
Tabel 4.2 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
Gambar 2.1 Skema <i>Ultrasonic Testing</i>	9
Gambar 2.2 Sensor Ultrasonik	11
Gambar 2.3 Sensor Induktansi	14
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.....	16
Gambar 2.5 Medan Objek dengan Permittivitas Lebih Tinggi dari Sekitar Objek (a) Besar Medan Listrik, (b) Besar Medan Perpindahan Listrik	27
Gambar 2.6 Medan Objek dengan Permittivitas Lebih Rendah dari Sekitar Objek (a) Besar Medan Listrik, (b) Besar Medan Perpindahan Listrik	27
Gambar 2.7 Pengoperasian VNA Menggunakan Kabel Koaksial	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	32
Gambar 3.2 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak	34
Gambar 3.3 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	35
Gambar 3.4 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak	35
Gambar 3.5 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	36
Gambar 3.6 Pengaturan <i>Domain</i> pada Material Sensor Kapasitif Model Kotak ...	37
Gambar 3.7 Pengaturan <i>Domain</i> pada Material Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	37
Gambar 3.8 <i>Setting Boundary Selection</i> pada <i>Ground</i> Sensor Kapasitif Model Kotak	38
Gambar 3.9 <i>Setting Boundary Selection</i> pada <i>Ground</i> Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	39
Gambar 3.10 (a) <i>Meshing Layer</i> pada Sensor (b) <i>Meshing</i> Keseluruhan Sensor Kapasitif Model Kotak	40

Gambar 3.11 (a) <i>Meshing Layer</i> pada Sensor (b) <i>Meshing</i> Keseluruhan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	40
Gambar 3.12 <i>Study Modul Stationary</i> dan <i>Global Evaluation</i> pada Menu <i>Results</i> Sensor Kapasitif Model Kotak	41
Gambar 3.13 <i>Study Modul Stationary</i> dan <i>Global Evaluation</i> pada Menu <i>Results</i> Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral	42
Gambar 3.14 (a) Mikrometer Digital (b) Sampel Uji Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 7 Lapisan, dan Akrilik 7 Lapisan	43
Gambar 3.15 (a) <i>Screen</i> Sablon dan Rakel (b) Tinta Sablon	43
Gambar 3.16 (a) <i>Pylox</i> Hitam (b) PCB	44
Gambar 3.17 (a) Proses Laser <i>Cutting</i> (b) Laser <i>Cutting</i>	45
Gambar 3.18 (a) Proses <i>etching</i> (b) Larutan HCl dan H ₂ O ₂	45
Gambar 3.19 Uji Konduktivitas listrik Sensor Kapasitif Model Kotak dan Model Kotak Spiral	46
Gambar 3.20 Proses Fabrikasi Sensor Kapasitif Model Kotak dan Spiral	46
Gambar 3.21 Sensor Kapasitif Model Kotak (a) Kotak dan (b) Spiral	47
Gambar 3.22 Kabel Konektor	47
Gambar 3.23 Skema Karakterisasi Sensor Kapasitif Model Kotak dan Spiral.....	48
Gambar 3.24 Skema Uji Performa Sensor Kapasitif Model Kotak	50
Gambar 3.25 Skema Uji Performa Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral.....	50
Gambar 4.1 Sensor Kapasitif Model (a) Kotak dan (b) Kotak Spiral	51
Gambar 4.2 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak	52
Gambar 4.3 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral.....	52
Gambar 4.4 Sensor Kapasitif Model Kotak (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2.....	54
Gambar 4.5 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2	55
Gambar 4.6 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	56

Gambar 4.7 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	56
Gambar 4.8 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	58
Gambar 4.9 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan	58
Gambar 4.10 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan.....	61
Gambar 4.11 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan.....	61
Gambar 4.12 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan.....	63
Gambar 4.13 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan.....	63
Gambar 4.14 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan....	66
Gambar 4.15 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan....	66
Gambar 4.16 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	67

Gambar 4.17 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	67
Gambar 4.18 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	70
Gambar 4.19 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	70
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1).....	72
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2).....	72
Gambar 4.22 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	74
Gambar 4.23 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan	74
Gambar 4.24 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan.....	75

Gambar 2.25 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan.....	75
Gambar 2.26 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan.....	76
Gambar 2.27 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan.....	76
Gambar 2.28 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1)	78
Gambar 2.29 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2)	79
Gambar C.1 Komputer	105
Gambar C.2 Comsol <i>Multiphysics</i> 4.4	105
Gambar C.3 Ampelas	105
Gambar C.4 <i>Cutter</i>	105
Gambar C.5 <i>Hairdryer</i>	105
Gambar C.6 Mesin Laser <i>Cutting</i>	105
Gambar C.7 Libre VNA	106
Gambar C.8 Mesin Bor	106
Gambar C.9 Mikrometer Digital	106
Gambar C.10 Penggaris	106

Gambar C.11 Rakel.....	106
Gambar C.12 Spatula	106
Gambar C.13 <i>Screen</i> Sablon	107
Gambar C.14 Solder.....	107
Gambar C.15 Wadah Plastik	107
Gambar C.16 Akrilik.....	107
Gambar C.17 <i>Foil</i> Tembaga.....	107
Gambar C.18 Kabel Konektor.....	108
Gambar C.19 Konektor <i>Female</i> BNC	108
Gambar C.20 Konektor <i>Male</i> BNC	108
Gambar C.21 Larutan HCL dan H ₂ O ₂	108
Gambar C.22 Larutan M3	108
Gambar C.23 Lem Akrilik	108
Gambar C.24 <i>Printed Circuit Board</i> (PCB).....	109
Gambar C.25 <i>Pylox Cleaner</i>	109
Gambar C.26 <i>Pylox</i> Hitam	109
Gambar C.27 Resistor	109
Gambar C.28 Timah	109
Gambar C.29 Tinta Sablon.....	109

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. 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* [1].

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 *ultrasonic 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* [2]. *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 [3].

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 [4]. 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 [5]. 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.

1.2. Rumusan Masalah

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.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang ada, maka tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Mendesain dan membuat sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral untuk mengukur beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik.
2. Melakukan karakterisasi dan uji performa sensor untuk mengetahui besaran impedansi dan kapasitansi pada beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik.
3. Membandingkan nilai pengukuran pada beragam ketebalan lapisan cat pada substrat akrilik berdasarkan hasil pengukuran impedansi dan

kapasitansi sensor kapasitif dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral dengan mikrometer digital.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini terdiri atas variabel bebas, terikat, dan terkontrol. Beragam substrat akrilik yang digunakan dengan ketebalan lapisan yang berbeda, berupa akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan menjadi variabel bebas dalam penelitian ini. Sedangkan variabel terikat berupa hasil dari nilai impedansi, kapasitansi dan ketebalan lapisan yang dihasilkan oleh sensor kapasitif model kotak dengan bentuk elektroda kotak dan elektroda spiral dalam beragam media uji. Nilai impedansi dan kapasitansi pada media uji dipengaruhi oleh *range* frekuensi yang digunakan, sehingga *range* frekuensi dari 100 kHz hingga 1 MHz dengan 500 data *point* menjadi variabel terkontrol.

1.5 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima bab yang dilengkapi dengan daftar pustaka serta lampiran pendukung. Bab I pendahuluan menjelaskan mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan laporan penelitian. Bab II tinjauan pustaka menjelaskan mengenai dasar fundamental teori yang mendukung penelitian ini sebagai acuan dalam analisis dan pengolahan data serta pembahasan. Bab III metodologi penelitian menjelaskan mengenai metode yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian ini, prosedur, dan diagram alir. Bab IV hasil dan pembahasan menjelaskan mengenai hasil yang

didapat dari penelitian serta analisis lanjut terkait data yang didapatkan. Bab V kesimpulan dan saran menjelaskan mengenai kesimpulan dari hasil yang didapat serta saran-saran untuk perbaikan dan aspek lainnya yang perlu ditingkatkan untuk penelitian selanjutnya. Daftar pustaka memuat mengenai referensi yang digunakan selama penelitian dan menjadi acuan dalam melakukan penelitian. Lampiran menjelaskan data hasil penelitian dan gambar alat serta bahan yang digunakan merupakan beberapa data sekunder pendukung dalam penelitian dan penulisan laporan penelitian ini.

BAB II

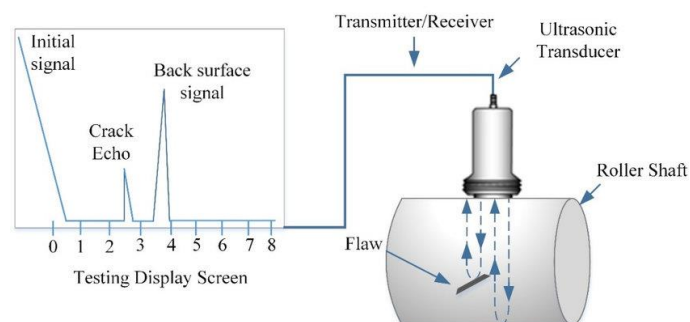
TINJAUAN PUSTAKA

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].

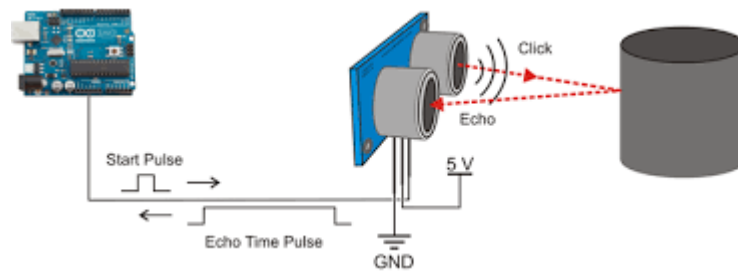
2.2 Sensor Untuk Mengukur Ketebalan Lapisan

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.

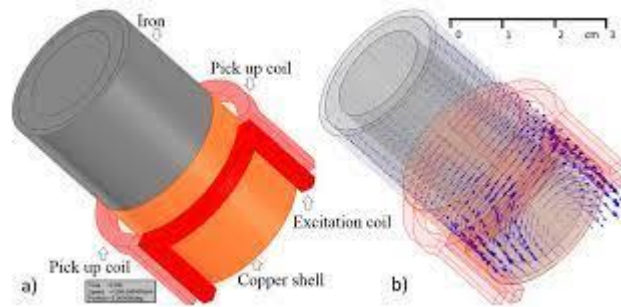
Penelitian yang dilakukan oleh I. Lestari [12] mengenai pengukuran ketebalan cat menggunakan sensor ultrasonik menunjukkan bahwa sensor ultrasonik dapat digunakan untuk mengukur ketebalan lapisan cat dengan akurasi yang baik dan efisien. Hasil pengukuran menggunakan sensor ultrasonik menunjukkan ketebalan 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

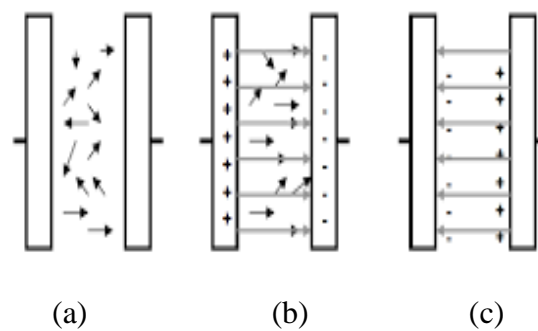
(film tipis). Dalam penelitian ini, variasi ketebalan film tipis yang diukur adalah dari 0,1 hingga 2 mikrometer dengan menggunakan sampel film tipis tembaga pada substrat kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sensor induktif yang dikembangkan dapat mengukur ketebalan film tipis secara non-destruktif 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</i> (PMMA) / Akrilik	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].

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

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

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]:

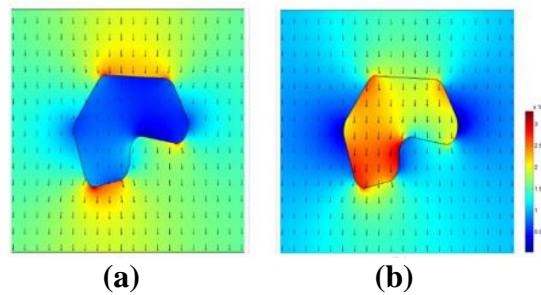
$$\nabla \cdot (\epsilon_0 E + P) = \rho \dots\dots\dots (2.14)$$

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

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

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

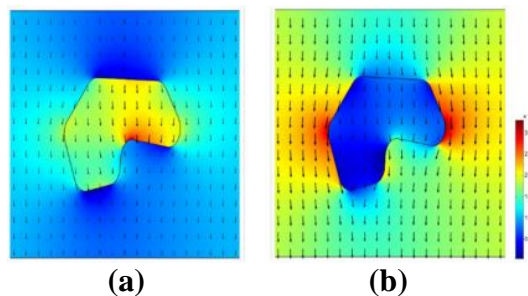
Medan di sekitar objek dengan permitivitas lebih tinggi dari sekitarnya dapat dilihat pada Gambar 2.5. Gambar tersebut menunjukkan material dielektrik, ($\epsilon_r = 2$) dikelilingi oleh udara ($\epsilon_r = 1$) di antara dua pelat kapasitor. Elektroda atas dan bawah masing-masing memiliki potensial 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

[28]



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



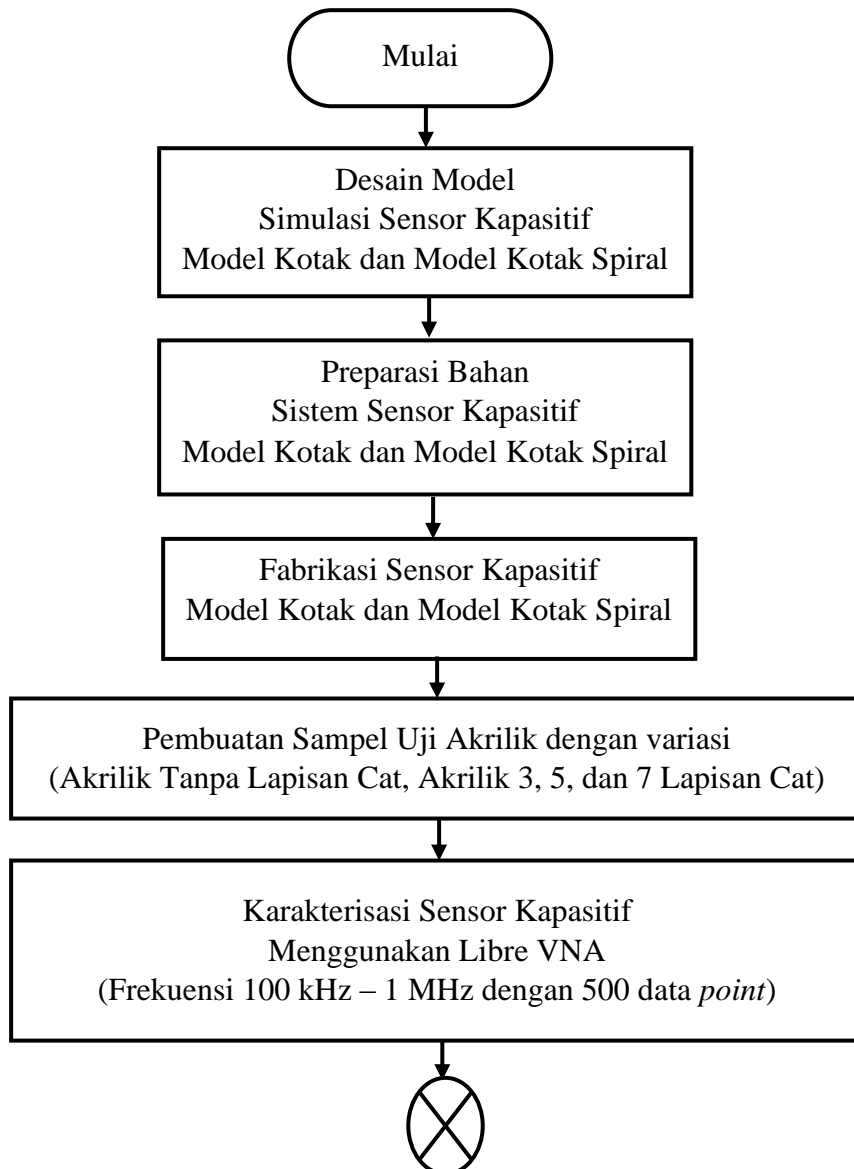
Gambar 2.7 Pengoperasian VNA Menggunakan Kabel Koaksial [25]

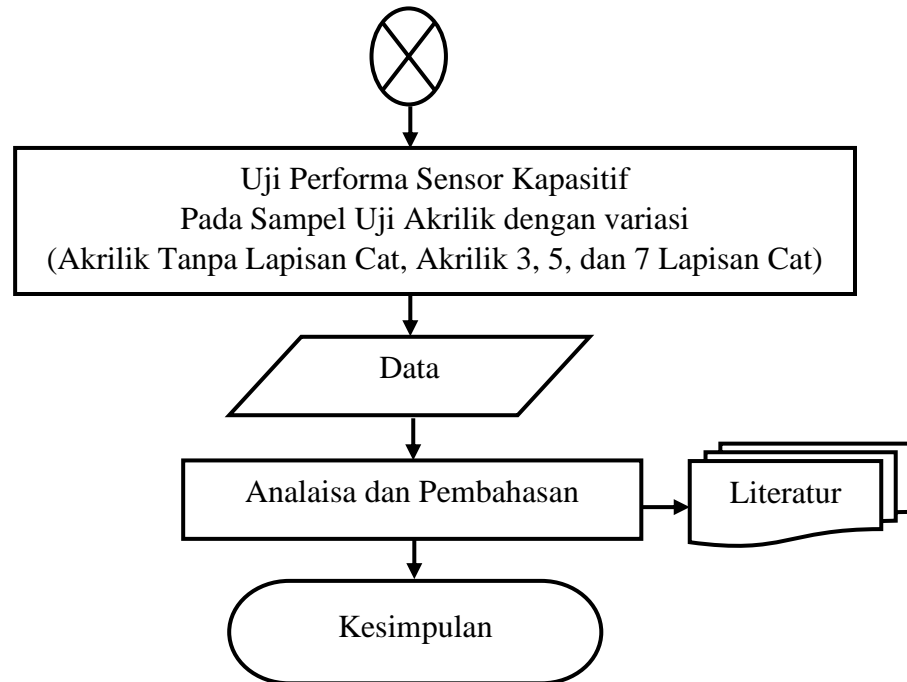
BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

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 3.1.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat yang digunakan

Adapun alat-alat yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Satu perangkat komputer dengan spesifikasi processor: Intel® Core™ i7- 3770 CPU @3.40GHz 3.90GHz, 8 GB RAM
2. COMSOL *Multiphysics*; versi 4.4, modul AC/DC COMSOL *Multiphysics* merupakan perangkat lunak FEM yang digunakan dalam proses simulasi.
3. Ampelas
4. *Cutter*
5. *Hairdryer*
6. *Laser cutting*

7. *Libre Vector Network Analyzer (VNA)*
8. Mesin bor
9. Mikrometer digital
10. Penggaris
11. Rakel
12. Spatula
13. *Screen* sablon
14. Solder
15. Wadah plastik

3.2.2 Bahan yang digunakan

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Akrilik
2. Foil Tembaga
3. Kabel RG16
4. Konektor *male* dan *female* BNC
5. Larutan *etching* (HCl asam klorida), (H₂O₂ Hidrogen peroksida), dan (H₂O air)
6. Larutan M3
7. Lem akrilik
8. PCB
9. *Pylox cleaner*
10. *Pylox* hitam

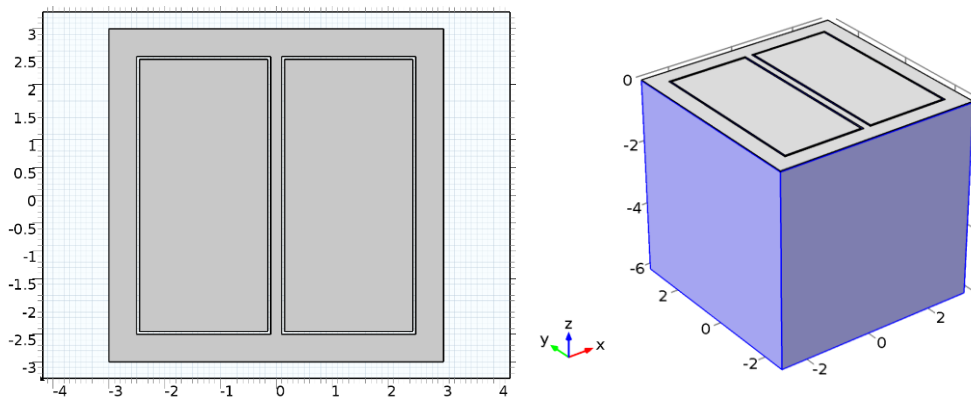
- 11. Resistor
- 12. Timah
- 13. Tinta Sablon

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

3.3.1 Desain Model

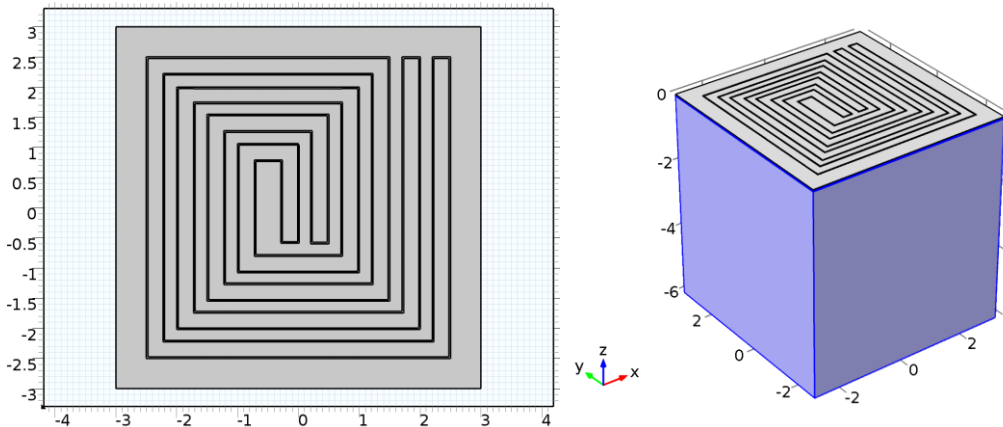
Desain sensor yang disimulasikan menggunakan modul AC/DC dan elektrostatik sebagai fisis untuk mendapatkan nilai kapasitansi. Sensor kapasitif didesain dengan bentuk elektroda model kotak dan elektroda model kotak spiral dengan detail yang dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 serta ukuran geometri pada Tabel 3.1 dan Tabel 3.2.



Gambar 3.2 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak

Tabel 3.1 Ukuran Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak

Panjang	6 cm
Lebar	6 cm
Tinggi	6 cm

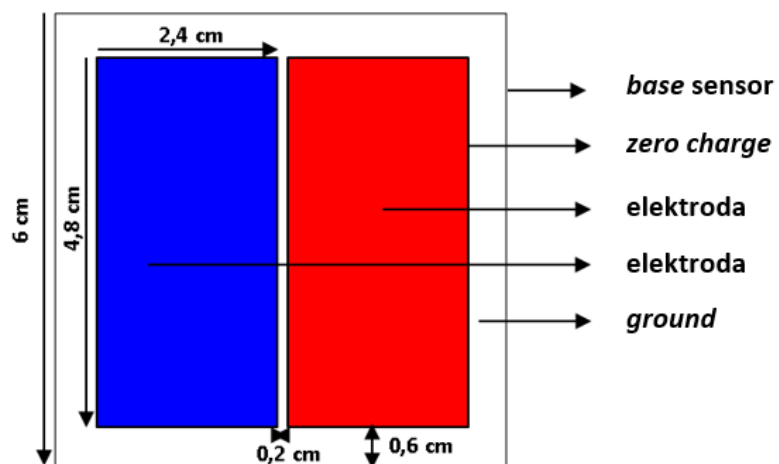


Gambar 3.3 Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

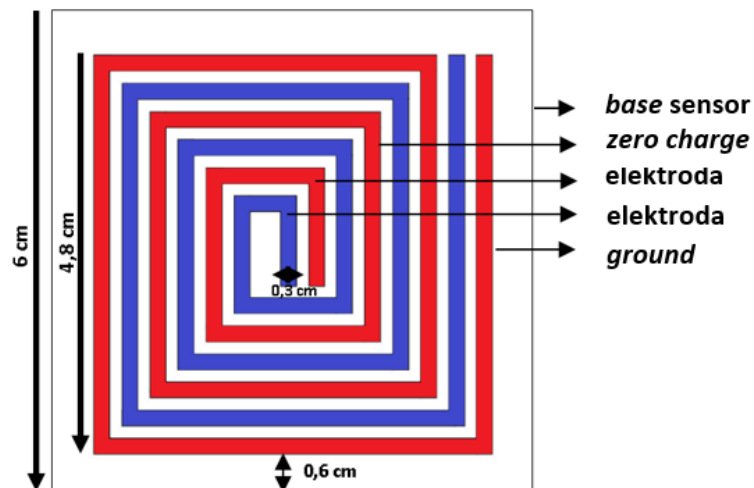
Tabel 3.2 Ukuran Geometri Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

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 3.4 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak



Gambar 3.5 Desain Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

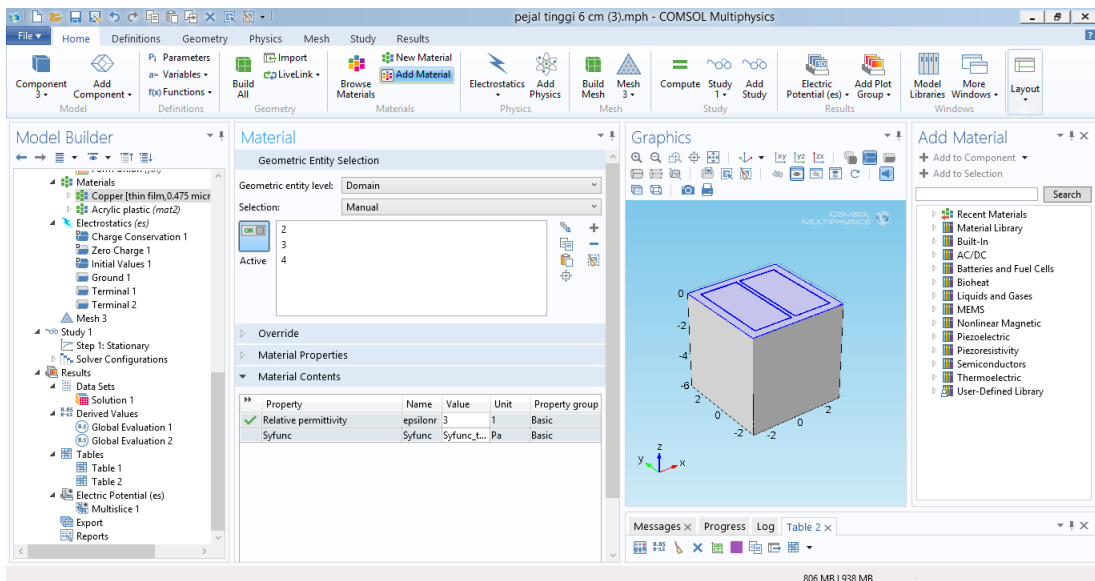
Pembuatan desain 3D dan simulasi sensor dilakukan dengan menggunakan *software* COMSOL *Multyphysics* 4.4. desain sensor berukuran 6 cm x 6 cm. Simulasi tersebut akan digunakan untuk memprediksi berbagai parameter fisika dalam percobaan yang akan dianalisis. Sensor yang dibuat dengan memasukkan parameter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

3.3.2 Parameter *Domain*

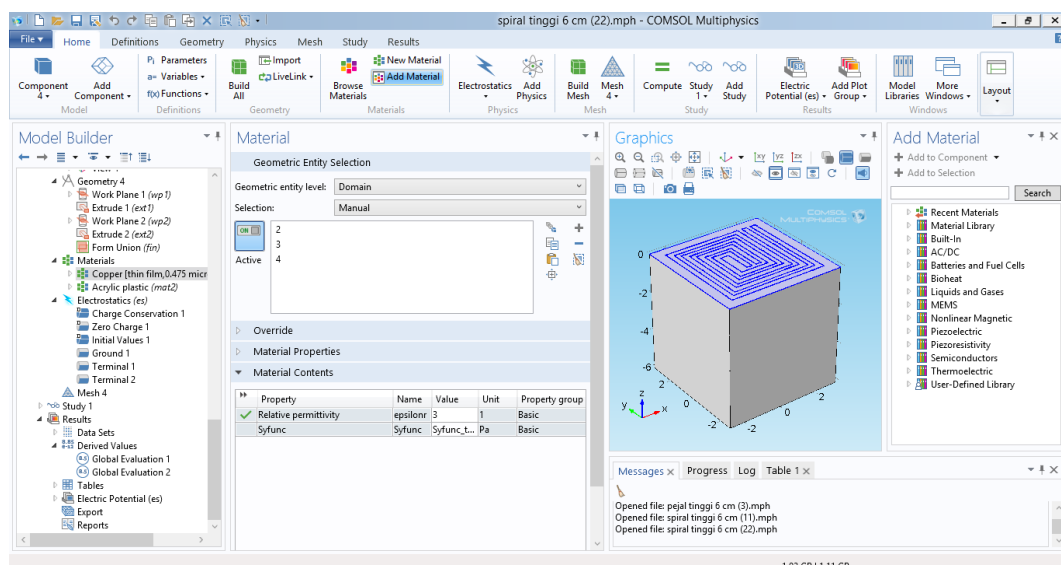
Parameter *domain* diperlukan untuk karakteristik fisis pada subbidang utama geometri sensor. Adapun karakteristik fisis yang digunakan yaitu medan elektrostatik (es) pada simulasi sensor kapasitif. Setelah itu parameter yang digunakan adalah pemilihan material dan nilai permitivitas relatif (ϵ_r). Material 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 3.6 dan Gambar 3.7.



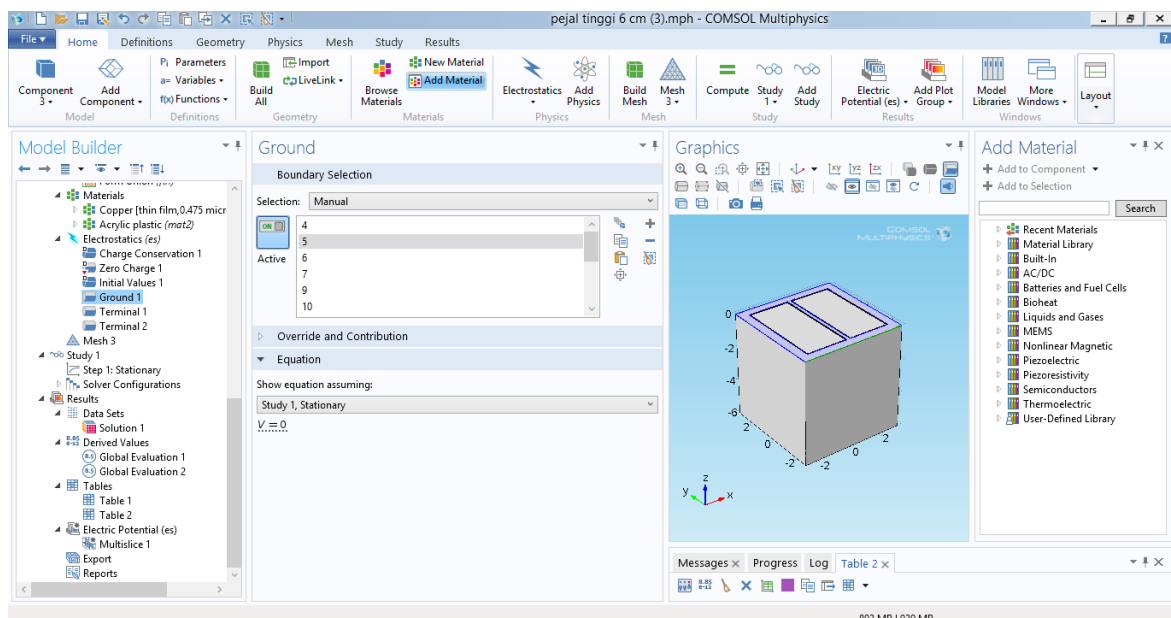
Gambar 3.6 Pengaturan *Domain* pada Material Sensor Kapasitif Model Kotak



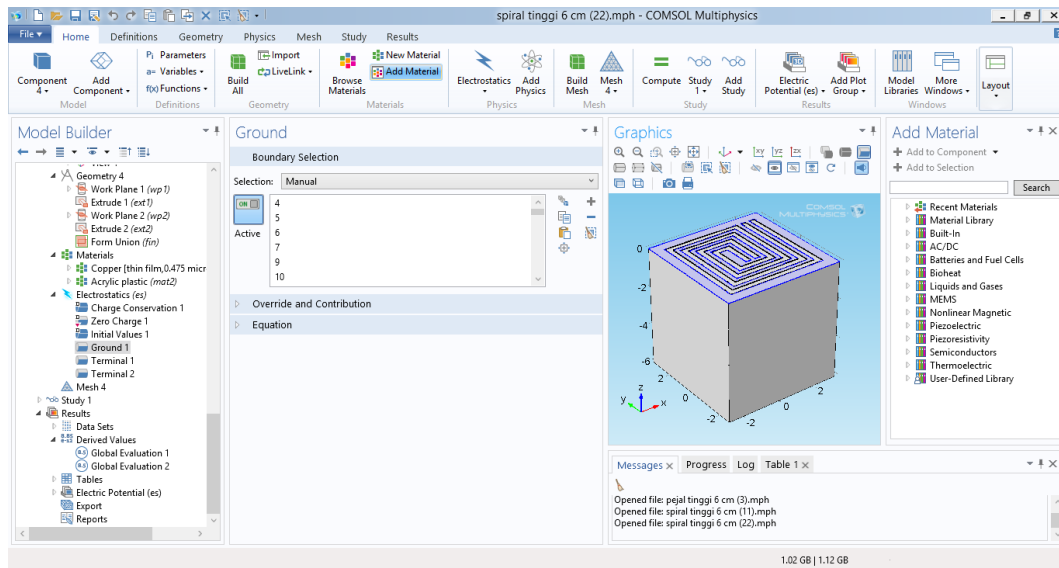
Gambar 3.7 Pengaturan *Domain* pada Material Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

3.3.3 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 elektrostatik 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 3.8 Setting *Boundary Selection* pada *Ground*
Sensor Kapasitif Model Kotak

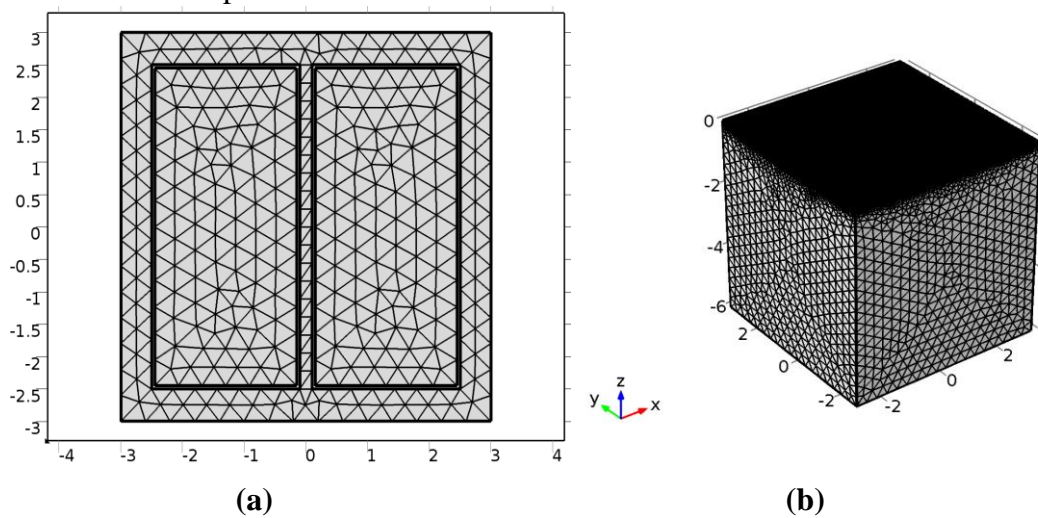


Gambar 3.9 Setting Boundary Selection pada Ground Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

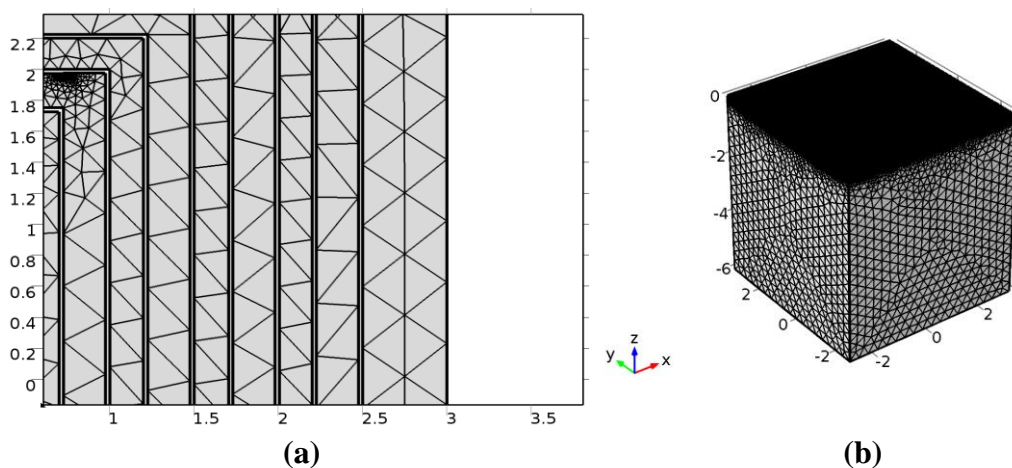
3.3.4 Parameter Meshing

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 3.10 dan Gambar 3.11.



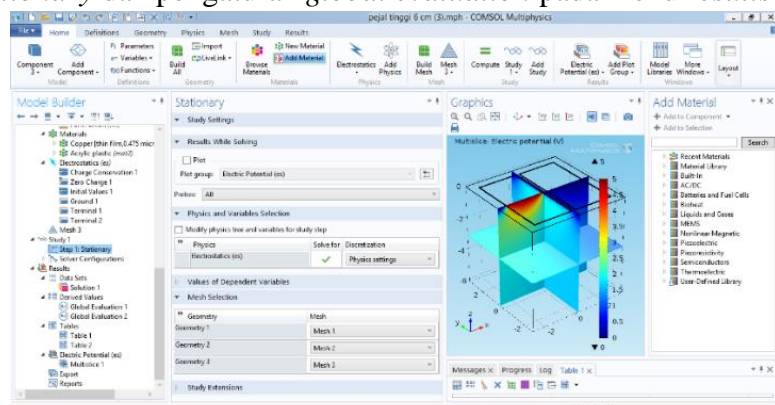
Gambar 3.10 (a) *Meshing Layer* pada Sensor (b) *Meshing Keseluruhan* Sensor Kapasitif Model Kotak



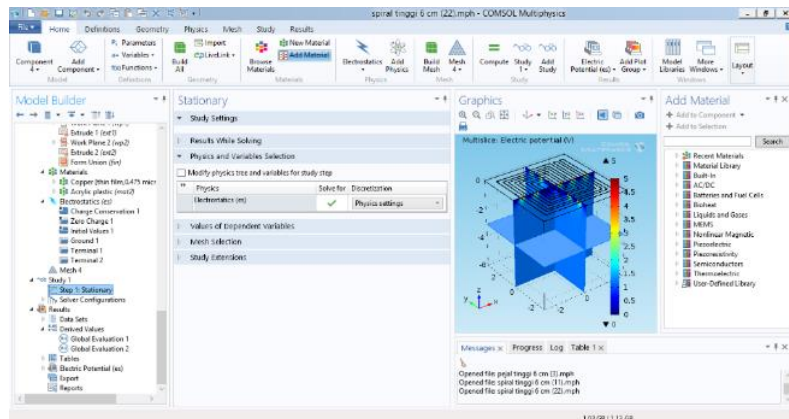
Gambar 3.11 (a) *Meshing Layer* pada Sensor (b) *Meshing Keseluruhan* Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

3.3.5 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 3.12 dan Gambar 3.13 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



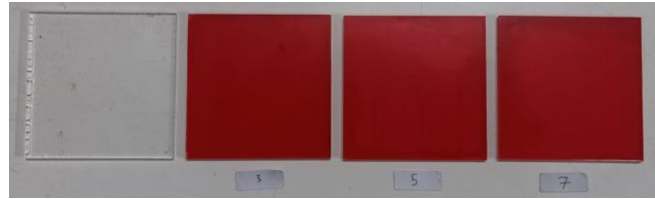
Gambar 3.13 Study Modul Stationary dan Global Evaluation pada Menu Results Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

3.3.6 Pembuatan Sampel dengan Ketebalan Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 5 Lapisan dan Akrilik 7 Lapisan

Tahapan pembuatan sampel dimulai dengan mempersiapkan akrilik 3 mm yang dipotong menjadi ukuran 6 cm x 6 cm. Kemudian dilakukan penyablonan menggunakan *screen* sablon, rakel dan tinta sablon. Untuk variasi tanpa lapisan tidak perlu dilakukan penyablonan. Penyablonan dilakukan dengan variasi yaitu 3 lapisan, 5 lapisan, dan 7 lapisan cat. Pengeringan lapisan dilakukan menggunakan *hairdryer* dan dидiamkan mengering dengan udara terbuka. Untuk teknik penyablonan dilakukan secara cepat karena tinta sablon cepat mengering. Oleh karena itu, sampel dengan variasi 3 lapisan, 5 lapisan, dan 7 lapisan dilakukan penyablonan secara berulang kali pada masing-masing tiap lapisan sebanyak variasi yang digunakan. Setelah itu dilakukan pengukuran ketebalan pada sampel uji akrilik dengan variasi tanpa lapisann, 3 lapisan, 5 lapisan, dan 7 lapisan menggunakan mikrometer digital.



(a)



(b)

Gambar 3.14 (a) Mikrometer Digital (b) Sampel Uji Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 7 Lapisan, dan Akrilik 7 Lapisan

Tabel 3.3 Spesifikasi Sampel Uji Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3 Lapisan, Akrilik 7 Lapisan, dan Akrilik 7 Lapisan

Jenis Sampel	Ukuran	Ketebalan
Akrilik Tanpa Lapisan	6 cm x 6 cm	2,81 mm
Akrilik 3 Lapisan	6 cm x 6 cm	2,84 mm
Akrilik 5 Lapisan	6 cm x 6 cm	2,86 mm
Akrilik 7 Lapisan	6 cm x 6 cm	2,93 mm



(a)



(b)

Gambar 3.15 (a) *Screen* Sablon dan Raket (b) Tinta Sablon

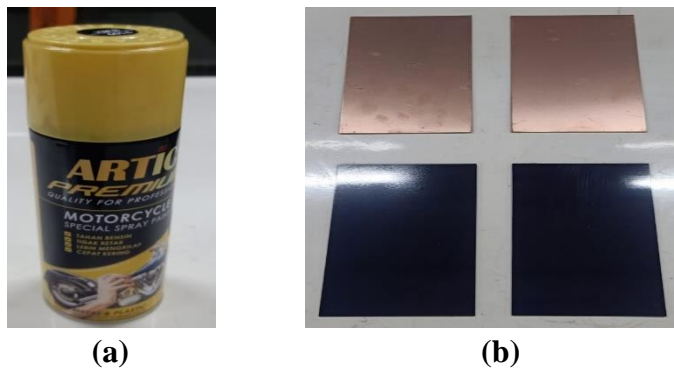
Tabel 3.4 Spesifikasi (a) *Screen* Sablon dan Raket (b) Tinta Sablon

Jenis	Ukuran
<i>Screen</i> Sablon (T165)	15 cm x 20 cm
Raket	10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm
Tinta Sablon	1 liter

3.3.7 Pembuatan Sensor

3.3.7.1 Pembuatan Sensor Kapasitif

Pembuatan sensor dilakukan dengan mengacu pada hasil desain yang telah dibuat. Proses pembuatan diawali dengan preparasi alat dan bahan. Selanjutnya, PCB yang berlapis tembaga dengan ketebalan 2 mm dilakukan proses pengecatan menggunakan *pylox* berwarna hitam untuk melapisi PCB sebelum dilakukan proses *patterning* seperti pada Gambar 3.16. Proses pelapisan PCB menggunakan *pylox* hitam dilakukan untuk melindungi bagian tembaga pada PCB ketika dilakukan proses *etching* agar tidak tergerus serta membentuk pola desain setelah dilakukan proses laser *cutting*.

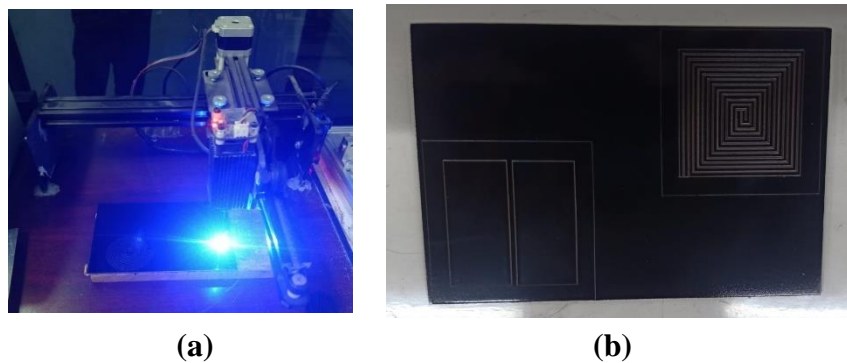


Gambar 3.16 (a) *Pylox* Hitam (b) *Print Circuit Board* (PCB)

Tabel 3.5 Spesifikasi (a) *Pylox* Hitam (b) *Print Circuit Board* (PCB)

Jenis	Ukuran
<i>Pylox</i> Hitam	400 ml
<i>Print Circuit Board</i> (PCB)	10 cm x 15 cm

Setelah itu dilakukan proses laser *cutting* untuk membentuk pola desain sensor pada PCB menggunakan mesin laser *cutting* serta *software Engraver Master* merupakan *software* yang digunakan untuk mengendalikan dan menguji kinerja mesin laser *cutting* yang nantinya akan mengatur proses laser *cutting* PCB.



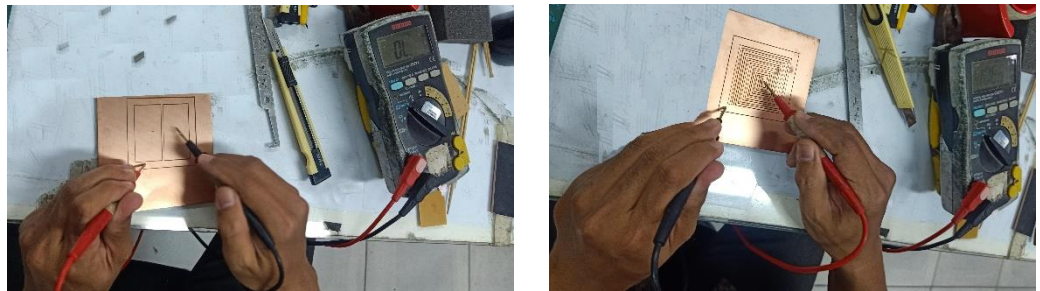
Gambar 3.17 (a) Proses Laser *Cutting* Desain Sensor (b) Setelah Proses Laser *Cutting* Desain Sensor

Setelah selesai dilakukan proses laser *cutting* dilakukan proses *etching* pada PCB menggunakan larutan (HCl asam klorida) 30%, (H₂O₂ Hidrogen peroksida) 50%, dan (H₂O air) dengan perbandingan 1:2:3. *Etching Printed Circuit Board* (PCB) adalah proses pengikisan tembaga dengan bantuan larutan *etching* untuk membentuk jalur sebagai penghubung konduktor antar komponen.

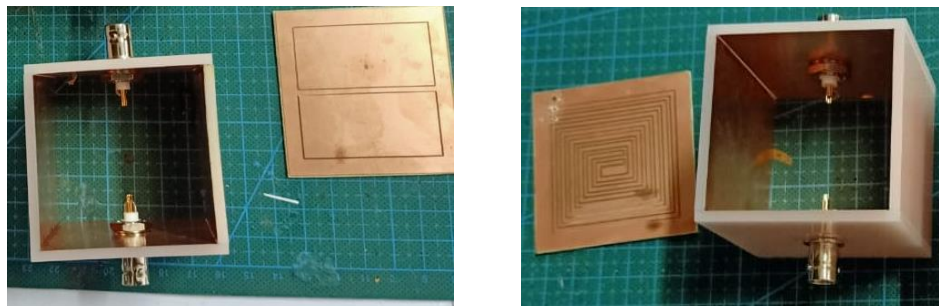


Gambar 3.18 (a) Proses *etching* (b) Larutan HCl dan H₂O₂

Setelah proses etching PCB selesai dilakukan perendaman dengan larutan m3 yang berfungsi untuk membersihkan *pylox* yang masih menempel pada PCB dan dilakukan pengeringan dengan *hairdryer* dan udara terbuka. Setelah itu dilakukan pengecekan kontinuitas pada PCB untuk mengetahui adanya sambungan yang terputus atau tidak menggunakan *multitester*.



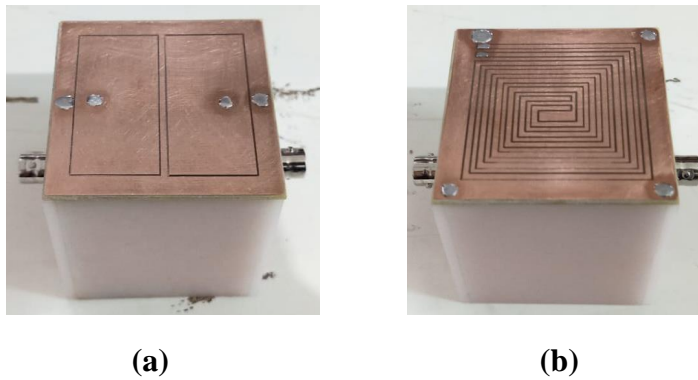
Gambar 3.19 Uji Konduktivitas listrik
Sensor Kapasitif Model Kotak dan Model Kotak Spiral



Gambar 3.20 Proses Fabrikasi
Sensor Kapasitif Model Kotak dan Model Kotak Spiral

Selanjutnya, PCB yang berlapis tembaga dengan ketebalan 1,5 mm dipotong dengan ukuran 6 cm x 6 cm. PCB yang telah dipotong terdiri dari bagian elektroda, *ground*, dan *zero charge*. Setelah itu, *foil* tembaga ditempelkan pada permukaan akrilik dan *ground*

dibuat di sekitar elektroda atau *base* sensor. Selanjutnya, rangkaian listrik dibuat pada sensor dengan menambahkan resistor dan kabel. Setelah itu, elektroda dan *ground* dihubungkan dengan resistor menggunakan timah solder melalui metode pemanasan untuk selanjutnya dihubungkan dengan kabel koaksial dan dipasangkan dengan konektor *female* BNC. Sensor dirakit menjadi bentuk kotak atau kubus dengan menggunakan lem akrilik. Setelah sensor selesai dilakukan fabrikasi menyemprotkan *pylox cleaner* untuk menghindari kemungkinan terjadinya teroksidasinya sensor. Kemudian, membuat kabel konektor untuk menghubungkan sensor dengan alat uji performa Libre VNA. Prototipe sistem sensor ditunjukkan pada Gambar 3.21 dan Gambar 3.22.



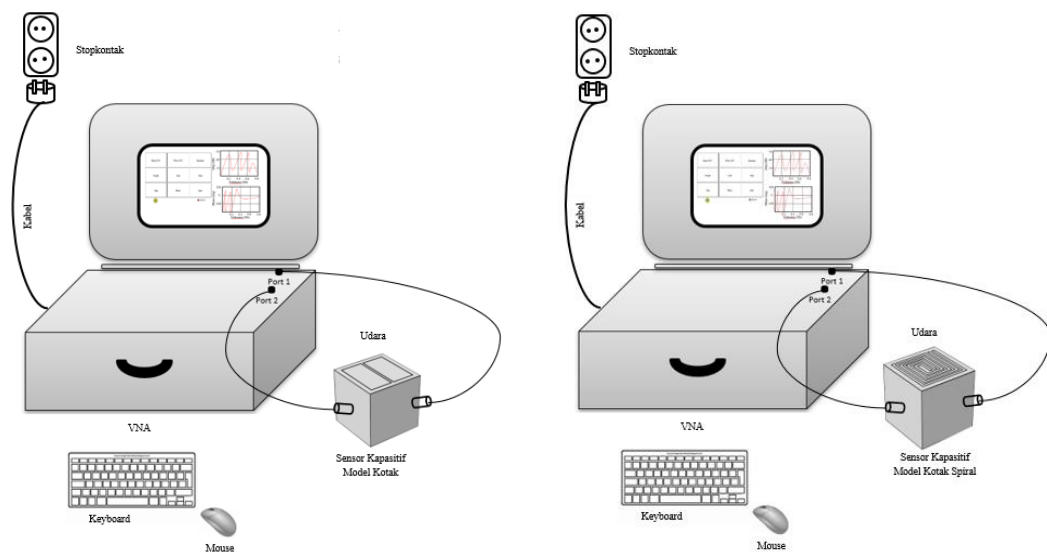
Gambar 3.21 Sensor Kapasitif (a) Model Kotak dan (b) Model Kotak



Gambar 3.22 Kabel Konektor

3.3.8 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.

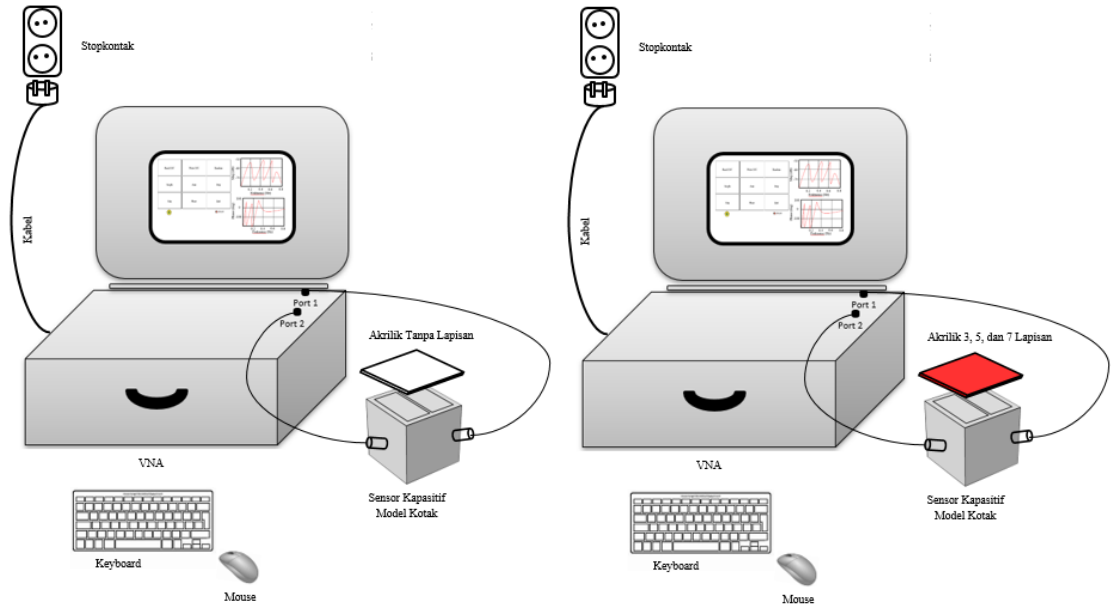


Gambar 3.23 Skema Karakterisasi Sensor Kapasitif Model Kotak dan Model Kotak Spiral

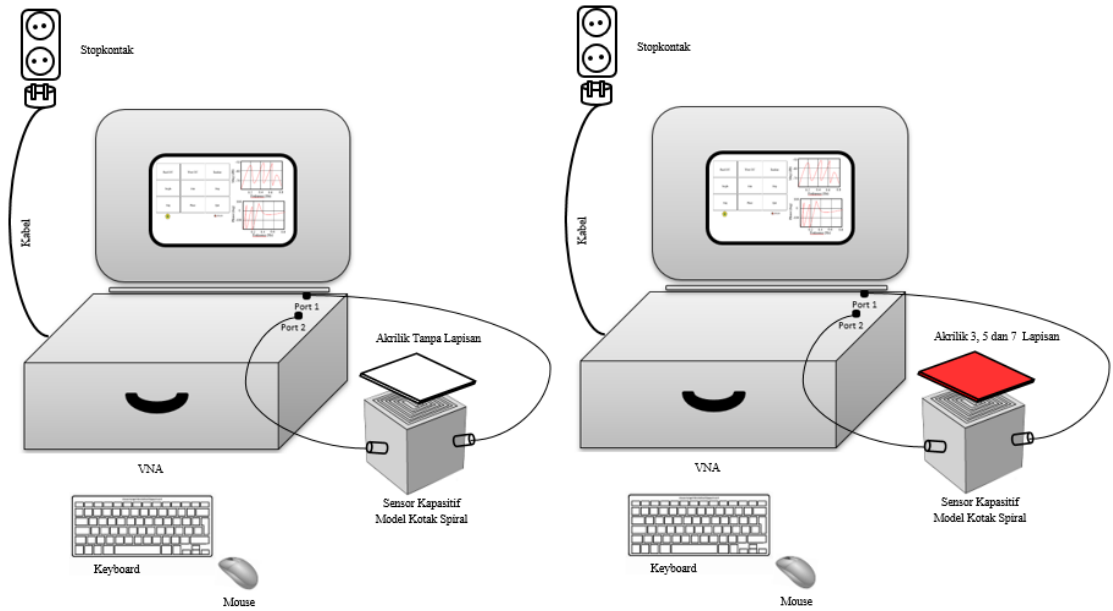
3.3.9 Uji Performa Sensor Kapasitif

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 kapasitansi.
7. Melakukan hal yang sama pada uji performa sensor kapasitif model kotak spiral.



Gambar 3.24 Skema Uji Performa Sensor Kapasitif Model Kotak

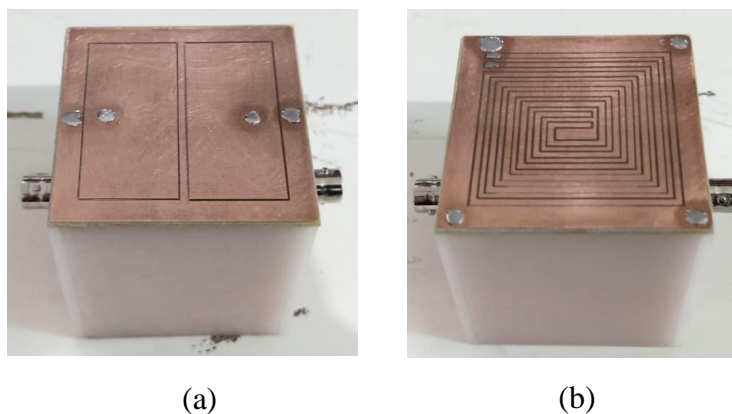


Gambar 3.25 Skema Uji Performa Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

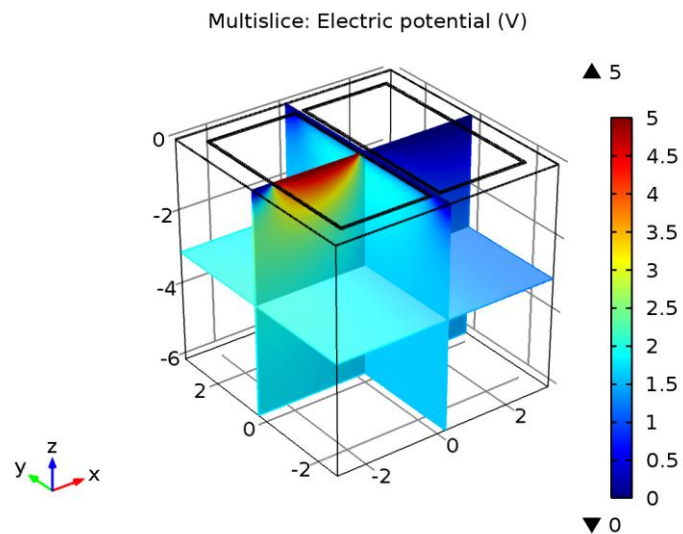
Pada bab ini akan dibahas hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai desain sensor kapasitif model kotak dan spiral untuk mengukur ketebalan lapisan. Sebelum melakukan fabrikasi sensor, hal yang dilakukan adalah membuat desain serta simulasi sensor kapasitif menggunakan *software* COMSOL *Multiphysics* 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 4.1



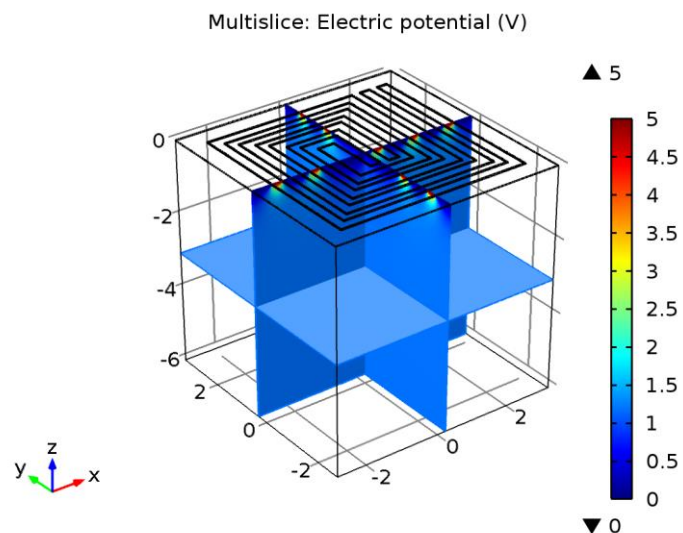
Gambar 4.1 Sensor Kapasitif Model (a) Kotak dan (b) Kotak Spiral

4.1 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 *Multiphysics* 4.4 dengan desain mempunyai luas 6 x 6 cm dan memiliki 2 elektroda.



Gambar 4.2 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak



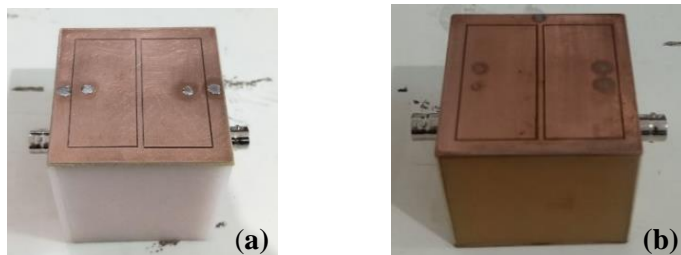
Gambar 4.3 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 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

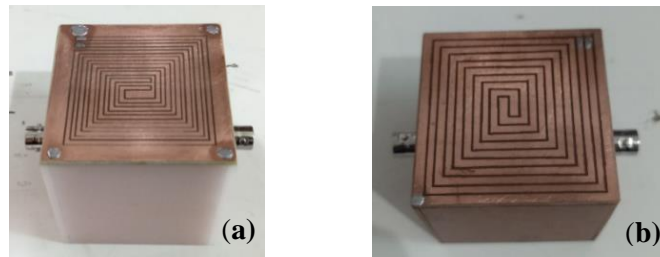
dipilih untuk mengetahui sifat dari desain sensor ketika diberi medan listrik karena pada dasarnya setiap bahan memiliki karakteristik yang berbeda-beda [30].

4.2 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 bahan PCB sebagai elektroda dan *ground*.



Gambar 4.4 Sensor Kapasitif Model Kotak (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2



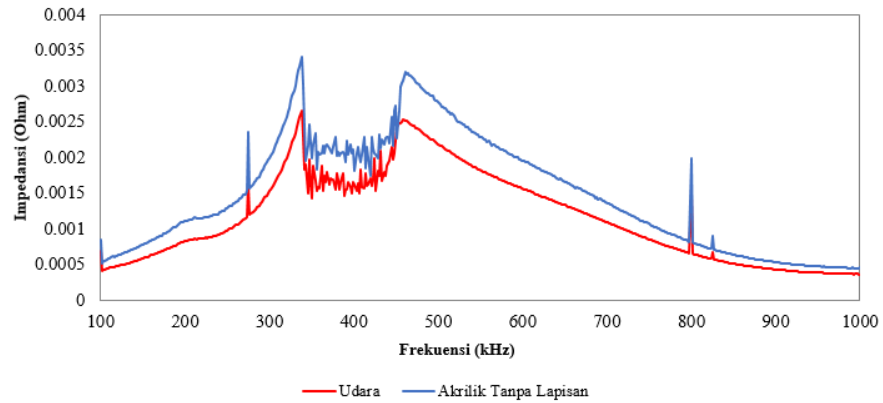
Gambar 4.5 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2

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.

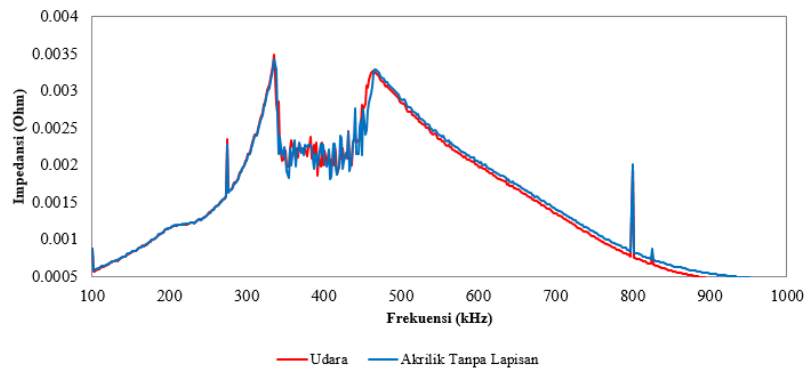
4.2.1 Sensor Kapasitif Model Kotak terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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 4.6 dan Gambar 4.7, 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 kecendrungan 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 4.6 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



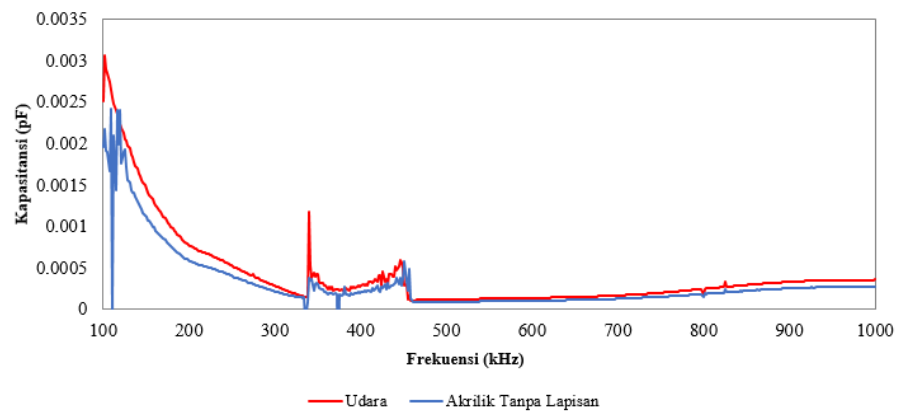
Gambar 4.7 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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

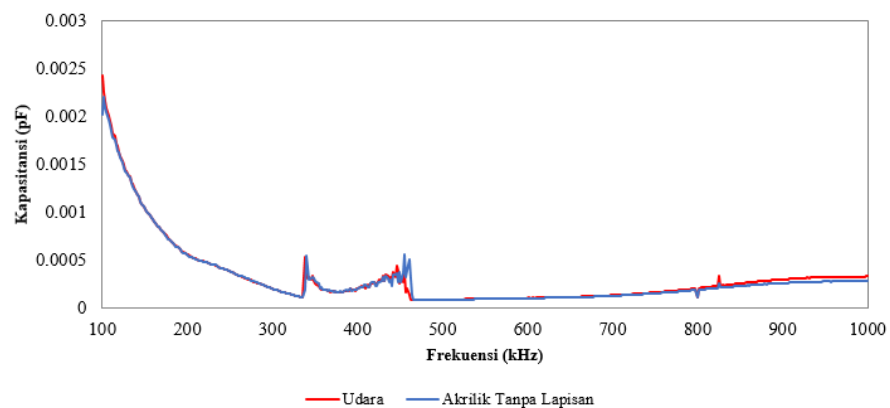
mengukur benda uji yang memiliki nilai konstanta dielektrik [17]. Hasil karakterisasi mengidentifikasi bahwa kedua sensor tersebut dapat mengukur perubahan impedansi yang diterima ketika mengganti benda uji udara dengan akrilik tanpa lapisan.

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 [32]. 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 4.8 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



Gambar 4.9 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

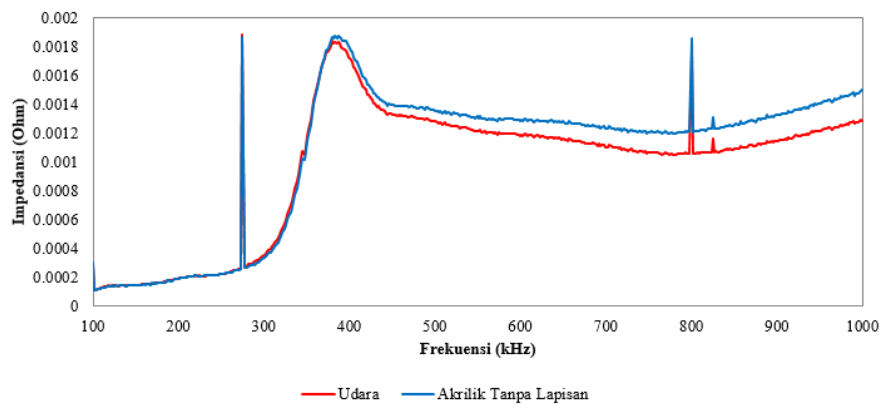
Berdasarkan data yang diperoleh diketahui bahwa kedua sensor tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji udara dan akrilik tanpa lapisan. Jika dibandingkan antara grafik impedansi dan kapasitansi kedua sensor kapasitif cenderung sama hal tersebut dipengaruhi 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 [33].

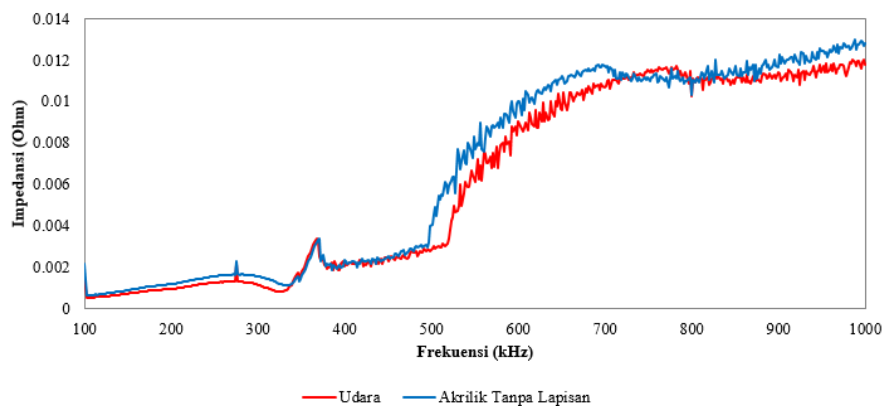
4.2.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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

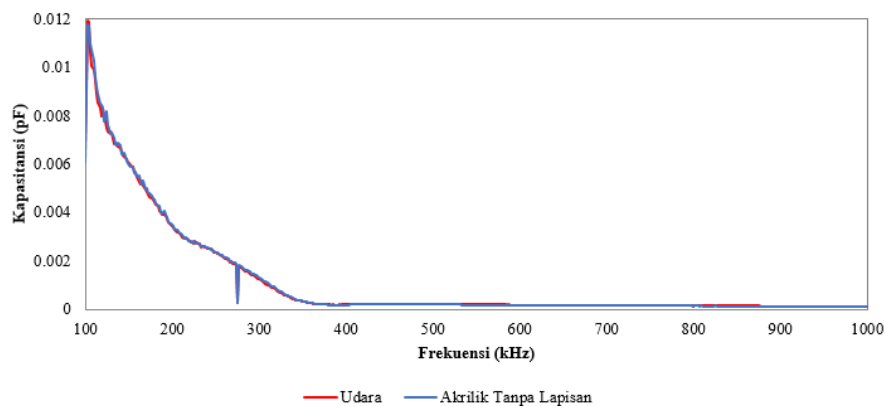


Gambar 4.11 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

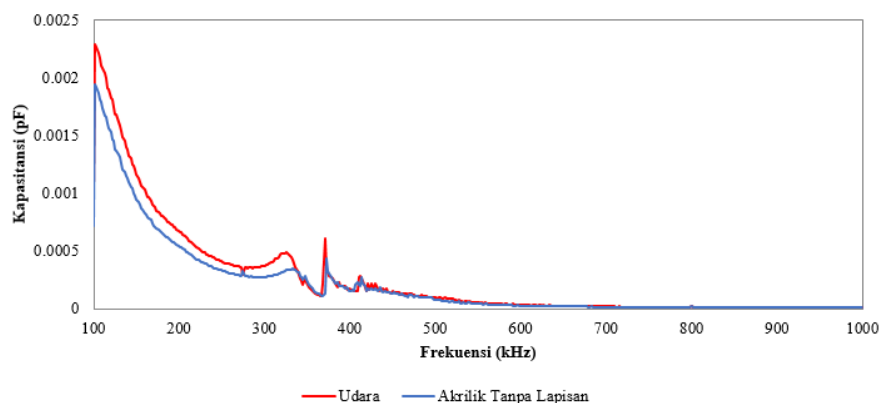
Rata-rata impedansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) sebesar $9,70 \times 10^{-4} \Omega$, sedangkan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,05 \times 10^{-3} \Omega$. Sementara itu, sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) memiliki rata-rata impedansi udara 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 4.12 dan Gambar 4.13, 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 $1,12 \times 10^{-3} \text{ pF}$, sedangkan kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,13 \times 10^{-3} \text{ pF}$. Di sisi lain, rata-rata kapasitansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) sebesar $2,56 \times 10^{-4} \text{ pF}$, dan kapasitansi akrilik tanpa lapisan sebesar $2,12 \times 10^{-4} \text{ pF}$. Ketika dibandingkan, terlihat bahwa nilai impedansi dan kapasitansi yang diperoleh dari percobaan menghasilkan nilai yang berbanding terbalik [32]. 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 4.12 Grafik Karakterisasi Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan



Gambar 4.13 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 [33].

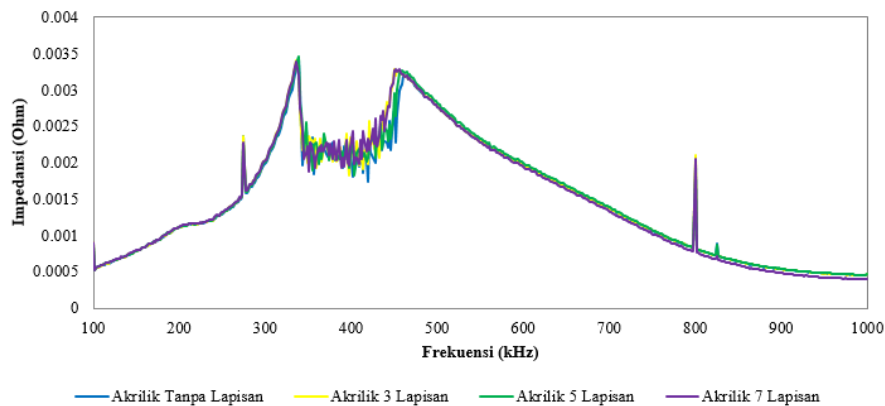
4.3 Uji Performa Sensor Kapasitif

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*.

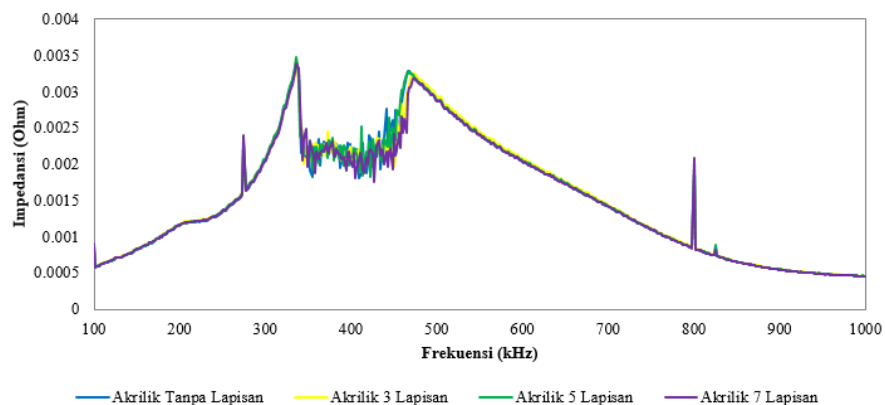
4.3.1 Sensor Kapasitif Model Kotak

Grafik impedansi sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 4.14, 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 $3,18 \times 10^{-4} \Omega$ akrilik 3 lapisan $3,27 \times 10^{-4} \Omega$, akrilik 5 lapisan $3,32 \times 10^{-4} \Omega$, dan akrilik 7 lapisan $3,8 \times 10^{-4} \Omega$ yang diperoleh. Pada Gambar 4.15, 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 akrilik tanpa lapisan $1,76 \times 10^{-3} \Omega$ akrilik 3 lapisan $1,76 \times 10^{-3} \Omega$, akrilik 5 lapisan $1,77 \times 10^{-3} \Omega$, dan akrilik 7 lapisan $1,73 \times 10^{-3} \Omega$ yang diperoleh.



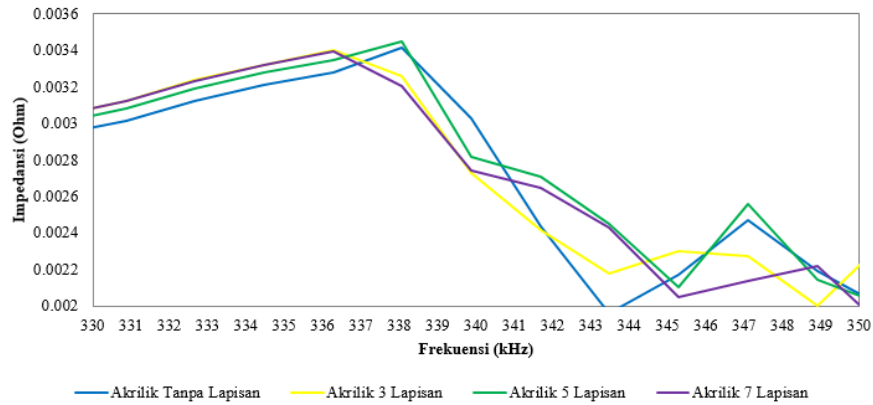
Gambar 4.14 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Type 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



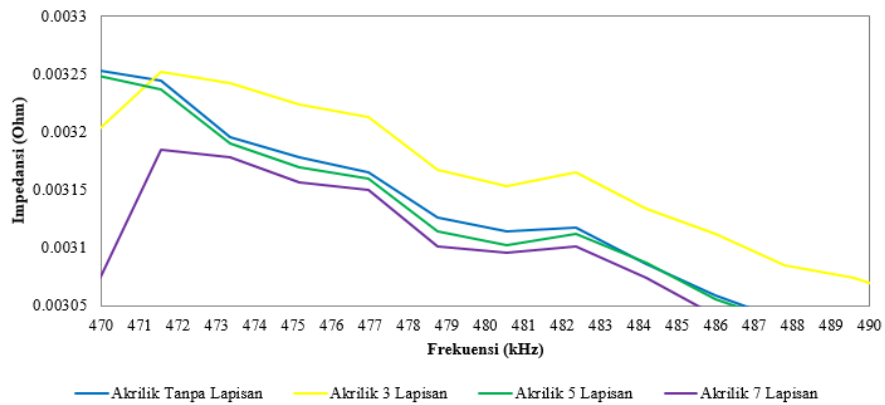
Gambar 4.15 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Type 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Sedangkan grafik normalisasi impedansi kedua sensor tersebut terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 4.16, dan Gambar 4.17, 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 4.16 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



Gambar 4.17 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 [34]. 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 4.1 [17].

$$d = \frac{e x e^0 x A}{C} \dots\dots\dots (4.1)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \quad \dots\dots\dots \text{Persamaan 4.2 [35].}$$

Keterangan:

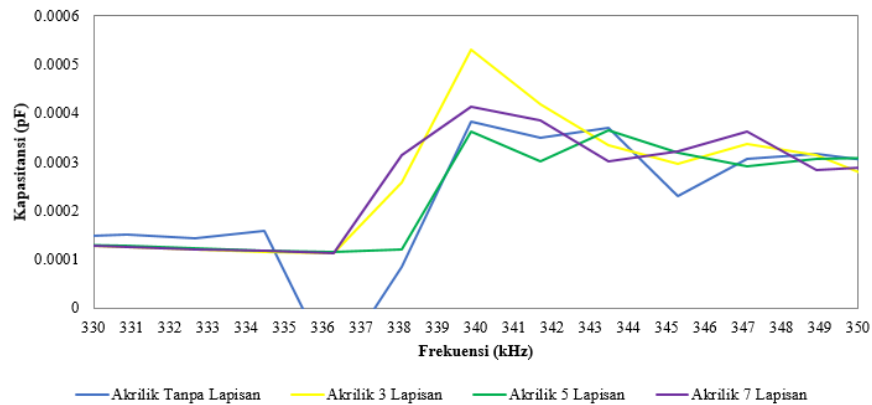
σ = Standar deviasi

x_i = Setiap nilai dari data

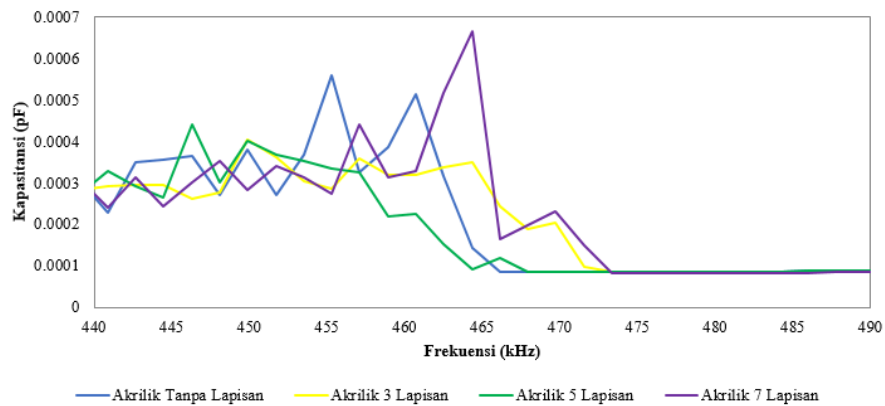
μ = Rata-rata data

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



Gambar 4.19 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

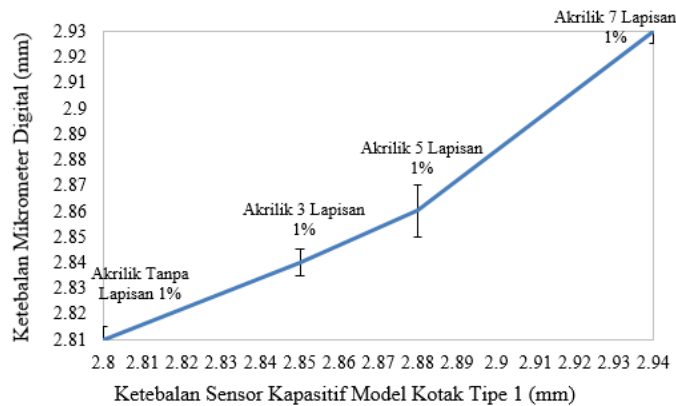
Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 4.1, pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan 2,80 mm, akrilik 3 lapisan 2,85 mm, akrilik 5 lapisan 2,88, dan akrilik 7 lapisan 2,94 mm. Sedangkan, nilai ketebalan 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.

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%

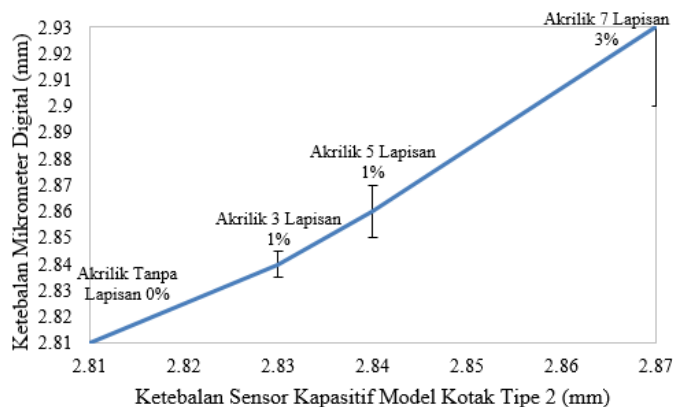
Tabel 4.1 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak
(Tipe 1) dan (Tipe 2)

Hasil perhitungan ketebalan lapisan dapat dilihat pada Tabel 4.1, 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 4.20 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 1)



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2)

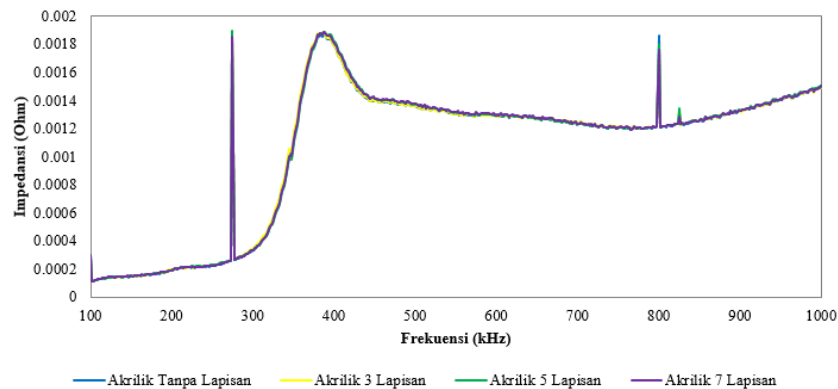
Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan. Kedua sensor dapat mengukur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

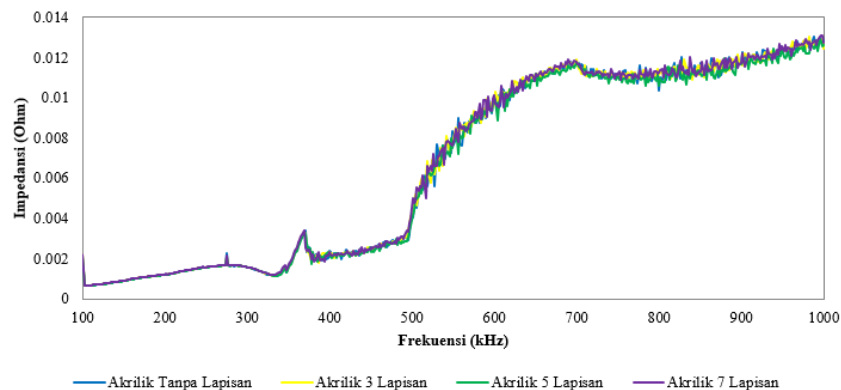
4.3.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

Grafik impedansi sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 4.22. 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 $4,12 \times 10^{-3} \Omega$.

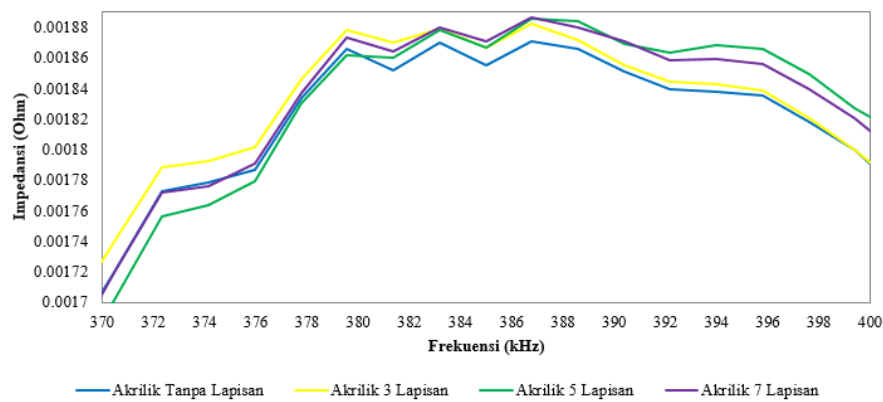


Gambar 4.22 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

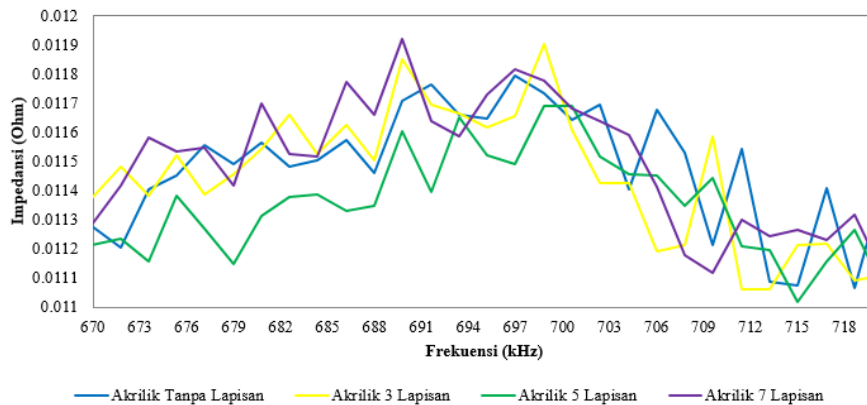


Gambar 4.23 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

Grafik normalisasi impedansi kedua sensor terhadap ketebalan lapisan akrilik dapat dilihat pada Gambar 4.24 dan Gambar 4.25, 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.



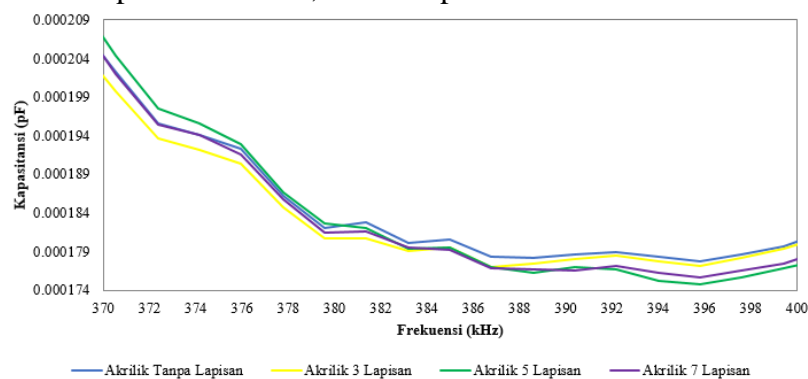
Gambar 4.24 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



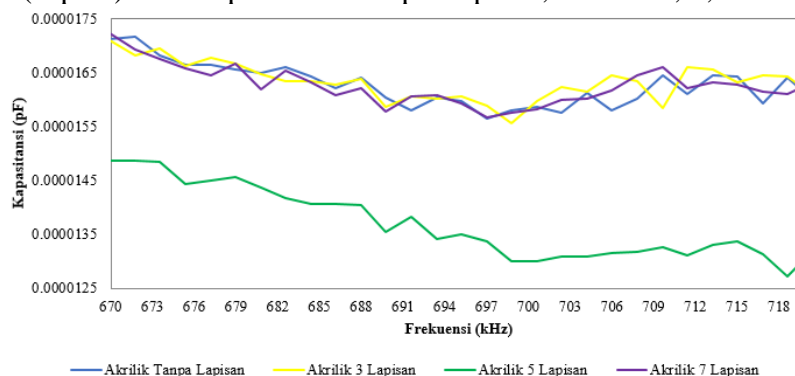
Gambar 4.25 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

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



Gambar 4.27 Grafik Normalisasi Uji Performa Kapasitansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

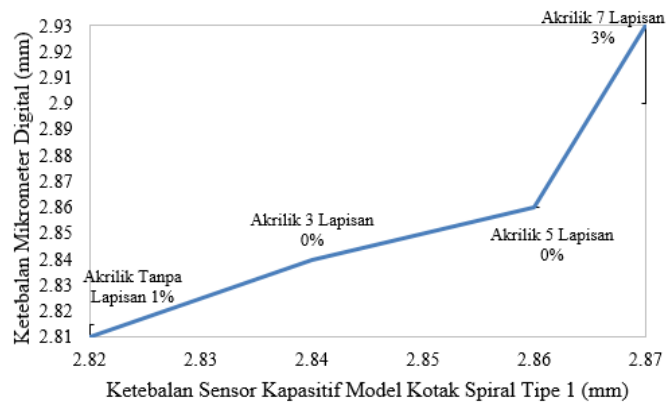
Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 4.2, pada sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan adalah 2,82 mm, akrilik 3 lapisan 2,84 mm, akrilik 5 lapisan 2,86 mm, dan akrilik 7 lapisan 2,87 mm. Sedangkan, 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.

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%

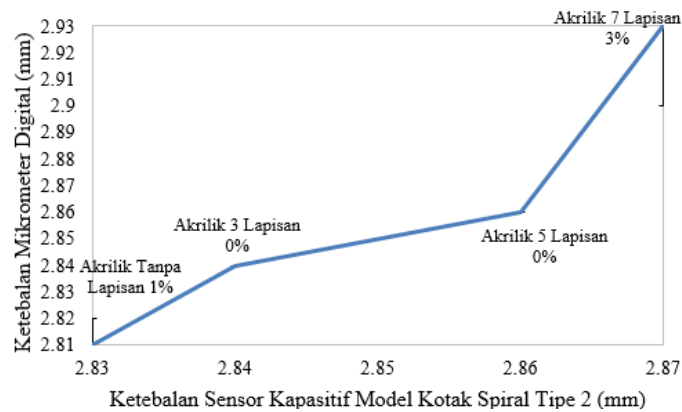
Tabel 4.2 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2)

Hasil perhitungan ketebalan dapat dilihat pada Tabel 4.2, 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 4.28 dan Gambar 4.29.



Gambar 4.28 Grafik Perbandingan Mikrometer Digital dengan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1)



Gambar 4.29 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.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 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.

5.2 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 rill seperti kayu atau logam sebagai sampel uji ketebalan lapisan sehingga diketahui perbedaanya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Grainger and J. Blunt, *Engineering Coatings*. Elsevier, 1998.
- [2] F. D. Munthe, "Pengukuran Ketebalan serta Posisi Cacat pada Sampel Carbon Steel dan Stainless Steel dengan Metode Ultrasonic Testing," *Physics Student Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 502–510, Jan. 2015, [Online]. Available: <http://physics.studentjournal.ub.ac.id/index.php/psj/article/view/218/127>
- [3] X. Hu and W. Yang, "Planar capacitive sensors – designs and applications," *Sensor Review*, vol. 30, no. 1, pp. 24–39, Jan. 2010, doi: 10.1108/02602281011010772.
- [4] A. Yuditama, "Pembuatan Sistem Sensor Kapasitif Untuk Optimasi Lapisan Ketebalan Coating." Nov. 21, 2022. Accessed: Jan. 01, 2023. [Online]. Available: <https://eprints.untirta.ac.id/id/eprint/17438>
- [5] T. Chen and N. Bowler, "Design of interdigital spiral and concentric capacitive sensors for materials evaluation," *AIP Conference Proceedings*, Jan. 2013, doi: 10.1063/1.4789232.
- [6] D. Kristianto and W. H. A. Putera, "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," *DOAJ (DOAJ: Directory of Open Access Journals)*, Mar. 2013, [Online]. Available: <https://doaj.org/article/576dcf82a0ed4ea1825b84a7181f204e>
- [7] A. Bernieri, L. Ferrigno, M. Laracca, A. Rasile, and M. Ricci, "Ultrasonic NDT on aluminum bars: An experimental performance comparison of excitation and processing techniques," *Measurement*, vol. 128, pp. 393–402, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2017.10.040.
- [8] S. Jokosisworo and H. Yudo, "Proses Pengujian Tidak Merusak," vol. 4, no. 1, pp. 26–30, Mar. 2012, doi: 10.14710/kpl.v4i1.2657.
- [9] M. Jamil et al., "Internal Cracks and Non-Metallic Inclusions as Root Causes of Casting Failure in Sugar Mill Roller Shafts," *Materials*, vol. 12, no. 15, p. 2474, Aug. 2019, doi: 10.3390/ma12152474.
- [10] Hijazi, A., *Ultrasonic Testing*, *Applied Welding Engineering*, vol. 293–304. 2012.
- [11] B. Arsada, "Aplikasi Sensor Ultrasonik Untuk Deteksi Posisi Jarak Pada Ruang Menggunakan Arduino Uno," *Deleted Journal*, vol. 6, no. 2, Jun. 2017, [Online]. Available: <https://jurnal.unesa.ac.id/index.php/16/article/view/19511>

- [12] 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.
- [13] Sari, DessyAnaLaila, "Pengukuran Ketebalan Plat Single Dan Multilayer Menggunakan Ultrasonik Dengan Metode Time Of Flight Diffraction (Tofd) Dan Pulse Echo Berbasis Labview." Feb. 09, 2017. Accessed: Jun. 01, 2023. [Online]. Available: <http://repository.ub.ac.id/id/eprint/155182>
- [14] P. Ripka, J. Blažek, M. Mirzaei, P. Lipovský, M. Šmelko, and K. Draganová, "Inductive Position and Speed Sensors," *Sensors*, vol. 20, no. 1, p. 65, Dec. 2019, doi: 10.3390/s20010065.
- [15] 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.
- [16] R. Setiawan, M. Rivai, and S. Suwito, "Implementasi Analog Front End Pada Sensor Kapasitif Untuk Pengaturan Kelembaban Menggunakan Mikrokontroler STM32," *Jurnal Teknik/Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, Feb. 2017, doi: 10.12962/j23373539.v5i2.16416.
- [17] E. Terzic, J. Terzic, R. Nagarajah, and M. Alamgir, "A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments." 2012. doi: 10.1007/978-1-4471-4060-3.
- [18] S. Mujib, "Perancangan Sensor Kelembaban Beras Berbasis Kapasitor," Feb. 2013, [Online]. Available: <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-paper-26117-1108100065-Paper.pdf>
- [19] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors: Design and Applications*. 1996. [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BA67560151>
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Parental, E. T. et al., "Key Concepts," *Key Concepts*, pp. 1–41, 2008.
- [23] Bakhsi, U. A. & Bakhsi, A. O, *Electromagnetic Field Theory*. India: Technical Publications Pune, 2008.

- [24] Maulandari, E. Z., Analisis Hasil Pengukuran Impedansi Listrik Dengan Menggunakan Metode Injeksi Arus Tipe Floating Dan Howland. Malang: Skripsi UB, 2018.
- [25] K. Patel, P. S. Negi, and P. C. Kothari, "Complex S-parameter measurement and its uncertainty evaluation on a vector network analyzer," *Measurement*, vol. 42, no. 1, pp. 145–149, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.measurement.2008.04.010.
- [26] COMSOL Multiphysics, *Comsol Multiphysics Reference Manual, Version 5.5. Manual*, 2014. [Online]. Available: https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf
- [27] COMSOL Multiphysics, "AC / DC Module," in *User 's Guide*, © 1998–2019, 2019, p. 300. [Online]. Available: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.acdc/ACDCModuleUsersGuide.pdf>
- [28] "An Introduction to the Theory of Electrostatics," Feb. 14, 2019. <https://www.comsol.com/multiphysics/electrostatics-theory> (accessed Jun. 01, 2023).
- [29] T. Su et al., "Wideband optical vector network analyzer based on polarization modulation," *Optics Communications*, vol. 437, pp. 67–70, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.optcom.2018.12.046.
- [30] A. D. Setyowati, D. Darmawan, and A. Suhendi, "Penentuan Parameter Sensor Pelat Sebidang Secara Eksperimental Untuk Mengukur Kapasitansi Bahan Kayu Dan Logam," *eProceedings of Engineering*, vol. 6, no. 2, Aug. 2019, [Online]. Available: <https://libraryproceeding.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/9693>
- [31] M. A. Mansor, M. Takeuchi, M. Nakajima, Y. Hasegawa, and M. R. Ahmad, "Electrical Impedance Spectroscopy for Detection of Cells in Suspensions Using Microfluidic Device with Integrated Microneedles," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 2, p. 170, Feb. 2017, doi: 10.3390/app7020170.
- [32] D. Kumar, A. Banerjee, S. Patil, and A. K. Shukla, "A 1 V supercapacitor device with nanostructured graphene oxide/polyaniline composite materials," *Bulletin of Materials Science/Bulletin of Materials Science*, vol. 38, no. 6, pp. 1507–1517, Oct. 2015, doi: 10.1007/s12034-015-0966-0.
- [33] Y. Sun, Y. Wang, Z. Wang, C. Li, X. Meng, and Y. Qi, "The Influence of Mechanical Properties of Dielectric Material and Structure of Electrodes on Capacitive Sensor Properties," Aug. 2018, doi: 10.1109/icept.2018.8480422.

- [34] 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.
- [35] E. Simbolon, "Eksperimen Metode Ultrasonik Untuk Mengukur Ketebalan Setiap Lapisan Tanah Yang Berbentuk Granular," eProceedings of Engineering, vol. 8, no. 5, Sep. 2021, [Online]. Available: <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/16013>

LAMPIRAN A
PERHITUNGAN

Lampiran A. Perhitungan

A.1 Perhitungan Ketebalan Lapisan Dengan Mikrometer Digital

Diketahui:

- Akrilik Tanpa Lapisan

$$\begin{aligned}\text{Ketebalan Lapisan (d) (mm)} &= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 \\ &= 2,81 + 2,81 + 2,81 + 2,80 + 2,81\end{aligned}$$

$$\text{Rata-rata (d) (mm)} = 2,81 \text{ mm}$$

$$\text{Selisih Ketebalan } (\Delta d) \text{ (mm)} = 2,81 \text{ mm}$$

- Akrilik 3 Lapisan

$$\begin{aligned}\text{Ketebalan Lapisan (d) (mm)} &= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 \\ &= 2,83 + 2,83 + 2,85 + 2,86 + 2,85\end{aligned}$$

$$\text{Rata-rata (d) (mm)} = 2,84 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{Selisih Ketebalan } (\Delta d) \text{ (mm)} &= \text{Akrilik 3 Lapisan} - \text{Akrilik Tanpa Lapisan} \\ &= 2,84 \text{ mm} - 2,81 \text{ mm} \\ &= 0,03 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Akrilik 5 Lapisan

$$\begin{aligned}\text{Ketebalan Lapisan (d) (mm)} &= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 \\ &= 2,87 + 2,86 + 2,86 + 2,86 + 2,86\end{aligned}$$

$$\text{Rata-rata (d) (mm)} = 2,86 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{Selisih Ketebalan } (\Delta d) \text{ (mm)} &= \text{Akrilik 5 Lapisan} - \text{Akrilik Tanpa Lapisan} \\ &= 2,86 \text{ mm} - 2,81 \text{ mm} \\ &= 0,05 \text{ mm}\end{aligned}$$

- Akrilik 7 Lapisan

$$\begin{aligned}\text{Ketebalan Lapisan (d) (mm)} &= T1 + T2 + T3 + T4 + T5 \\ &= 2,96 + 2,96 + 2,90 + 2,91 + 2,92\end{aligned}$$

$$\text{Rata-rata (d) (mm)} = 2,93 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\text{Selisih Ketebalan } (\Delta d) \text{ (mm)} &= \text{Akrilik 5 Lapisan} - \text{Akrilik Tanpa Lapisan} \\ &= 2,93 \text{ mm} - 2,81 \text{ mm} \\ &= 0,12 \text{ mm}\end{aligned}$$

A.2 Perhitungan Nilai Impedansi

Diketahui:

- Impedansi $Z = \sqrt{Real^2 + Imajiner^2} \dots\dots\dots A.1$

A.3 Perhitungan Nilai Kapasitansi

Diketahui:

- Kapasitansi

$$C = \frac{1}{2 \times 3,14 \times F \times Z} \dots\dots\dots A.2$$

A.4 Perhitungan Nilai Ketebalan Lapisan Dengan Sensor Kapasitif

Diketahui:

- Ketebalan Lapisan

$$d = \frac{e \times e^0 \times A}{C} \dots\dots\dots A.3$$

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)

A.5 Perhitungan Nilai Standar Deviasi

Diketahui:

- Keterangan:

σ : standar deviasi

x_i : setiap nilai dari data

μ : rata-rata data

n: jumlah data

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \mu)^2}{N}} \dots\dots\dots A.4$$

LAMPIRAN B
DATA DAN HASIL PENELITIAN

Lampiran B. Data Hasil Penelitian

B.1 Hasil Data Nilai Impedansi dan Nilai Kapasitansi Sensor Kapasitif

Model Kotak

Frekuensi	Rata-Rata Impedansi	Rata-Rata Kapasitansi
100000	0.00069978	0.002516972
101803	0.000412465	0.003067474
103607	0.000429744	0.002902351
105410	0.000431862	0.002848694
107214	0.000439659	0.002743942
109018	0.000445689	0.00265446
110821	0.00045704	0.002557608
112625	0.000460096	0.002488227
114428	0.000470746	0.002405129
116232	0.000471023	0.002363193
118036	0.000475536	0.002301703
119839	0.000482161	0.002232078
121643	0.000485561	0.00219282
123446	0.000490723	0.002134175
125250	0.000502438	0.002058364
127054	0.000502743	0.002031229
128857	0.000507383	0.001980384
130661	0.000514928	0.00193893
132464	0.000519301	0.001875353
134268	0.000523367	0.0018331
136072	0.000533204	0.001784262
137875	0.000541905	0.001730937
139679	0.000544871	0.001697667
141482	0.000553647	0.0016431
143286	0.000559194	0.001610553
145090	0.000570228	0.001559687
146893	0.000575021	0.001529566
148697	0.000580404	0.001494896
150501	0.000589803	0.001452854
152304	0.000600364	0.001412127
154108	0.000608205	0.001376812
155911	0.000610602	0.001354898
157715	0.000617912	0.001327476
159519	0.000632375	0.001278689
161322	0.000635924	0.001258425

163126	0.000640666	0.001234709
164929	0.000651861	0.00120108
166733	0.000661279	0.001173749
168537	0.0006689	0.001147896
170340	0.000676842	0.001121395
172144	0.000684469	0.001097761
173947	0.00068979	0.001075478
175751	0.000701789	0.00104697
177555	0.0007129	0.001019482
179358	0.00072351	0.00099473
181162	0.000731247	0.000974472
182965	0.000744635	0.000947984
184769	0.000750752	0.000930959
186573	0.000759961	0.000909649
188376	0.000770753	0.000889343
190180	0.000781633	0.00086872
191983	0.000794019	0.000846698
193787	0.00080047	0.000831722
195591	0.000808857	0.000817527
197394	0.000818317	0.000799154
199198	0.000828199	0.000782719
201002	0.000834714	0.000769975
202805	0.0008387	0.000758727
204609	0.000847676	0.000743438
206412	0.00085165	0.000735827
208216	0.000851623	0.000727853
210020	0.00085538	0.000718827
211823	0.000859237	0.000709793
213627	0.000858028	0.000702975
215430	0.000864719	0.000692358
217234	0.000861033	0.000690436
219038	0.000863732	0.0006827
220841	0.000865752	0.000674641
222645	0.000871435	0.000665034
224448	0.000876159	0.00065646
226252	0.000874901	0.000651939
228056	0.000880776	0.000642492
229859	0.000886782	0.000632878
231663	0.000889298	0.000625943
233466	0.00089675	0.000617011
235270	0.000902206	0.000608944

237074	0.000909523	0.000597973
238877	0.000919513	0.000587784
240681	0.000926236	0.000579347
242484	0.000936587	0.000568862
244288	0.000942962	0.000560207
246092	0.00095546	0.000548386
247895	0.000965649	0.000539352
249699	0.000979185	0.000527785
251503	0.000986153	0.000520247
253306	0.00099907	0.000510267
255110	0.001011254	0.000500635
256913	0.001023414	0.000491174
258717	0.001035252	0.000481364
260521	0.001051766	0.000471334
262324	0.001063644	0.000462701
264128	0.001078816	0.000453174
265931	0.001095527	0.000442676
267735	0.001110705	0.000434193
269539	0.001125704	0.000425416
271342	0.001143428	0.000415699
273146	0.001160524	0.000407509
274949	0.001642278	0.000420441
276753	0.001198907	0.000389185
278557	0.001215136	0.000381122
280360	0.001234377	0.000372679
282164	0.001258181	0.000363543
283967	0.001277852	0.000355484
285771	0.001297766	0.000347561
287575	0.001328178	0.000337684
289378	0.001353566	0.00032926
291182	0.0013825	0.000320804
292985	0.001409382	0.000312402
294789	0.001439204	0.000304301
296593	0.001470481	0.000296007
298396	0.001495075	0.000289316
300200	0.001532987	0.000280475
302004	0.00156025	0.000273652
303807	0.001598967	0.000265619
305611	0.001636526	0.000258146
307414	0.001671472	0.000251054
309218	0.00171319	0.000243787

311022	0.00175074	0.000236973
312825	0.001793953	0.000230056
314629	0.001840671	0.000222873
316432	0.001883635	0.000216547
318236	0.001937023	0.000209527
320040	0.00198401	0.000203307
321843	0.002036104	0.000197036
323647	0.002098085	0.000190181
325450	0.002149942	0.000184807
327254	0.002215026	0.000178046
329058	0.002281623	0.000171974
330861	0.002347189	0.000166119
332665	0.002421394	0.000160342
334468	0.002494139	0.000154796
336272	0.002572492	0.000149235
338076	0.002655955	0.000143803
339879	0.00287788	0.001180638
341683	0.001829011	0.000540074
343486	0.001896081	0.000373978
345290	0.001491029	0.000437742
347094	0.001974422	0.00040012
348897	0.001642906	0.000429635
350701	0.001436726	0.000427659
352505	0.001890755	0.000315228
354308	0.001669018	0.000320188
356112	0.001538957	0.0003119
357915	0.001595265	0.000287468
359719	0.001565494	0.000292042
361523	0.001888143	0.000234839
363326	0.001531886	0.000278857
365130	0.001743347	0.000236659
366933	0.001653142	0.000265736
368737	0.001805787	0.000219525
370541	0.001619399	0.000241955
372344	0.001703506	0.000238478
374148	0.001684731	0.000242494
375951	0.001694091	0.000234259
377755	0.001553913	0.000249211
379559	0.001779198	0.000234138
381362	0.001688491	0.000233097
383166	0.001559448	0.000253587

384969	0.001655518	0.000246985
386773	0.001783013	0.000231813
388577	0.00146674	0.000265623
390380	0.001559669	0.000252094
392184	0.001548435	0.000268325
393987	0.00165137	0.000259327
395791	0.001579717	0.000277457
397595	0.001504709	0.00028791
399398	0.001650113	0.000277465
401202	0.001624016	0.000295066
403006	0.001530718	0.00030496
404809	0.001632408	0.000290874
406613	0.001498104	0.00030666
408416	0.001825303	0.00028524
410220	0.001581379	0.000329692
412024	0.00156794	0.000337097
413827	0.001780219	0.00032131
415631	0.001597354	0.000340841
417434	0.001629031	0.000364554
419238	0.001701039	0.000326695
421042	0.001610558	0.000408936
422845	0.001710548	0.000408779
424649	0.001981991	0.000291558
426452	0.001535598	0.000461845
428256	0.001811332	0.000338685
430060	0.001738977	0.000369752
431863	0.002098643	0.000286014
433667	0.001678898	0.000420985
435470	0.00180313	0.000421915
437274	0.001752415	0.000397421
439078	0.001885465	0.000398926
440881	0.001912658	0.000521298
442685	0.001948224	0.000467995
444488	0.002144743	0.000520969
446292	0.001974266	0.000588792
448096	0.002052969	0.000572039
449899	0.002240469	0.000500322
451703	0.002432258	0.000294066
453507	0.002473397	0.000306143
455310	0.002489993	0.000122557
457114	0.00249973	0.000169607

458917	0.002540814	0.000110708
460721	0.002523486	0.000110997
462525	0.002513368	0.000111091
464328	0.00249592	0.000111136
466132	0.002480128	0.000111638
467935	0.002465278	0.000111903
469739	0.002452922	0.000112039
471543	0.00243772	0.000112326
473346	0.002418637	0.000112755
475150	0.002404484	0.000113042
476953	0.002385412	0.000113405
478757	0.002374921	0.000113629
480561	0.002358096	0.000113902
482364	0.002338876	0.000114427
484168	0.002326333	0.000114582
485971	0.002310256	0.00011498
487775	0.002293978	0.000115348
489579	0.002276114	0.000115812
491382	0.002259693	0.000116315
493186	0.002249577	0.000116318
494989	0.002230941	0.000116857
496793	0.002221282	0.000117022
498597	0.002200982	0.000117645
500400	0.002186291	0.000118027
502204	0.002171269	0.000118373
504008	0.002158822	0.000118713
505811	0.002144462	0.000119014
507615	0.002132126	0.000119324
509418	0.002117367	0.000119647
511222	0.002102334	0.00012015
513026	0.002087888	0.00012055
514829	0.002071857	0.000121025
516633	0.002056553	0.000121536
518436	0.002045397	0.000121676
520240	0.002030249	0.000122269
522044	0.002013797	0.000122726
523847	0.002002301	0.000123082
525651	0.00198917	0.00012343
527454	0.001974288	0.000123941
529258	0.001960842	0.000124407
531062	0.001950698	0.000124595

532865	0.001933548	0.000125238
534669	0.001923231	0.000125555
536472	0.00190907	0.000125926
538276	0.00189828	0.000126325
540080	0.001883094	0.000126906
541883	0.001875904	0.000126962
543687	0.001863132	0.000127492
545490	0.001854463	0.000127666
547294	0.001839874	0.00012824
549098	0.001827995	0.000128557
550901	0.001819349	0.000128743
552705	0.001805066	0.000129317
554509	0.001798641	0.00012944
556312	0.001788496	0.000129833
558116	0.001777222	0.000130094
559919	0.001768681	0.000130323
561723	0.001757124	0.000130795
563527	0.001745015	0.000131353
565330	0.001737892	0.000131308
567134	0.001724452	0.000131938
568937	0.001720432	0.000131833
570741	0.001705439	0.000132574
572545	0.001696596	0.000132865
574348	0.001687466	0.000133263
576152	0.001680217	0.000133372
577955	0.001670751	0.000133716
579759	0.001664056	0.000133822
581563	0.001655083	0.000134106
583366	0.001640754	0.000134794
585170	0.001637134	0.000134738
586973	0.00162493	0.000135383
588777	0.00161526	0.000135669
590581	0.001610941	0.000135731
592384	0.001602667	0.000136013
594188	0.00159272	0.000136389
595991	0.001584966	0.000136598
597795	0.00157825	0.000136829
599599	0.001566161	0.000137623
601402	0.001558442	0.000137739
603206	0.001550661	0.000137987
605010	0.001544401	0.000138173

606813	0.001533701	0.000138729
608617	0.001529479	0.000138726
610420	0.001514521	0.000139726
612224	0.001509754	0.000139779
614028	0.001496977	0.000140432
615831	0.001487946	0.000140955
617635	0.001480834	0.000141067
619438	0.001472464	0.000141513
621242	0.001464525	0.000141868
623046	0.001454861	0.000142357
624849	0.001444038	0.000142957
626653	0.001440491	0.000143024
628456	0.001434441	0.000143216
630260	0.001424689	0.00014384
632064	0.001414987	0.000144291
633867	0.001407768	0.000144764
635671	0.001396085	0.000145431
637474	0.001390807	0.000145688
639278	0.001383852	0.000145996
641082	0.001374253	0.000146623
642885	0.001364803	0.000146996
644689	0.001356069	0.000147615
646492	0.001347462	0.000148269
648296	0.001342733	0.000148397
650100	0.00133467	0.000148891
651903	0.001324596	0.000149649
653707	0.001313045	0.000150451
655511	0.001307193	0.000150766
657314	0.001299431	0.000151195
659118	0.001289399	0.000152059
660921	0.001282868	0.000152395
662725	0.001273697	0.000153018
664529	0.001265852	0.000153606
666332	0.001255927	0.000154338
668136	0.001248573	0.000154851
669939	0.001240569	0.000155439
671743	0.001231423	0.000156014
673547	0.001223824	0.000156741
675350	0.001216227	0.000157336
677154	0.001204294	0.000158246
678957	0.001195763	0.000159079

680761	0.001188094	0.000159622
682565	0.001178131	0.000160617
684368	0.001170836	0.000161154
686172	0.001162429	0.000161946
687975	0.001154672	0.0001627
689779	0.001144077	0.000163622
691583	0.001136143	0.00016443
693386	0.001127991	0.000165264
695190	0.001121114	0.00016575
696993	0.001110959	0.000166819
698797	0.00110302	0.000167633
700601	0.001091971	0.000168718
702404	0.00108228	0.000169645
704208	0.001076708	0.000170321
706012	0.001064437	0.00017169
707815	0.001056857	0.000172655
709619	0.001050209	0.000173262
711422	0.001039349	0.000174564
713226	0.001028823	0.000176078
715030	0.001021667	0.000176936
716833	0.001014747	0.000177557
718637	0.001003807	0.000178916
720440	0.00099379	0.000180314
722244	0.000989953	0.000180654
724048	0.000977122	0.000182585
725851	0.000969695	0.000183591
727655	0.00096068	0.000184739
729458	0.000953462	0.000185849
731262	0.000942558	0.000187181
733066	0.000937174	0.000187932
734869	0.000926896	0.000189595
736673	0.000918788	0.000190742
738476	0.000908774	0.000192438
740280	0.000900437	0.000193552
742084	0.000893314	0.000194725
743887	0.000883205	0.000196705
745691	0.000876789	0.000197601
747494	0.000867909	0.000199126
749298	0.000858043	0.000200803
751102	0.000849517	0.000202371
752905	0.000843406	0.000203488

754709	0.000833416	0.000205261
756513	0.000828002	0.000206301
758316	0.000820616	0.000207222
760120	0.000812283	0.000208856
761923	0.00080303	0.000210805
763727	0.000796887	0.000211991
765531	0.000788306	0.00021369
767334	0.000778757	0.000216117
769138	0.00076845	0.000218073
770941	0.000767719	0.000218062
772745	0.000757089	0.000220499
774549	0.000751734	0.000221773
776352	0.000745038	0.000223594
778156	0.000736907	0.000225245
779959	0.000727721	0.000226981
781763	0.000723652	0.000228187
783567	0.000715499	0.000230143
785370	0.00070496	0.000232844
787174	0.000701197	0.000234385
788977	0.000696067	0.000235145
790781	0.000688452	0.000237554
792585	0.000681484	0.000238931
794388	0.000674758	0.000240923
796192	0.000667884	0.000243272
797995	0.000663986	0.00024396
799799	0.001460568	0.000179777
801603	0.000653335	0.000246882
803406	0.000643437	0.000249772
805210	0.000639389	0.000251016
807014	0.000631902	0.000253265
808817	0.000627871	0.000254236
810621	0.000622298	0.00025596
812424	0.000615597	0.000258068
814228	0.000609582	0.000260363
816032	0.000603858	0.000261504
817835	0.000599021	0.000263942
819639	0.000593293	0.000265909
821442	0.000585368	0.000268423
823246	0.000581571	0.000269902
825050	0.000666318	0.000336158
826853	0.000572572	0.000272851

828657	0.000567214	0.000274715
830460	0.000563098	0.000275707
832264	0.0005549	0.000279078
834068	0.000552256	0.000280328
835871	0.000550675	0.000280635
837675	0.000543466	0.000283371
839478	0.000539274	0.000285477
841282	0.000534133	0.000287601
843086	0.000529191	0.000289446
844889	0.00052372	0.000292123
846693	0.000521899	0.000291551
848496	0.000518377	0.000293588
850300	0.00051555	0.000295148
852104	0.000510496	0.000296501
853907	0.000506716	0.000298594
855711	0.000500825	0.000301311
857515	0.000498172	0.000302356
859318	0.000496172	0.000303437
861122	0.000491654	0.000305132
862925	0.000488029	0.000307163
864729	0.000485044	0.000307828
866533	0.000482684	0.000309134
868336	0.000479029	0.000310411
870140	0.000474135	0.000312511
871943	0.000473443	0.000312887
873747	0.000469419	0.000314732
875551	0.000466954	0.000315275
877354	0.000463062	0.000317635
879158	0.000455503	0.000322288
880961	0.000455233	0.000321641
882765	0.000456844	0.000320285
884569	0.000450943	0.000323421
886372	0.000452075	0.000322651
888176	0.000448361	0.000323677
889979	0.000445239	0.000325888
891783	0.000443411	0.000327004
893587	0.000441216	0.000327966
895390	0.000440371	0.000327737
897194	0.000435667	0.000330779
898997	0.000434824	0.000331226
900801	0.000430905	0.00033252

902605	0.000427369	0.000334216
904408	0.000427072	0.000334622
906212	0.000425543	0.000335139
908016	0.000422765	0.000336696
909819	0.000420314	0.000337812
911623	0.000420213	0.000337227
913426	0.00041655	0.000339139
915230	0.000416454	0.000339348
917034	0.000415038	0.000339143
918837	0.000411368	0.000341925
920641	0.000410035	0.000342049
922444	0.000409004	0.000342824
924248	0.000405866	0.000343903
926052	0.000405236	0.000344226
927855	0.000402318	0.000345906
929659	0.000401081	0.000346367
931462	0.000399585	0.000347269
933266	0.000398538	0.000346163
935070	0.000397513	0.000348205
936873	0.0003955	0.000348675
938677	0.00039516	0.000348672
940480	0.000393766	0.000348909
942284	0.000393162	0.000349012
944088	0.000390508	0.000350223
945891	0.000390995	0.000349047
947695	0.000387564	0.000350891
949498	0.000386547	0.000351569
951302	0.000387625	0.000350694
953106	0.000385711	0.000351247
954909	0.000385822	0.000351188
956713	0.000382721	0.000352162
958517	0.000383367	0.000351831
960320	0.000383106	0.000350575
962124	0.000380545	0.000352837
963927	0.000378177	0.000353472
965731	0.000379679	0.000351447
967535	0.000378417	0.00035275
969338	0.000377228	0.000353582
971142	0.000376759	0.000351865
972945	0.000374833	0.000354073
974749	0.000374836	0.000353475

976553	0.000374615	0.000353369
978356	0.000373816	0.00035283
980160	0.000372359	0.00035398
981963	0.000372002	0.000353845
983767	0.000371419	0.000352814
985571	0.000371114	0.000352976
987374	0.000368415	0.000354846
989178	0.000369255	0.000353897
990981	0.000367948	0.000354431
992785	0.000366092	0.000355218
994589	0.000367553	0.000353588
996392	0.000367601	0.000352552
998196	0.000364858	0.000354525
1000000	0.000364613	0.000360468

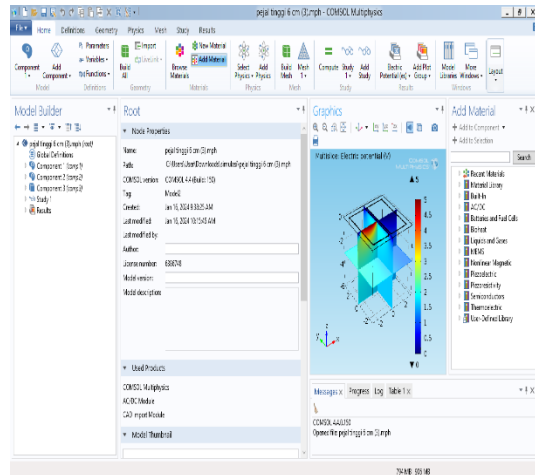
LAMPIRAN C
GAMBAR ALAT DAN BAHAN

Lampiran C. Gambar Alat dan Bahan

C.1 Alat



Gambar C.1 Komputer



Gambar C.2 Comsol *Multiphysics* 4.4



Gambar C.3 Ampelas



Gambar C.4 *Cutter*



Gambar C.5 *Hairdryer*



Gambar C.6 Mesin *Laser Cutting*



Gambar C.7 Libre VNA



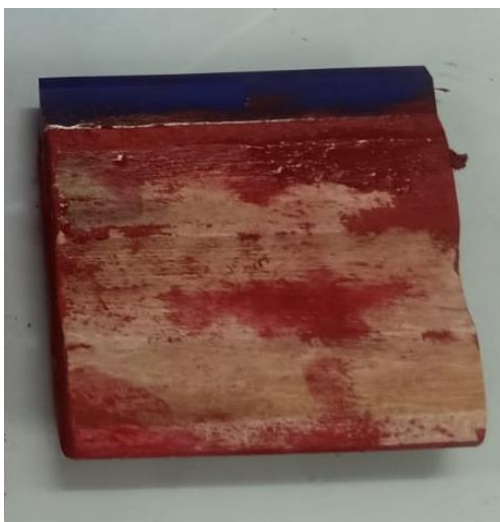
Gambar C.8 Mesin Bor



Gambar C.9 Mikrometer Digital



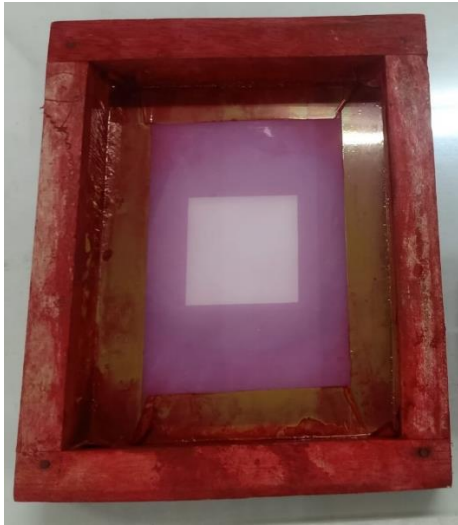
Gambar C.10 Penggaris



Gambar C.11 Rakel



Gambar C.12 Spatula



Gambar C.13 *Screen Sablon*



Gambar C.14 *Solder*

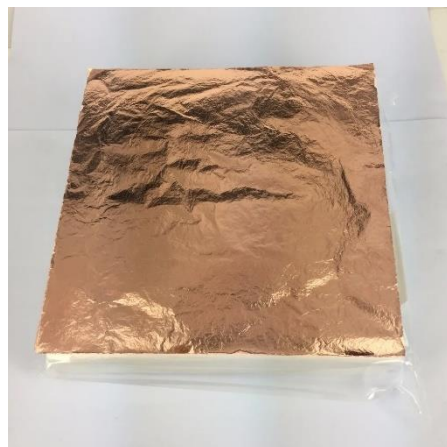


Gambar C.15 *Wadah Plastik*

C.2 Bahan



Gambar C.16 *Akrilik*



Gambar C.17 *Foil Tembaga*



Gambar C.18 Kabel Konektor



Gambar C.19 Konektor *Female* BNC



Gambar C.20 Konektor *Male* BNC



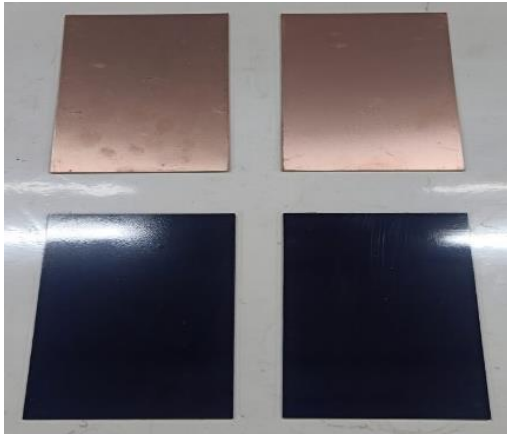
Gambar C.21 Larutan HCL dan H₂O₂



Gambar C.22 Larutan M3



Gambar C.23 Lem Akrilik



Gambar C.24 Printed Circuit Board (PCB)



Gambar C.25 Pylox Cleaner



Gambar C.26 Pylox Hitam



Gambar C.27 Resistor



Gambar C.28 Timah



Gambar C.29 Tinta Sablon