

**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>Cmsol 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.

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>