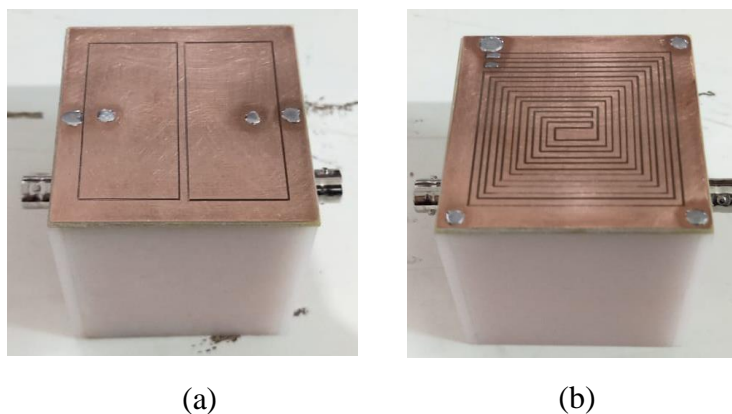


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

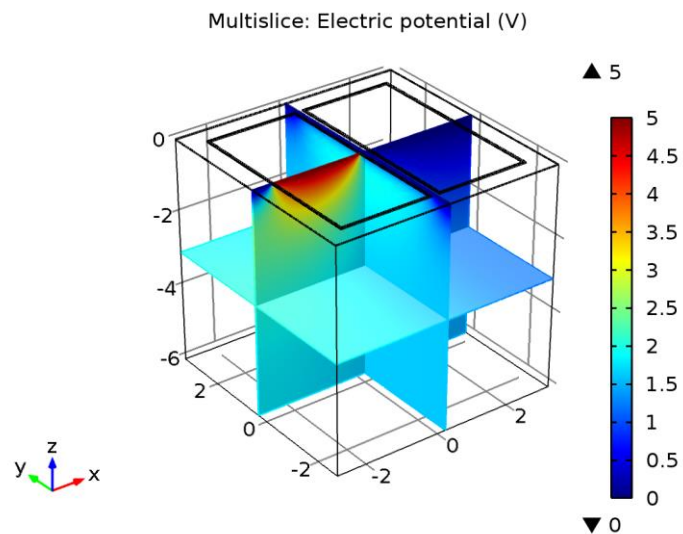
Pada bab ini akan dibahas hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai desain sensor kapasitif model kotak dan spiral untuk mengukur ketebalan lapisan. Sebelum melakukan fabrikasi sensor, hal yang dilakukan adalah membuat desain serta simulasi sensor kapasitif menggunakan *software COMSOL Multiphysics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



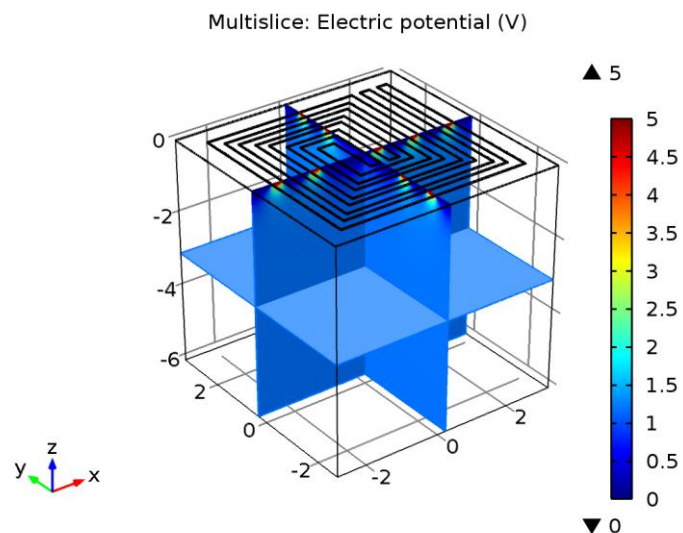
Gambar 4.1 Sensor Kapasitif Model (a) Kotak dan (b) Kotak Spiral

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



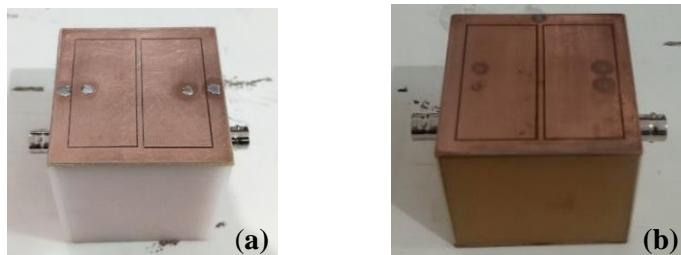
Gambar 4.3 Medan listrik pada Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

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

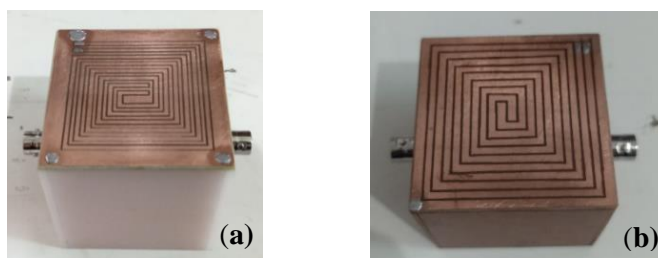
dipilih untuk mengetahui sifat dari desain sensor ketika diberi medan listrik karena pada dasarnya setiap bahan memiliki karakteristik yang berbeda-beda [30].

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



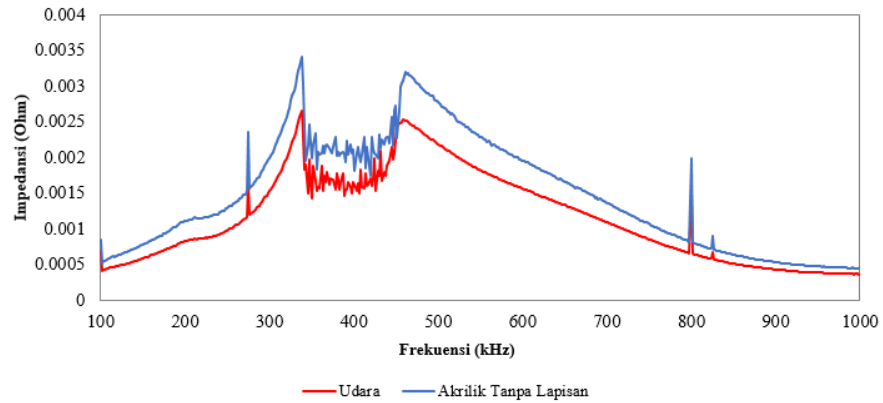
Gambar 4.5 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (a) Tipe 1 dan (b) Tipe 2

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.

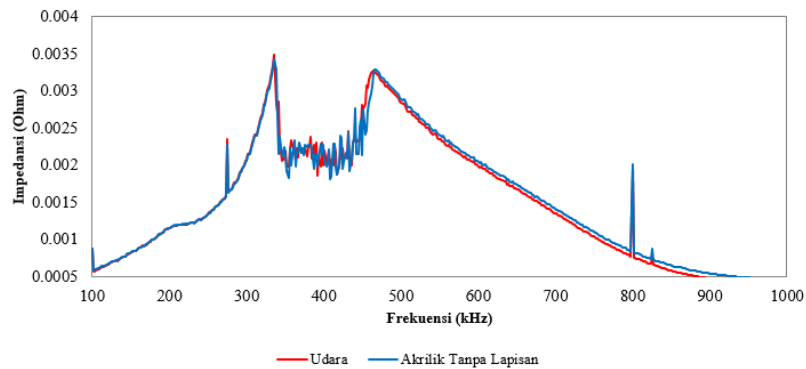
4.2.1 Sensor Kapasitif Model Kotak terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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 fluktuaktif 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



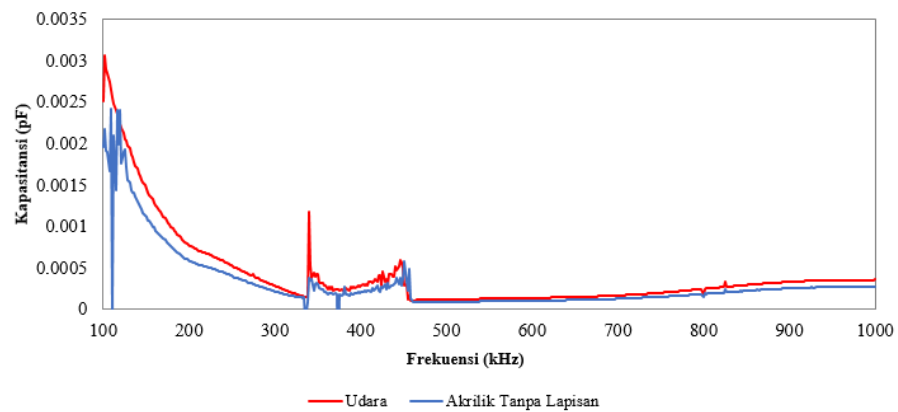
Gambar 4.7 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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

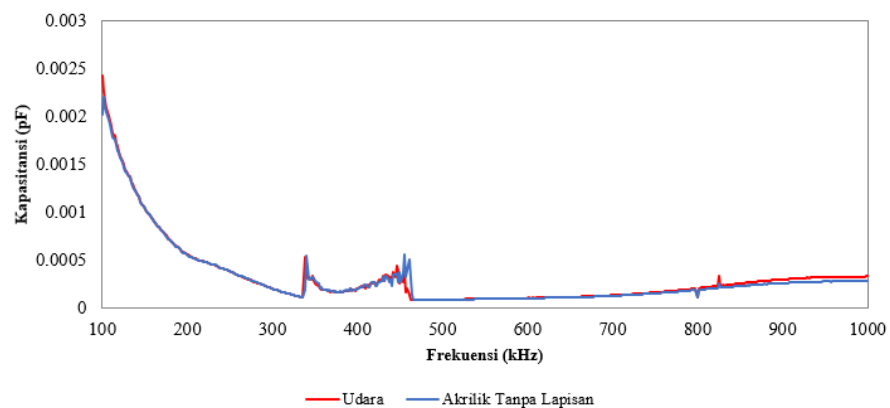
mengukur benda uji yang memiliki nilai konstanta dielektrik [17]. Hasil karakterisasi mengidentifikasi bahwa kedua sensor tersebut dapat mengukur perubahan impedansi yang diterima ketika mengganti benda uji udara dengan akrilik tanpa lapisan.

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

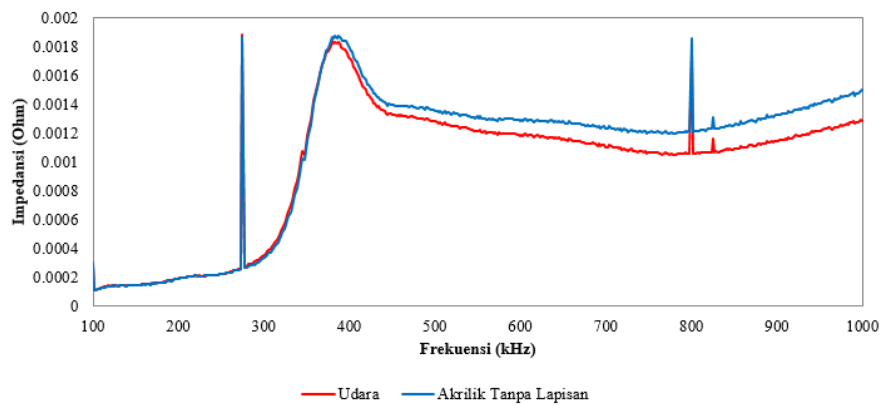
Berdasarkan data yang diperoleh diketahui bahwa kedua sensor tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji udara dan akrilik tanpa lapisan. Jika dibandingkan antara grafik impedansi dan kapasitansi kedua sensor kapasitif cenderung sama hal tersebut dipengaruhi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

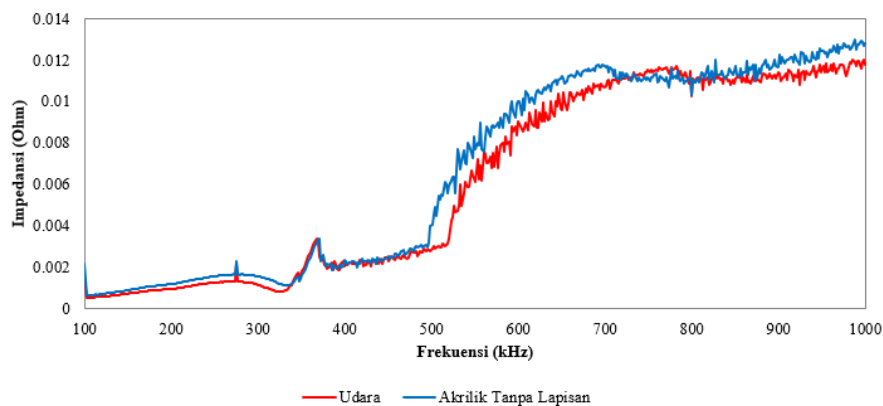
4.2.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

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

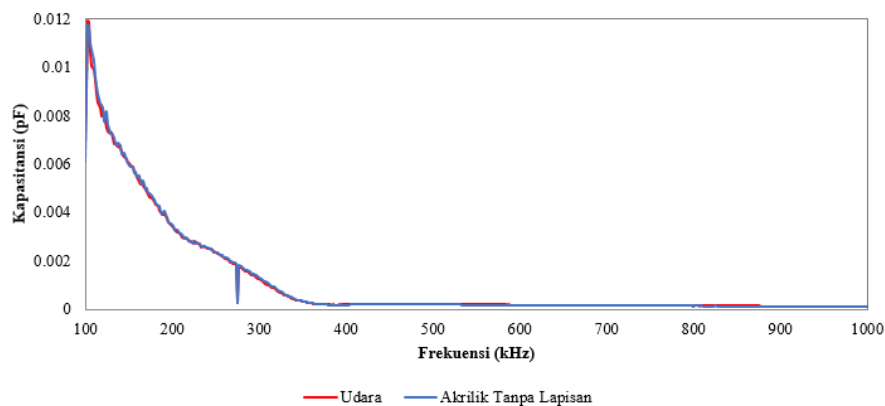


Gambar 4.11 Grafik Karakterisasi Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Udara dan Akrilik Tanpa Lapisan

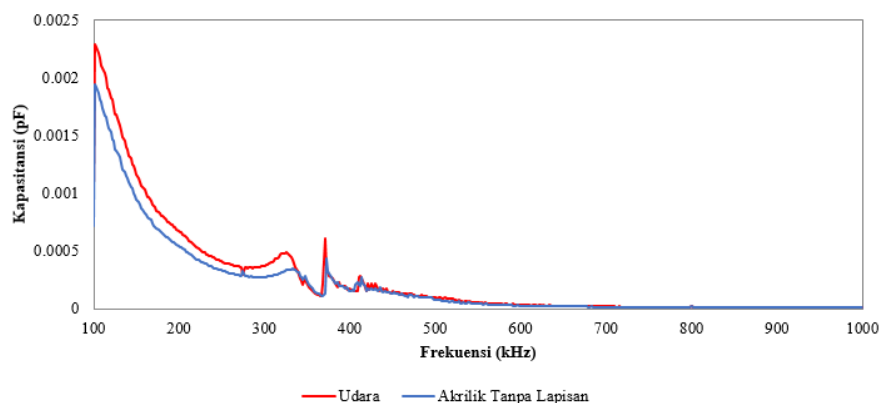
Rata-rata impedansi udara yang diperoleh dari sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) sebesar $9,70 \times 10^{-4} \Omega$, sedangkan impedansi akrilik tanpa lapisan sebesar $1,05 \times 10^{-3} \Omega$. Sementara itu, sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 2) memiliki rata-rata impedansi udara 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].

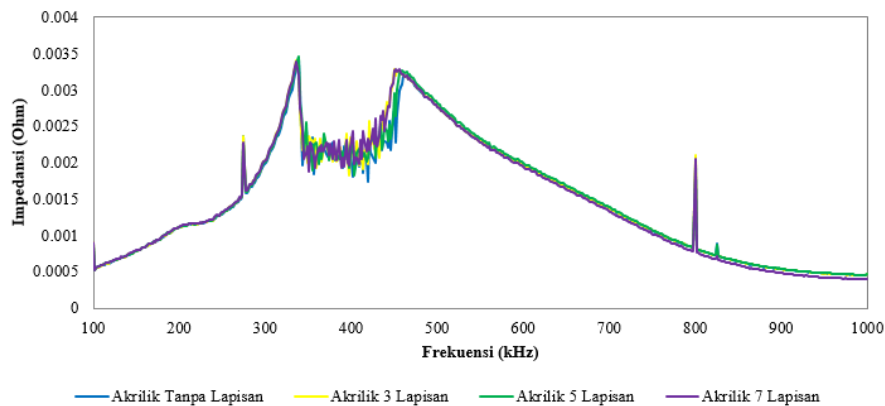
4.3 Uji Performa Sensor Kapasitif

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*.

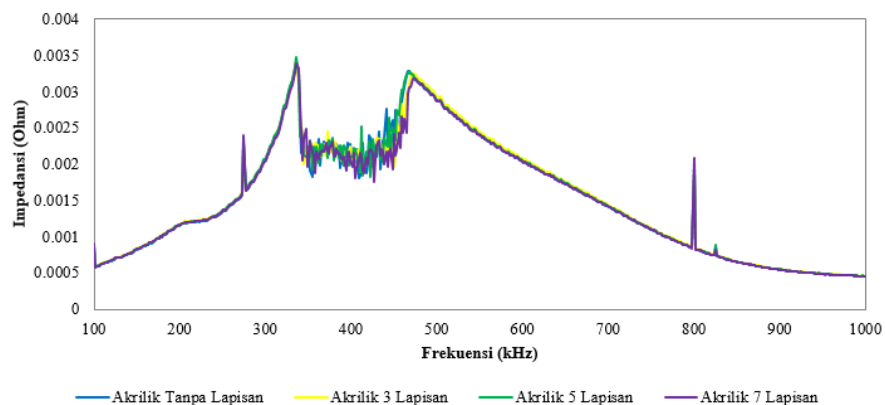
4.3.1 Sensor Kapasitif Model Kotak

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.



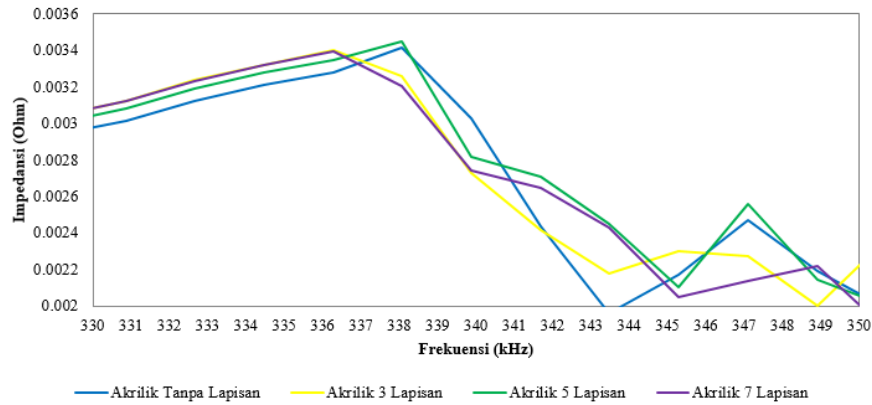
Gambar 4.14 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Type 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



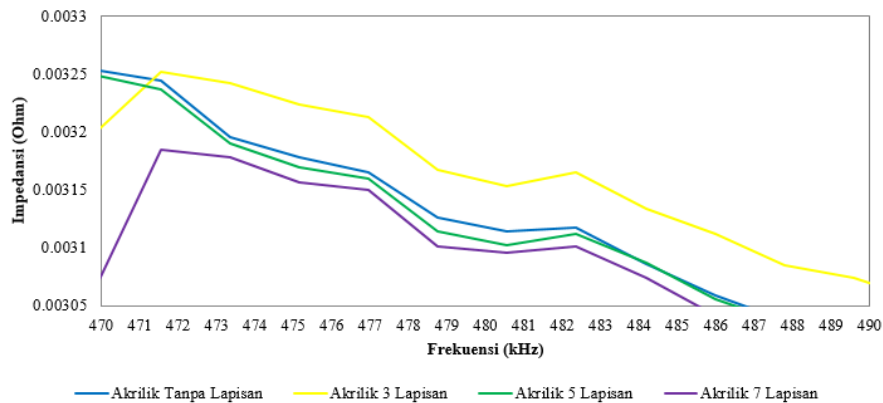
Gambar 4.15 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak (Type 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

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 (m²)

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:

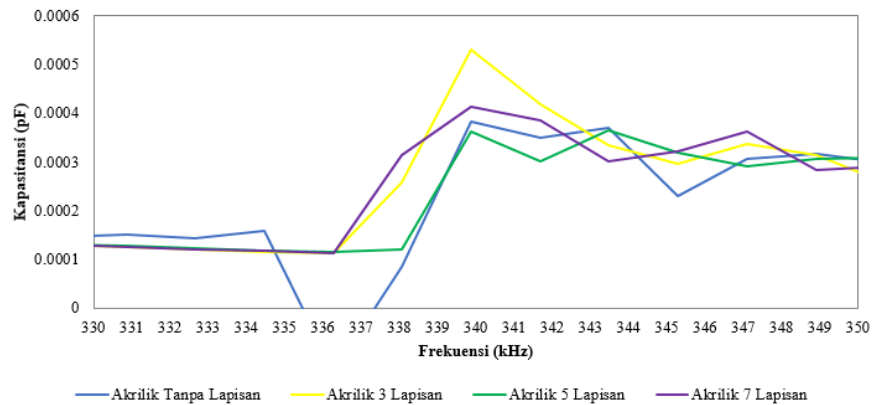
σ = Standar deviasi

x_i = Setiap nilai dari data

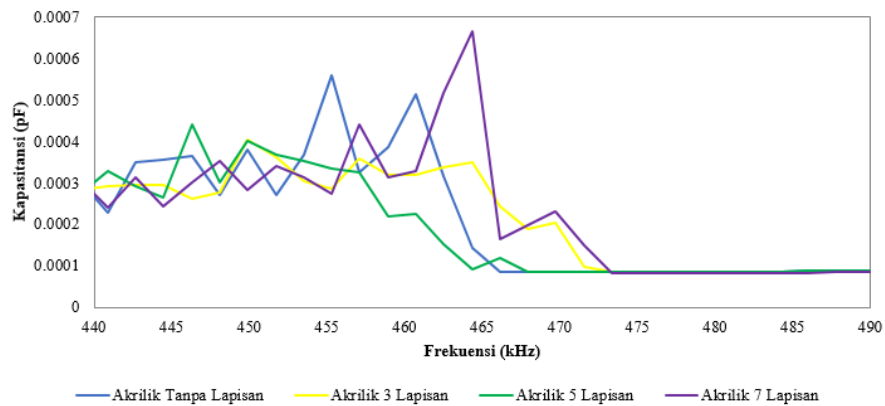
μ = Rata-rata data

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

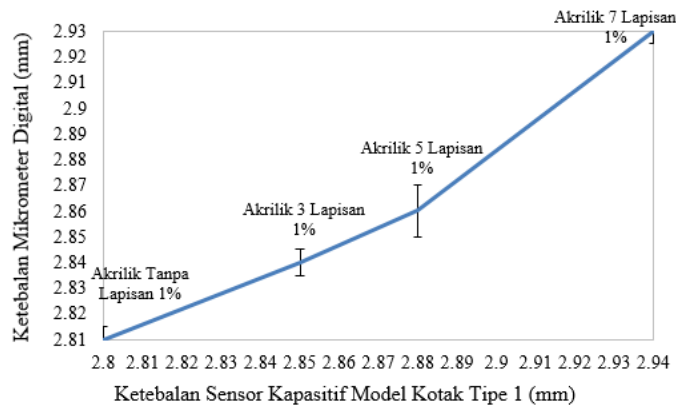
Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 4.1, pada sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan 2,80 mm, akrilik 3 lapisan 2,85 mm, akrilik 5 lapisan 2,88, dan akrilik 7 lapisan 2,94 mm. Sedangkan, nilai ketebalan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

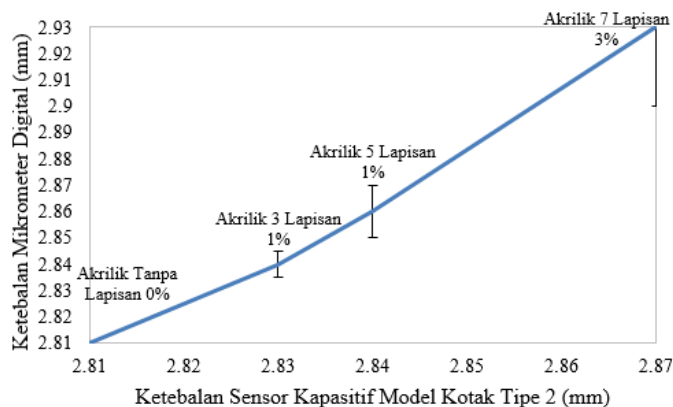
Tabel 4.1 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak
(Tipe 1) dan (Tipe 2)

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)

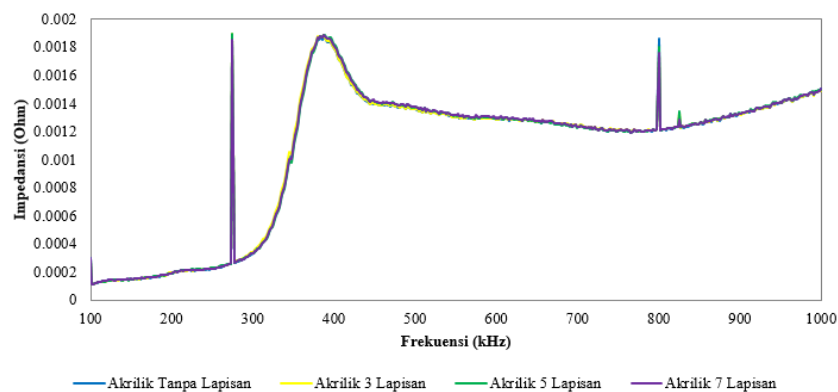
Berdasarkan data yang diperoleh, diketahui bahwa sensor kapasitif model kotak (Tipe 1) dan (Tipe 2) tersebut dapat mendeteksi perubahan impedansi dan kapasitansi yang terjadi pada benda uji akrilik tanpa lapisan, akrilik 3 lapisan, akrilik 5 lapisan, dan akrilik 7 lapisan. Kedua sensor dapat mengukur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

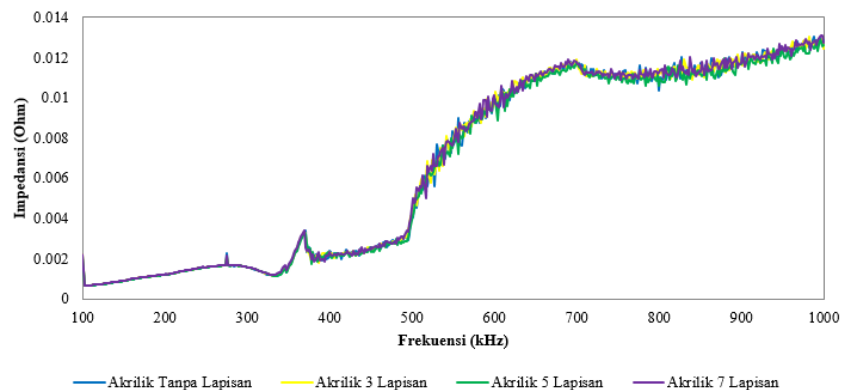
4.3.2 Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral

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 $4,12 \times 10^{-3} \Omega$.

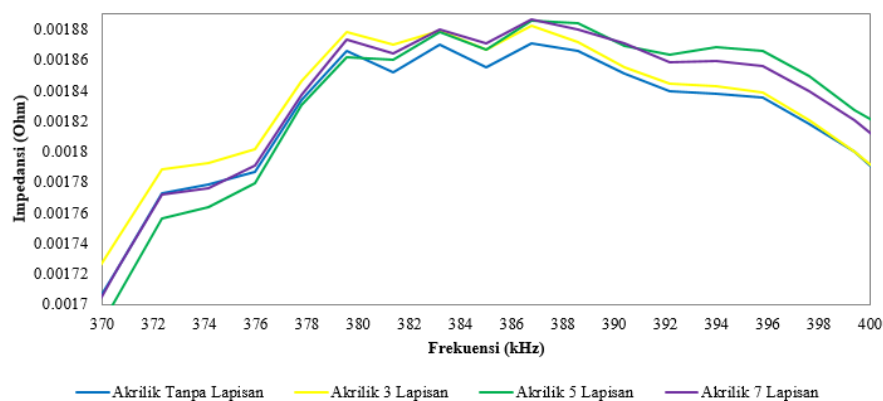


Gambar 4.22 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

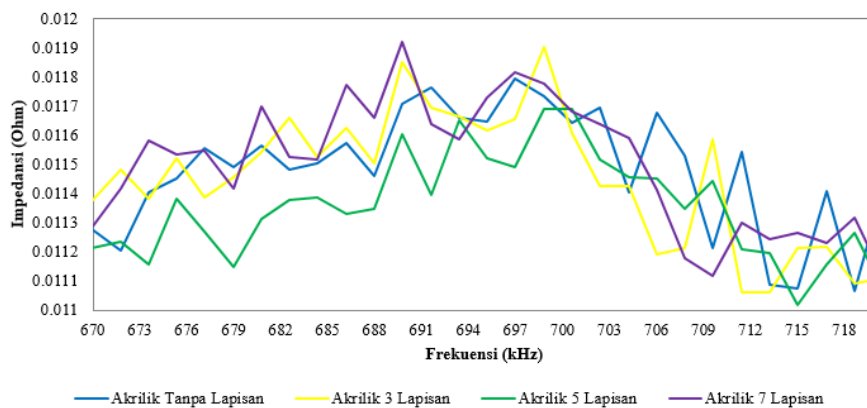


Gambar 4.23 Grafik Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

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.



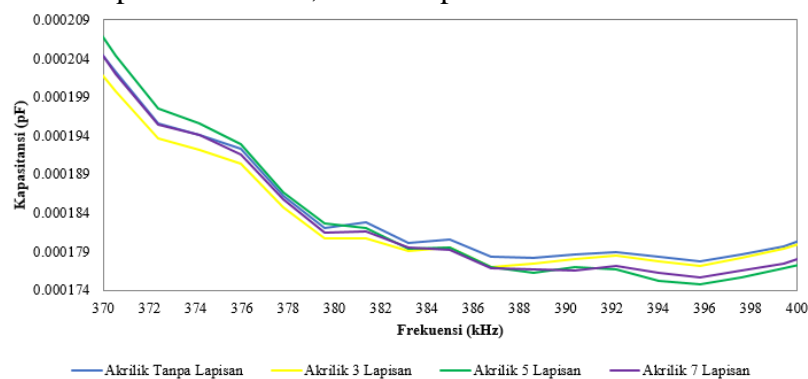
Gambar 4.24 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan



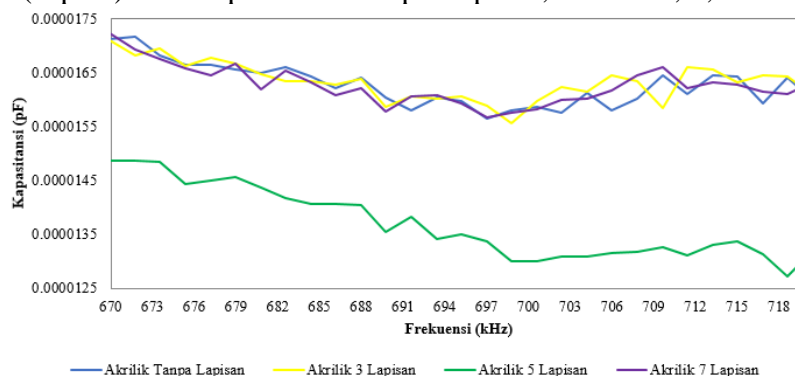
Gambar 4.25 Grafik Normalisasi Uji Performa Impedansi Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 2) terhadap Akrilik Tanpa Lapisan, Akrilik 3, 5, dan 7 Lapisan

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

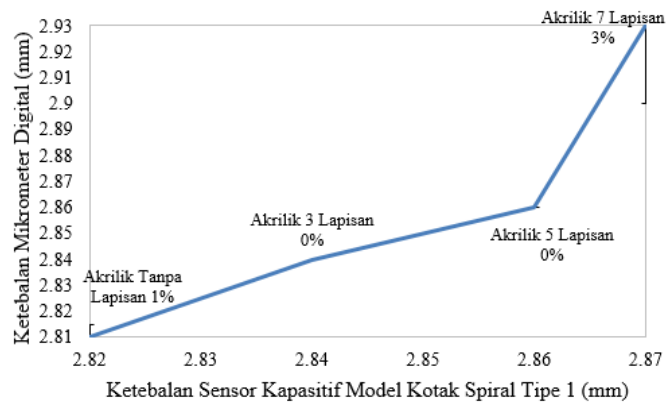
Adapun nilai ketebalan lapisan yang didapatkan berdasarkan nilai rata-rata kapasitansi dapat dilihat pada Tabel 4.2, pada sensor kapasitif model kotak spiral (Tipe 1) terhadap akrilik tanpa lapisan adalah 2,82 mm, akrilik 3 lapisan 2,84 mm, akrilik 5 lapisan 2,86 mm, dan akrilik 7 lapisan 2,87 mm. Sedangkan,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

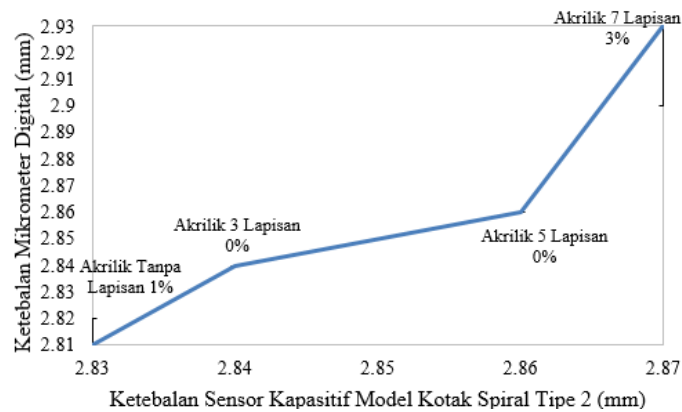
Tabel 4.2 Hasil Ketebalan Sensor Kapasitif Model Kotak Spiral (Tipe 1) dan (Tipe 2)

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.