

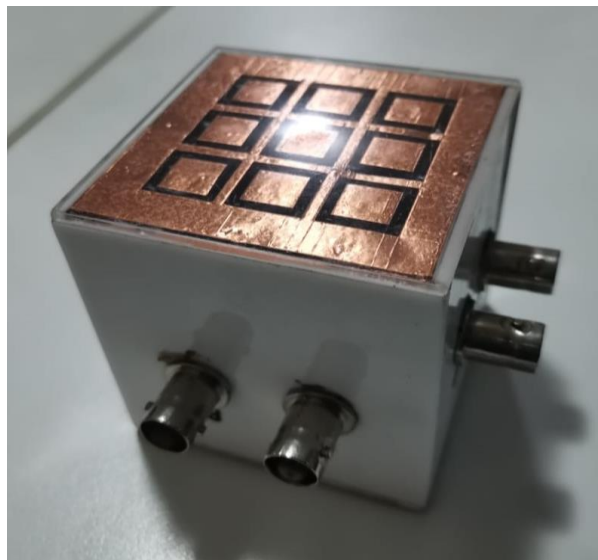
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, dihasilkan data penelitian yang dapat diolah dan dianalisis lebih lanjut. Data yang diperoleh dari penelitian dengan menggunakan alat osiloskop dan generator sinyal didapatkan nilai tegangan terukur pada masing-masing pasangan elektroda serta dengan alat *Vector Network Analyzer* (VNA) didapatkan nilai *log magnitude* dan *phase* untuk sensor dengan variasi udara, akrilik, 1 lapisan dan 3 lapisan. Pada bab ini akan ditampilkan berupa data-data hasil penelitian menggunakan alat osiloskop, generator sinyal, VNA dan hasil pengolahan sensor optimal. Hasil eksperimen kemudian akan dibandingkan dengan literatur yang menunjang penelitian ini.

4.1 Desain Sensor Kapasitif 9 Channel

Desain sistem sensor kapasitif 9 *channel* dibuat dengan ukuran sensor dengan panjang 6 cm, lebar 6 cm dan tinggi 6 cm. Ukuran elektroda pada sensor yaitu 1 cm x 1 cm. Prototipe hasil pembuatan sensor kapasitif 9 *channel* dapat dilihat pada Gambar 4.1.



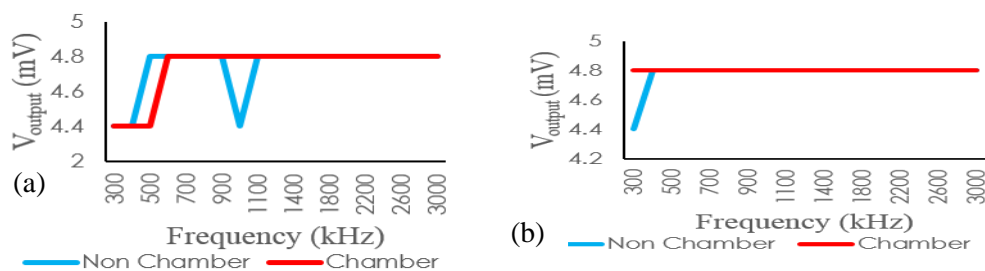
Gambar 4.1 Prototipe Sensor Kapasitif 9 Channel

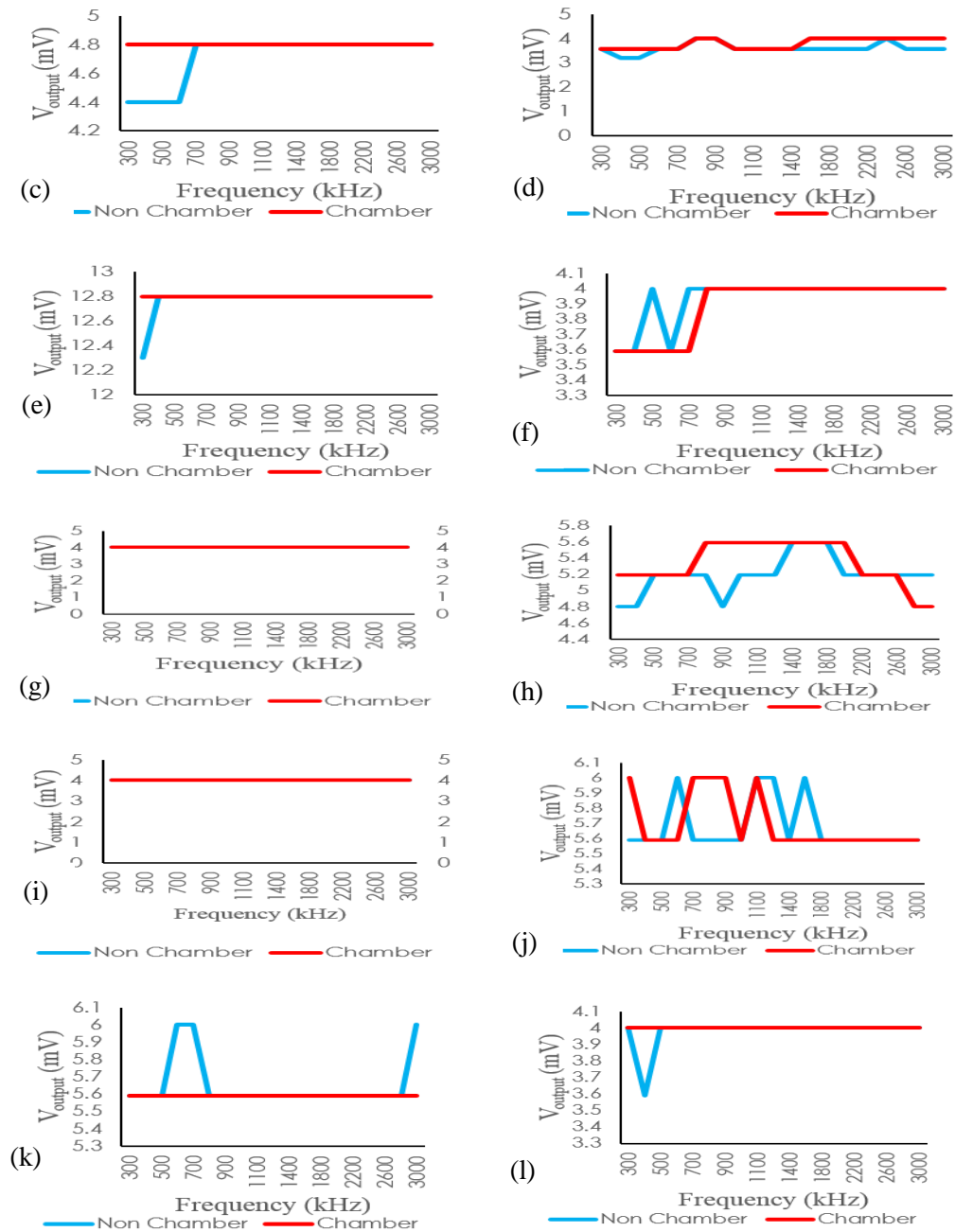
4.2 Karakterisasi Sensor Kapasitif

Proses karakterisasi bertujuan untuk mengetahui frekuensi kerja dan tegangan yang dihasilkan oleh sensor, sehingga sinyal optimum yang bekerja berdasarkan konsep kapasitif, diaplikasikan untuk uji performa sensor. Proses pengukuran tegangan pada sensor dilakukan dengan menggunakan alat osiloskop dan generator fungsi. Osiloskop digunakan untuk melihat sinyal yang diterima oleh sensor, sedangkan generator fungsi untuk memberi tegangan input pada sensor. Tegangan input yang digunakan yaitu sebesar 20V serta pada frekuensi 300 kHz – 3 MHz. Pengukuran tegangan sensor dilakukan pada temperatur ruang tanpa benda uji (udara dan sensor dengan *chamber*) serta akrilik.

Pengukuran tegangan sensor kapasitif dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor yang telah dibuat. Pengukuran tegangan sensor untuk mengetahui kinerja sensor terhadap pengaruh variasi frekuensi *input*, amplitudo dan penggunaan *chamber* yang digunakan terhadap tegangan *output* yang dihasilkan oleh sensor. Penggunaan *chamber* dapat mempengaruhi pola respon terhadap tegangan, hal ini dikarenakan *chamber* dapat mencegah keluar masuknya udara. *Chamber* yang digunakan berbahan akrilik dengan dilapisi *copper foil*.

Hasil pengukuran dengan osiloskop berupa tegangan terukur yang mana pengukuran yang dilakukan tanpa menggunakan *chamber*, tegangan di setiap peningkatan frekuensi nilainya fluktuasi. Berbeda pengukuran tegangan dengan menggunakan *chamber*, sebagian besar pada pasangan elektroda nilai tegangan terukur tidak mengalami fluktuatif. Hal ini bisa disebabkan karena jarak elektroda yang ditempatkan tidak sesuai atau tidak pada posisi yang telah di desain sehingga dapat memengaruhi pada hasil pengukurannya. Dampak dari hal tersebut tegangan terukur pada pasangan elektroda 3-6 mendapatkan nilai tegangan melebihi rata-rata dari pasangan elektroda sensor lainnya.





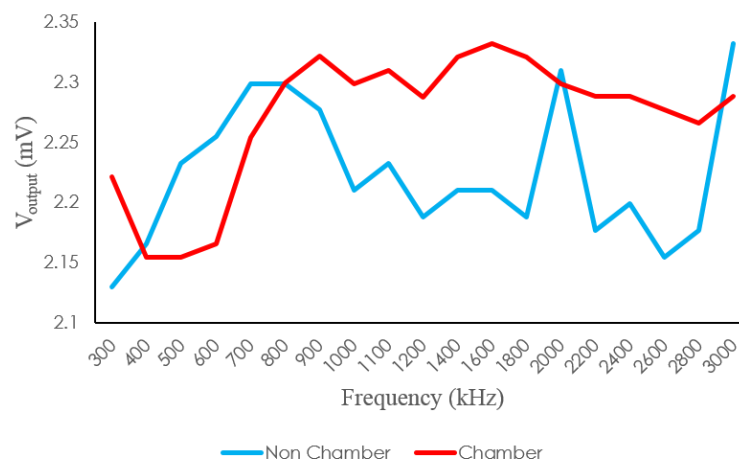
Gambar 4.2 Karakterisasi Sensor dengan Udara setiap Pasangan Elektroda

(a) 1-2 (b) 1-4 (c) 2-3 (d) 2-5 (e) 3-6 (f) 4-5 (g) 4-7 (h) 5-6 (i) 5-8 (j) 6-9 (k) 7-8
(l) 8-9

Pada gambar 4.2, nilai tegangan terukur yang diperoleh masing-masing pasangan elektroda paling rendah adalah 4 mV. Jika jarak antara elektroda semakin besar, maka densitas arus yang mengalir ke sensor semakin menurun. Apabila jarak

elektroda 2 kali dari semula atau jarak terdekatnya maka densitas arus yang akan mengalir yaitu $\frac{1}{4}$ dari terdekatnya (Andri, 2015).

Setiap pasangan elektroda terdekat seperti pada Gambar 4.2, terdapat nilai tegangan terukur yang hampir berbeda dibandingkan dengan pasangan elektroda terdekat lainnya yaitu pasangan elektroda (e) 3-6. Nilai tegangan terukur terendah yang diperoleh pada pasangan elektroda (e) untuk yang menggunakan *chamber* 12,8 mV dan tanpa *chamber* 12,3 mV. Hal ini terjadi karena pada pemasangan elektroda 3 dengan elektroda 6 jarak antara elektroda sangat berdekatan dibandingkan dengan elektroda yang lain. Oleh karena itu, sebagian pengukuran tegangan yang menggunakan *chamber* terdapat nilai yang fluktuatif seperti pada pasangan elektroda 5-6 dan 6-9. Pada pasangan elektroda (e) 3-6 yang terjadi karena nilai tegangan terukur yang diperoleh sangat berbeda dibandingkan dengan pasangan elektroda lainnya. Dengan mempertimbangkan fluktuasi pada pasangan elektroda 3-6, dibuat grafik untuk melihat seberapa pengaruhnya pasangan elektroda tersebut terhadap pasangan elektroda lainnya. Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 merupakan rata-rata nilai tegangan seluruh pasangan elektroda di setiap frekuensi.

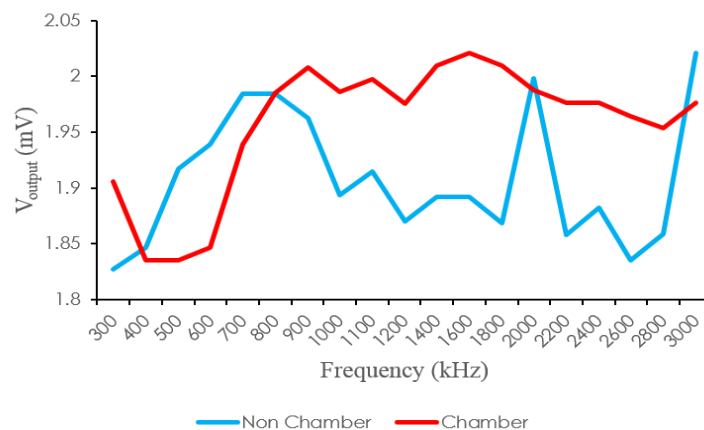


Gambar 4.3 Rata-rata Nilai Tegangan Seluruh Pasangan Elektroda di Setiap Frekuensi

Gambar 4.3, tegangan pada pengujian tanpa *chamber* di frekuensi 300 – 700 kHz mengalami kenaikan dari 2,13 mV menjadi 2,3 mV, lalu mengalami penurunan hingga frekuensi 1200 kHz menjadi 2,19 mV dan kenaikan tegangan lagi pada

frekuensi 2000 kHz dan 3000 kHz sebesar 2,31 mV dan 2,33 mV. Nilai tegangan yang menggunakan *chamber*, mengalami kenaikan signifikan pada frekuensi 600 – 900 kHz sebesar 2,17 mV menjadi 2,32 mV dan pada frekuensi 900 – 3000 kHz mengalami fluktuatif yang relatif stabil. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran sensor dengan rata-rata tegangan terukur yang dengan pasangan elektroda 3-6 menggunakan *chamber* lebih baik dibandingkan tanpa yang menggunakan *chamber* karena dapat mengurangi terjadinya *noise* seperti gangguan udara atau getaran pada meja kerja ketika melakukan pengukuran.

Selanjutnya dilakukan perbandingan rata-rata tegangan seluruh pasangan elektroda di setiap frekuensi tanpa pasangan elektroda 3-6. Nilai dari hasil pengukuran yang dilakukan tanpa menggunakan *chamber* menunjukkan bahwa pada frekuensi 300 – 700 kHz mengalami kenaikan tegangan dari 1,83 mV menjadi 1,96 mV, lalu tegangan mengalami penurunan hingga 1200 kHz menjadi sebesar 1,87 mV dan mengalami kenaikan kembali pada frekuensi 2000 kHz dan 3000 kHz sebesar 2 mV dan 2,02 mV. Untuk nilai tegangan rata-rata menggunakan *chamber* mengalami kenaikan yang signifikan di frekuensi 600 – 900 kHz sebesar 1,85 mV menjadi 2,01 mV, pada frekuensi 900 – 3000 kHz tegangan rata-rata mengalami fluktuatif yang relatif stabil. Nilai rata-rata tegangan seluruh pasangan elektroda di setiap frekuensi tanpa pasangan elektroda 3-6 dapat dilihat pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Rata-rata Nilai Tegangan Seluruh Pasangan Elektroda di Setiap Frekuensi Tanpa Pasangan Elektroda 3-6

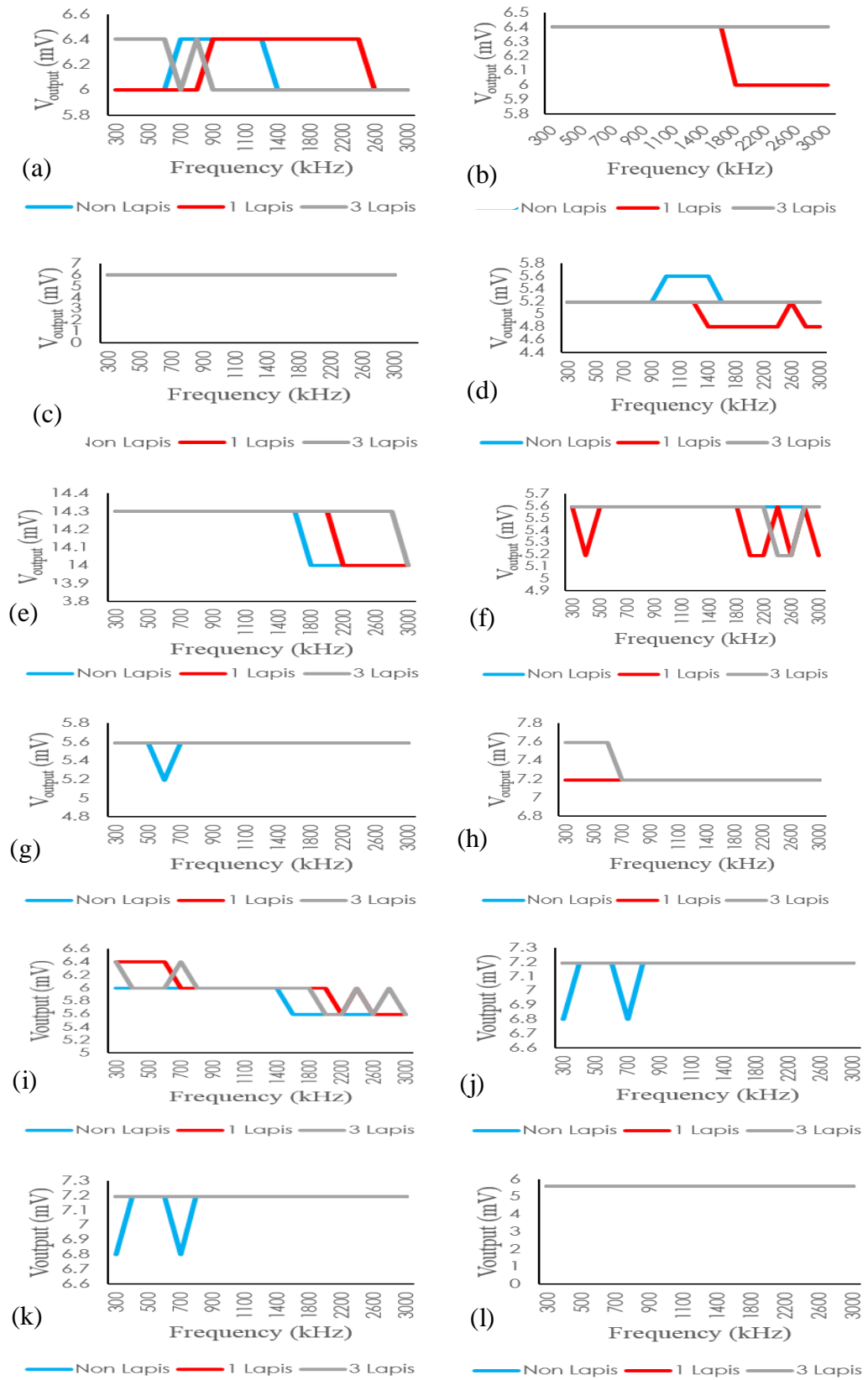
Dapat disimpulkan pada Gambar 4.3 dan 4.4 bahwa nilai rata-rata tegangan tanpa pasangan elektroda 3-6 dan dengan pasangan elektroda 3-6 memiliki *trendline* atau pergerakan grafik dalam suatu *frame* yang sama. Gambar 4.4 di frekuensi 300 kHz memiliki nilai tegangan untuk non chamber dan chamber sebesar 1,83 mV dan 1,91 mV dan pada frekuensi 3000 kHz sebesar 2,02 mV dan 1,98 mV.. Dari kedua gambar grafik tersebut percobaan yang dilakukan dengan menggunakan *chamber* menghasilkan nilai tegangan rata-rata yang tidak fluktuatif. Penggunaan *chamber* ini dilakukan untuk menghindari terjadinya *noise* atau gangguan-gangguan pada saat dilakukan pengukuran seperti udara, gangguan getaran pada meja, debu serta pencahayaan.

4.3 Uji Performa Sensor

Uji performa sensor dilakukan untuk mengetahui kinerja sensor yang telah dibuat dan digunakan. Adapun benda uji yang digunakan yaitu berupa akrilik dengan variasi tanpa lapisan, 1 lapisan dan 3 lapisan cat. Alat yang digunakan uji performa sensor yaitu osiloskop, generator fungsi serta VNA. Tegangan input untuk alat generator fungsi sebesar 20V, sedangkan frekuensi yang digunakan pada generator fungsi maupun VNA adalah 300 kHz – 3 MHz.

4.3.1 Karakterisasi Sensor dengan alat Osiloskop dan Generator Fungsi

Hasil nilai tegangan yang paling tinggi didapatkan dari masing-masing variasi berada pada pasangan elektroda 3-6 dengan nilai 14,3 mV. Hasil karakterisasi dapat dilihat pada Gambar 4.5. Pada Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa hasil uji performa sensor dari pasangan elektroda dengan beberapa variasi lapisan *coating* menghasilkan tegangan *output* terukur yang berbeda karena benda uji akrilik yang diberikan. Untuk variasi yang diberikan yaitu akrilik non lapis, 1 dan 3 lapis cat. Variasi lapisan cat sangat mempengaruhi hasil dari pengukuran sensor yang dilakukan. Hasil yang diperoleh pada pengukuran mendapatkan nilai tegangan lebih besar dibandingkan pada saat pengukuran tegangan sensor dengan udara. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik hasil pengukuran yang didapatkan untuk setiap pasangan elektroda pada gambar 4.5.

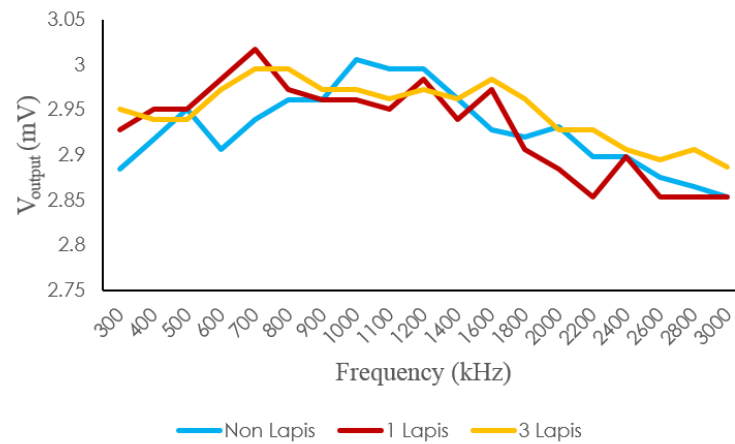


Gambar 4.5 Nilai karakterisasi tiap variasi untuk pasangan elektroda (a) 1-2 (b) 1-4 (c) 2-3 (d) 2-5 (e) 3-6 (f) 4-5 (g) 4-7 (h) 5-6 (i) 5-8 (j) 6-9 (k) 7-8 (l) 8-9

Tabel 4.1 Tegangan terukur pasangan elektroda seluruh variasi lapisan cat

Pasangan Elektroda	Tegangan terukur (mV)
(a)1-2	6 – 6,4
(b)1-4	6 – 6,4
(c)2-3	6
(d)2-5	4,8 – 5,6
(e)3-6	14 – 14,3
(f)4-5	5,2 – 5,6
(g)4-7	5,2 – 5,6
(h)5-6	7,2 – 7,6
(i)5-8	5,6 – 6,4
(j)6-9	7,6 – 8
(k)7-8	6,8 – 7,2
(l)8-9	5,6

Pada hasil pengukuran tegangan sensor dengan variasi *coating* yang diberikan dari setiap pasangan elektroda terdapat beberapa nilai tegangan dari pasangan elektroda yang mengalami penurunan seiring dengan bertambah nilai frekuensi yang diberikan. Hal tersebut sesuai dengan literatur bahwa frekuensi berbanding terbalik dengan nilai kapasitansi sedangkan kapasitansi berbanding lurus dengan tegangan (Sidi, Pahlanop and Arman, 2020). Adapun nilai tegangan dari setiap variasi yang dilakukan, pada variasi 3 lapisan cat menghasilkan nilai rata-rata tegangan terukur paling besar. Hal tersebut diasumsikan karena penambahan jumlah lapisan cat yang akan meningkatkan nilai tegangan pada ketebalan benda uji. Adapun untuk nilai rata-rata tegangan dari seluruh pasangan elektroda dengan variasi yang diberikan dapat dilihat pada Gambar 4.6



Gambar 4.6 Rata-rata Nilai Tegangan Seluruh Pasangan Elektroda di Setiap Frekuensi dengan Variasi *Coating*

Pada Gambar 4.6 menunjukkan perubahan nilai rata-rata tegangan, untuk frekuensi 300 – 1200 kHz dari setiap variasi *coating* nilai rata-rata tegangan mengalami kenaikan, setelah melewati frekuensi 1200 kHz nilai rata-rata tegangan seluruh pasangan elektroda mengalami penurunan nilai tegangan. Dapat dilihat juga untuk variasi 1 lapis dengan 3 lapis pada frekuensi 800 – 1100 kHz nilai rata-rata tegangan relatif stabil tidak mengalami fluktuatif.

4.3.2 Karakterisasi Sensor dengan Alat *Vector Network Analyzer* (VNA)

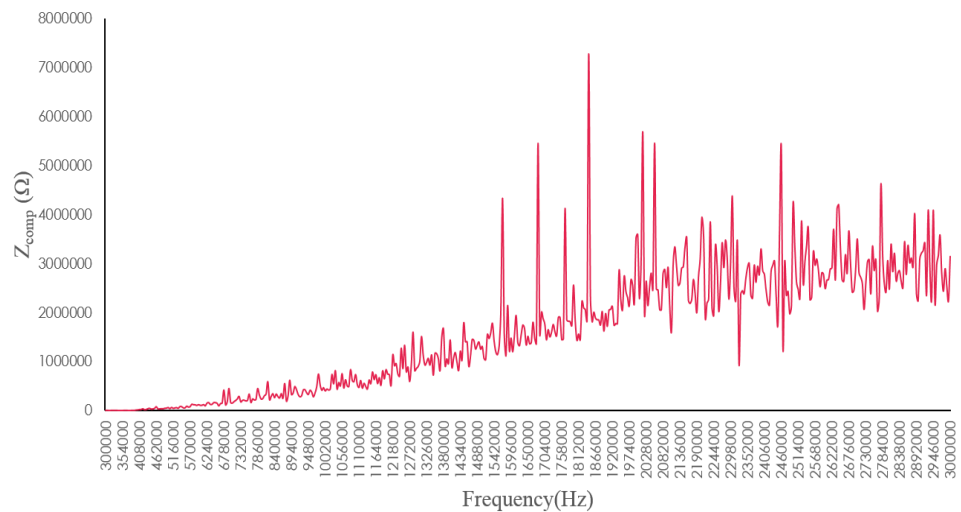
Setelah mendapatkan nilai kapasitansi dari setiap masing-masing pasangan elektroda untuk setiap variasi, lalu nilai kapasitansi tersebut dimasukkan ke dalam *script Google Collab* untuk mendapatkan hasil grafik dari pengukuran menggunakan VNA. Pengolahan data VNA untuk mendapatkan nilai kapasitansi dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai S21. S21 merupakan rasio daya yang keluar dari *port 2* dan daya yang masuk ke *port 1* atau sumber dari perangkat dua port. Rumus untuk perhitungan S21:

$$10^{\left(\frac{\text{Log Magnitude}}{20}\right)} \dots\dots\dots(4.1)$$

Selanjutnya, pengolahan data VNA untuk mendapatkan kapasitansi dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai impedansi kompleks dengan rumus :

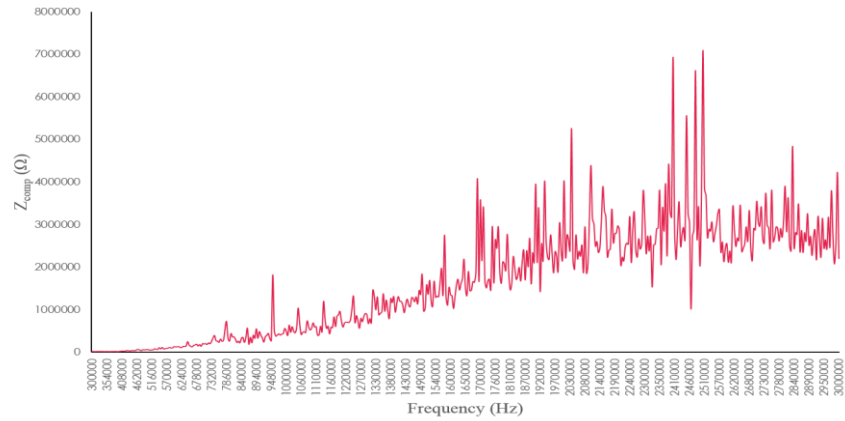
$$Z_{comp} = (100 \times \left(\frac{1-S_{21}}{S_{21}} \right)) \dots\dots\dots(4.2)$$

Perhitungan untuk mencari nilai impedansi kompleks dilakukan untuk seluruh pasangan elektroda di setiap variasi yang berikan. Hasil perhitungan nilai impedansi kompleks terhadap frekuensi ditampilkan pada Gambar 4.7.

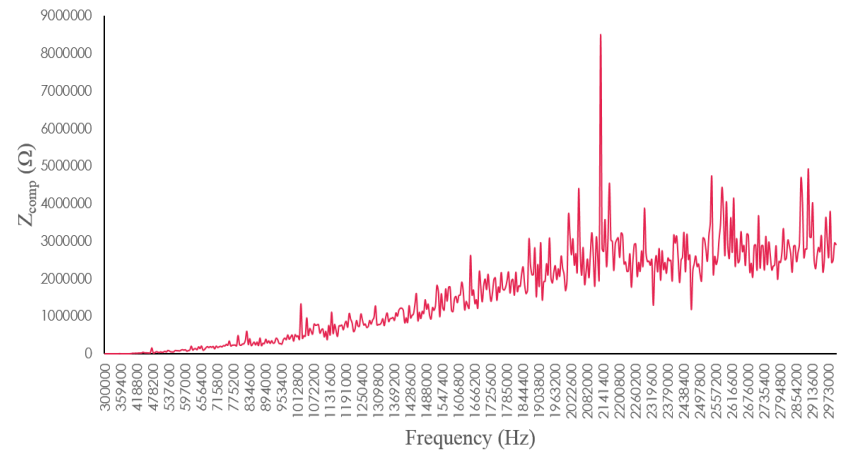


Gambar 4.7 Grafik Impedansi kompleks terhadap Frekuensi (udara)

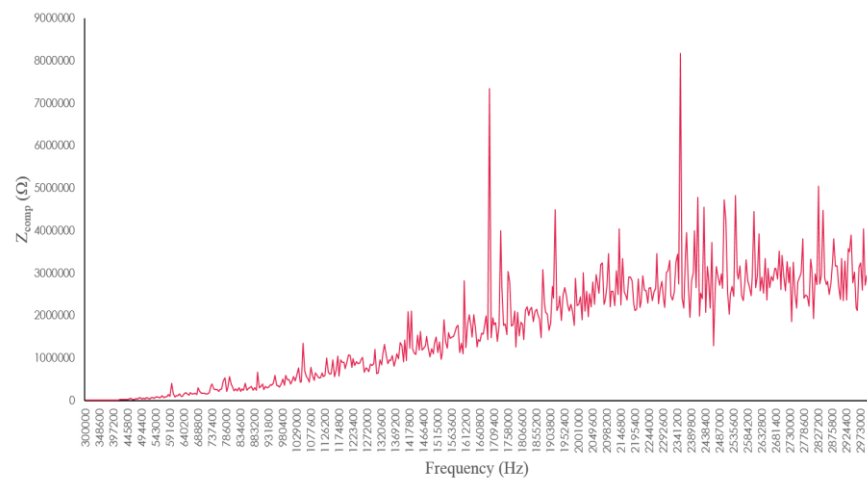
Gambar 4.7 menunjukkan nilai impedansi kompleks dari rata-rata nilai seluruh pasangan elektroda di setiap frekuensi (300 kHz hingga 3 MHz). Pada frekuensi 300 kHz hingga 2 MHz mengalami kenaikan nilai impedansi. Pada frekuensi 2,1 MHz nilai impedansi mulai stabil, hingga frekuensi 3 MHz relatif stabil. Impedansi disebut juga resistansi atau hambatan yang dipengaruhi oleh adanya perbedaan tegangan dan fasa. Nilai impedansi kompleks menunjukkan adanya stabilitas yang dihasilkan. Grafik impedansi kompleks untuk variasi non lapis, 1 dan 3 lapis *coating* mengalami hal serupa yaitu setelah frekuensi 2 MHz nilai impedansi kompleks relatif stabil. Grafik impedansi kompleks setiap variasi *coating* dapat dilihat pada Gambar 4.8 hingga 4.10.



Gambar 4.8 Impedansi Kompleks terhadap Frekuensi untuk Sampel Akrilik Tanpa Lapisan Cat



Gambar 4.9 Grafik Impedansi Kompleks terhadap Frekuensi untuk Sampel Akrilik 1 Lapisan Cat

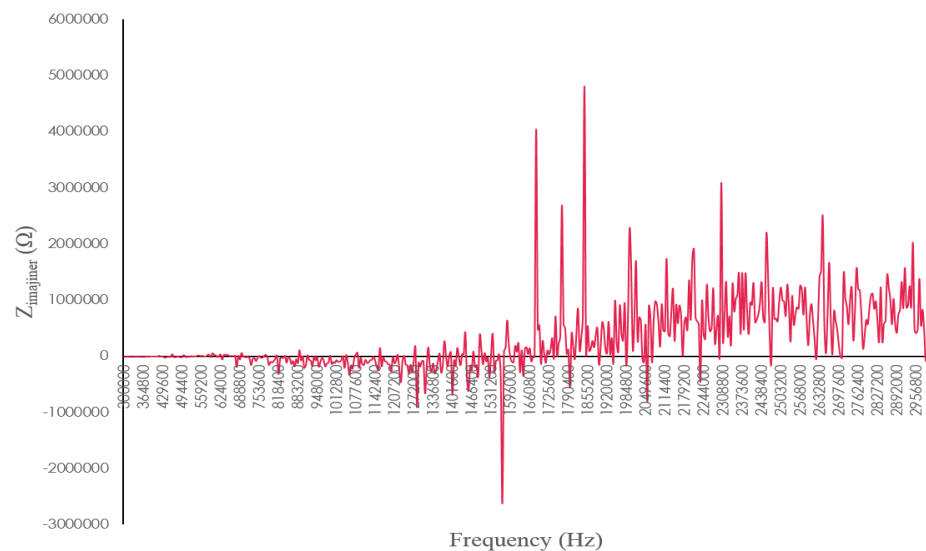


Gambar 4.10 Grafik Impedansi kompleks terhadap Frekuensi untuk Sampel Akrilik 3 Lapisan Cat

Impedansi imajiner merupakan suatu besaran fisika yang bertujuan untuk menyimpan energi. Impedansi imajiner lebih sering dijumpai untuk jenis sensor kapasitif. Untuk mendapatkan nilai kapasitansi pada pengolahan data VNA, perlu digunakan rumus terlebih dahulu untuk mencari nilai impedansi imajiner. Rumus:

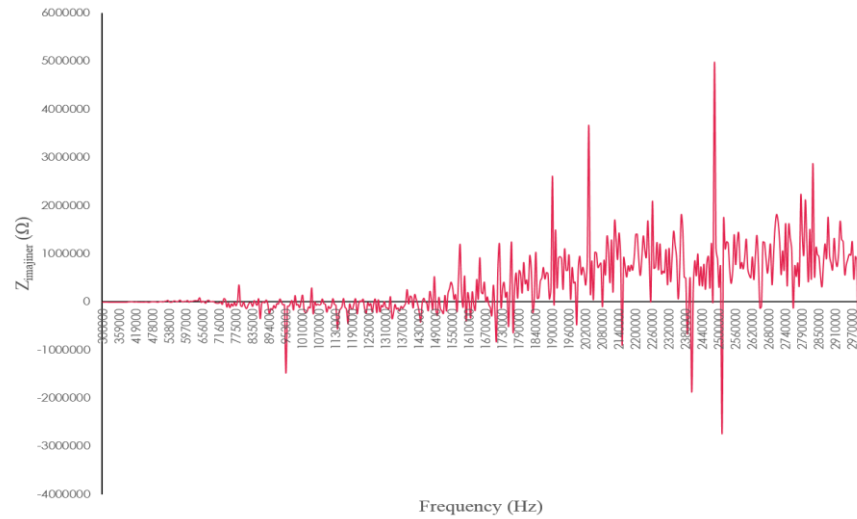
$$Z_{Imaj} = Z_{Comp} \times \sin(\text{Radians}(\text{phase})) \dots\dots\dots(4.3)$$

Perhitungan nilai impedansi imajiner dilakukan seluruh pasangan elektroda dengan setiap variasi yang diberikan. Grafik antara impedansi imajiner terhadap fungsi frekuensi menggambar nilai penyimpanan energi listrik dalam muatan-muatan listrik dan kemudian ditangkap oleh permukaan dari masing-masing elektroda. Gambar 4.11 merupakan nilai impedansi imajiner rata-rata seluruh pasangan elektroda di setiap frekuensi.

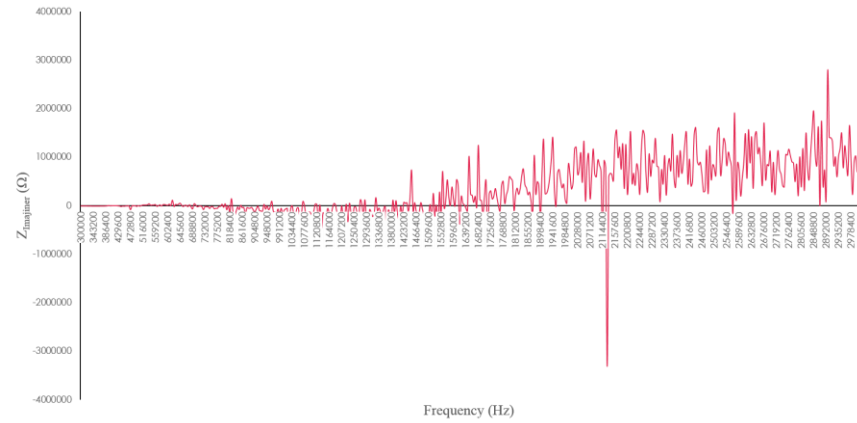


Gambar 4.11 Grafik Impedansi imajiner terhadap Frekuensi (udara)

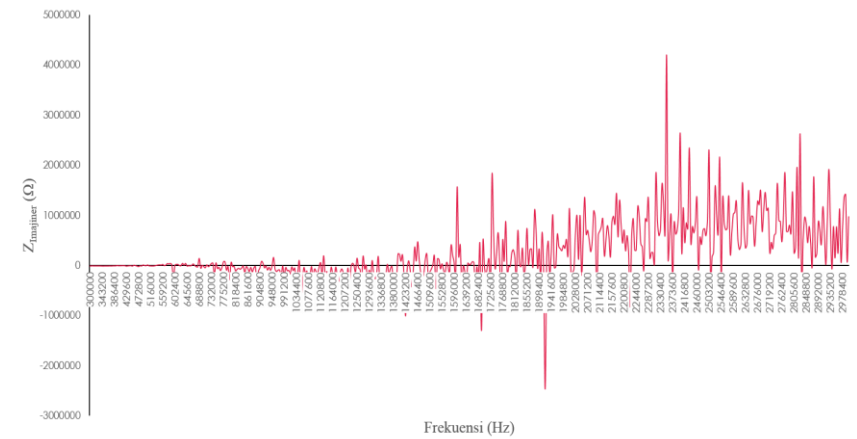
Gambar 4.11 merupakan nilai impedansi imajiner rata-rata dari seluruh pasangan elektroda terhadap frekuensi. Pada grafik tersebut bahwa nilai impedansi paling rendah berada pada frekuensi 1,569 MHz sebesar $-2,6 \times 10^6 \Omega$ dan nilai impedansi paling besar pada frekuensi 1,844 MHz sebesar $4,8 \times 10^6 \Omega$. Untuk nilai impedansi imajiner di setiap variasi dapat dilihat pada Gambar 4.12 hingga Gambar 4.14.



Gambar 4.12 Grafik Impedansi Imajiner terhadap Frekuensi untuk Sampel Akrilik Tanpa Lapisan Cat



Gambar 4.13 Grafik Impedansi Imajiner terhadap Frekuensi untuk Sampel Akrilik 1 Lapisan Cat



Gambar 4.14 Grafik Impedansi Imajiner terhadap Frekuensi untuk 3 Lapisan Cat

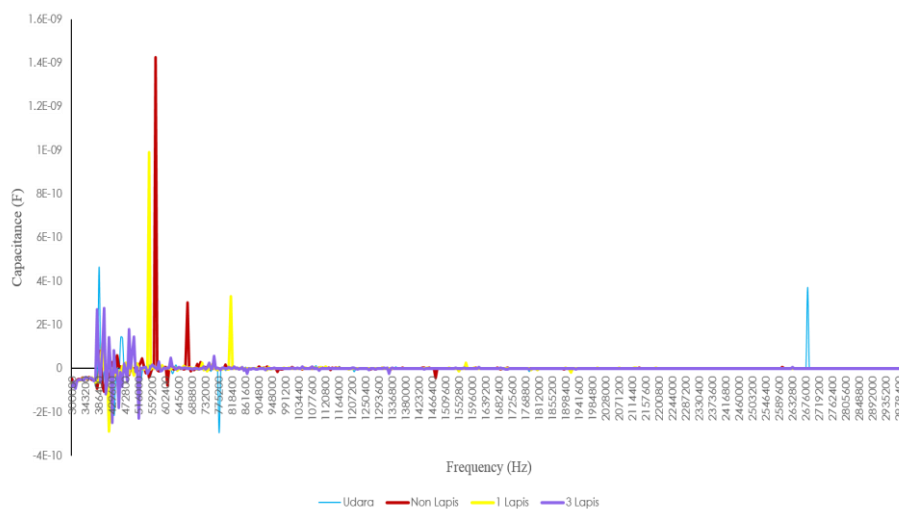
4.2 Tabel Nilai Impedansi Imajiner setiap variasi lapisan cat

Impedansi Imajiner	Frekuensi (MHz)		Ohm (Ω)	
	Rendah	Tinggi	Rendah	Tinggi
Udara	1,57	1,84	$-2,6 \times 10^6$	$4,8 \times 10^6$
Tanpa Lapisan Cat	2,51	2,48	$-2,7 \times 10^6$	$4,8 \times 10^6$
1 Lapisan Cat	2,13	2,89	$-3,3 \times 10^6$	$2,77 \times 10^6$
3 Lapisan Cat	1,92	2,35	$-2,5 \times 10^6$	$4,2 \times 10^6 \Omega$

Dari gambar grafik 4.11 hingga 4.14 menunjukkan bahwa impedansi imajiner memiliki perubahan nilai yang menunjukkan kestabilan. Setelah mendapatkan nilai impedansi kompleks dan imajiner, dapat diperoleh nilai kapasitansi dengan menghitung menggunakan rumus :

$$C = \frac{1}{(2 \times 3,14 \times \text{Frekuensi} \times \text{Zimaginer})} \dots\dots\dots(4.4)$$

Penghitungan nilai kapasitansi juga dilakukan pada seluruh pasangan elektroda dan di setiap variasi. Konsep pengukuran utama menggunakan alat VNA untuk mendapatkan nilai kapasitansi sensor berdasarkan jarak, bahan dielektrik dan luas permukaan. Grafik nilai kapasitansi dari setiap variasi dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Nilai Kapasitansi terhadap Frekuensi untuk Setiap Variasi



Gambar 4.16 Kapasitansi terhadap Seluruh Pasangan Elektroda

Dapat dilihat pada Gambar 4.16 bahwa karakteristik sinyal pada frekuensi 2,1 MHz bahwa nilai kapasitansi paling besar, yaitu berada pada nilai 8 pF di ketebalan *coating* 2,56 mm. Rumus untuk mencari nilai ketebalan dengan menghubungkan nilai kapasitansi yaitu:

$$d = \frac{e \times e^0 \times A}{C} \dots\dots\dots(4.5)$$

e : Konstanta dielektrik (udara = 1)

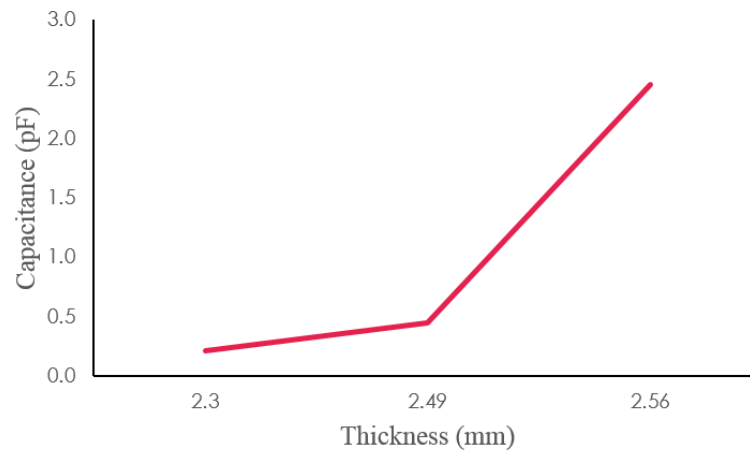
e^0 : Permitivitas ruang hampa = $8,854 \times 10^{-12}$ (F/m)

A : Luas penampang (m^2) = 0,6 m x 0,6 m

C : Kapasitansi (Farad)

Tabel 4.3 Nilai Permitivitas Material

Jenis Bahan/Material	Konstanta (k)
Akrilik (<i>fiberglass</i>)	2,7 – 4,5
Udara	1
Ruang Hampa	$8,854 \times 10^{-12}$ (F/m)
Polyurethane	4



Gambar 4.17 Nilai Kapasitansi sensor terhadap Ketebalan objek pada Frekuensi 2,1 MHz

Pada Gambar 4.17 dapat dilihat bahwa untuk grafik yang tertera pada frekuensi 2103,6 kHz melalui pencarian data akrilik bahwa pada kolom 334 nilai frekuensi yang dihasilkan yaitu 2103,6 kHz. Nilai sensor merupakan nilai rata-rata dari pengukuran semua pasangan elektroda pada frekuensi tertentu. Adapun untuk nilai pada ketebalan 2,30 mm (non lapis) memiliki nilai kapasitansi 0,2 pF, adapun untuk ketebalan 2,49 mm (1 lapis) memiliki nilai kapasitansi 0,4 pF dan 2,56 mm (3 lapis) memiliki nilai kapasitansi sebesar 2,5 pF. Pembagian dari setiap frekuensi yang dilakukan dari 300 – 3000 kHz maka frekuensi dengan nilai kapasitansi sesuai kriteria terdapat pada frekuensi 2103,6 kHz. Perbandingan pengukuran nilai ketebalan secara perhitungan langsung menggunakan mikrometer sekrup dan secara pengolahan data VNA dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan Nilai Ketebalan Akrilik

Jenis Sampel	Pengukuran (mm)	Pengolahan VNA (mm)
Non Lapis	2,19	2,30
1 Lapis	2,30	2,49
3 Lapis	2,39	2,56

Pada Tabel 4.4 nilai ketebalan akrilik yang diperoleh dengan pengukuran mikrometer sekrup berdasarkan pada akrilik yang telah divariasikan. Pada

variasi akrilik tanpa lapisan pengukuran yang diperoleh yaitu 2,19 mm karena sampel yang digunakan tanpa adanya lapisan cat pada akrilik tersebut. Untuk variasi 1 lapisan cat diperoleh pengukuran sebesar 2,30 mm atau bertambah 0,11 mm, ukuran ketebalan bertambah karena adanya 1 lapisan cat pada sampel. Pada variasi 3 lapisan cat diperoleh pengukuran sebesar 2,39 mm atau bertambah 0,20 mm dari akrilik tanpa lapisan cat, ketebalan ini bertambah karena akrilik dilakukan 3 kali penambahan lapisan cat. Jika membandingkan nilai ketebalan pada pengukuran menggunakan mikrometer sekrup dengan hasil pengukuran pengolahan data VNA, untuk setiap nilai benda uji yang di variasi lapisan cat yaitu untuk akrilik tanpa lapisan berbeda 0,21 mm, lalu 1 lapisan cat berbeda 0,19 mm dan ketebalan 3 lapisan cat berbeda 0,17 mm.