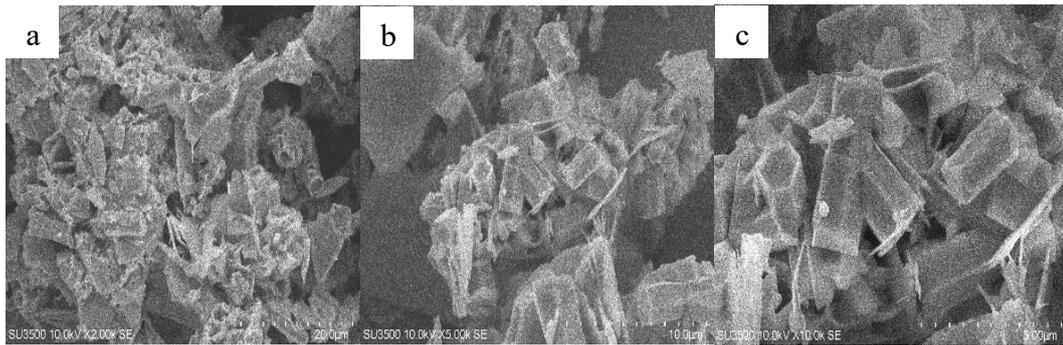


BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi SEM-EDS

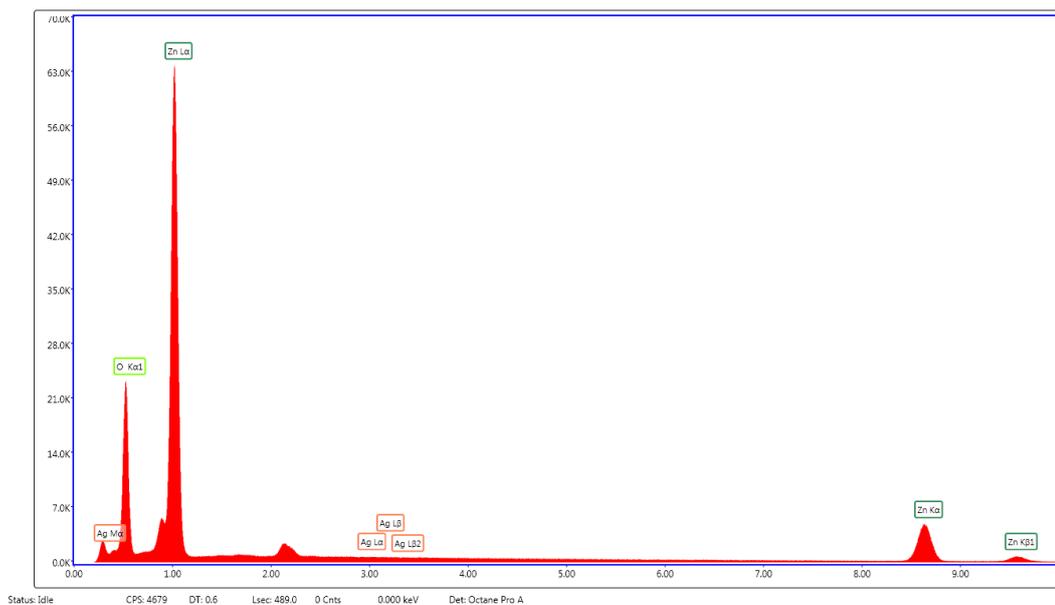
Nanopartikel merupakan sebuah partikel yang memiliki ukuran partikel nano berkisar dari 1 hingga 100 nm. Dengan ukuran yang sangat kecil tersebut menyebabkan nanopartikel umumnya memiliki sifat yang luar biasa karena dapat diubah dengan menggunakan perlakuan yang mudah. Pada saat ini, nanopartikel banyak dikembangkan penerapannya dan perlakuannya. Nanopartikel memiliki beberapa jenis berdasarkan bentuknya diantaranya yaitu, *nanodots*, *nanorods*, *nanoflakes*, dan *nanoflowers*. Perbedaan bentuk tersebut dapat diakibatkan oleh beberapa hal seperti, kondisi sintesis dan bahan yang digunakan. Bentuk nanopartikel tersebut dapat ditinjau dengan menggunakan pengujian *scanning electron microscope* (SEM). SEM digunakan untuk mendapatkan citra morfologi permukaan objek yang diuji dengan perbesaran hingga 100.000x. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, proses pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi bentuk nanopartikel pada dua jenis sampel dengan perlakuan sama, yaitu *filtrat ZnO-Ag* hasil proses CBD dan lapisan ZnO-Ag pada substrat PMMA. Pengujian tersebut dilakukan pada dua sampel tersebut untuk mengetahui jenis struktur nano yang tumbuh pada kedua sampel tersebut. Gambar 4.1 merupakan hasil pengujian SEM pada *filtrat ZnO-Ag*.



Gambar 4. 1 Morfologi Hasil SEM Pada *Filtrat ZnO-Ag*; (a) Perbesaran 2.000x; (b) Perbesaran 5.000x; dan (c) Perbesaran 10.000x.

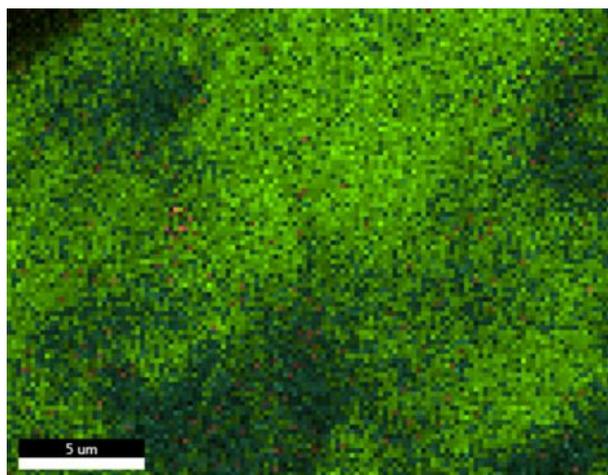
Berdasarkan Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa sebagian besar struktur nano yang terbentuk adalah *nanorods* yang bertumpuk. Pada Gambar 4.1, dengan menggunakan perbesaran 2.000x didapati struktur *nanorods* dan beberapa struktur *nanoflakes*. Pertumbuhan dua jenis struktur tersebut dapat terjadi karena beberapa hal diantaranya yaitu, kondisi pertumbuhan, kehadiran impuritas, sifat material yang tidak homogen, mekanisme pertumbuhan yang berbeda, dan interaksi antar struktur nano. Struktur *nanorods* dapat menyerap cahaya dengan kuat dalam kisaran spektrum yang luas. Hal ini disebabkan oleh efek resonansi plasmon permukaan, yang merupakan osilasi kolektif elektron pada permukaan *nanorods*.

Pengujian SEM umumnya juga dikombinasikan dengan *energy dispersive x-ray* atau biasa disebut sebagai EDX. Fungsi EDX adalah untuk mengetahui komposisi unsur yang terkandung dalam suatu senyawa yang diuji. EDX juga umumnya memiliki fitur pemetaan untuk mengetahui distribusi unsur dalam suatu senyawa tersebut. Hasil EDX pada sampel *filtrat ZnO-Ag* ditampilkan pada Gambar 4.2.

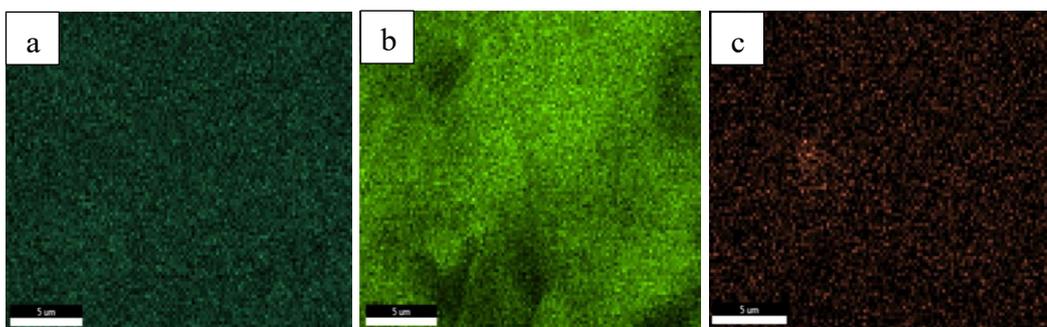


Gambar 4. 2 Hasil EDX *Filtrat* Sampel ZnO-Ag.

Berdasarkan Gambar 4.2, diketahui bahwa unsur yang mendominasi sampel *filtrat* tersebut adalah unsur Zn. Hal tersebut sesuai dengan penggunaan bahan yang menggunakan kuantitas Zn lebih banyak dibandingkan unsur lainnya. Kemudian urutan kedua terbanyak adalah unsur O, lalu diakhiri dengan puncak-puncak terendah pada unsur Ag. Berdasarkan data tersebut, dilakukan pemetaan unsur untuk mengetahui persebaran dari unsur pada senyawa tersebut terjadi secara merata atau tidak. Pada Gambar 4.3 menunjukkan pemetaan sampel *filtrat* ZnO-Ag. Berdasarkan hasil pemetaan tersebut diketahui bahwa unsur pada *filtrat* ZnO-Ag kurang merata persebarannya dan hanya terdapat pada beberapa titik saja, sedangkan titik lainnya tidak terisi oleh masing-masing unsur secara keseluruhan. Titik berwarna hijau muda merupakan sebaran dari unsur O, titik berwarna hijau tua merupakan unsur Zn, dan titik berwarna jingga merupakan sebaran dari unsur Ag.



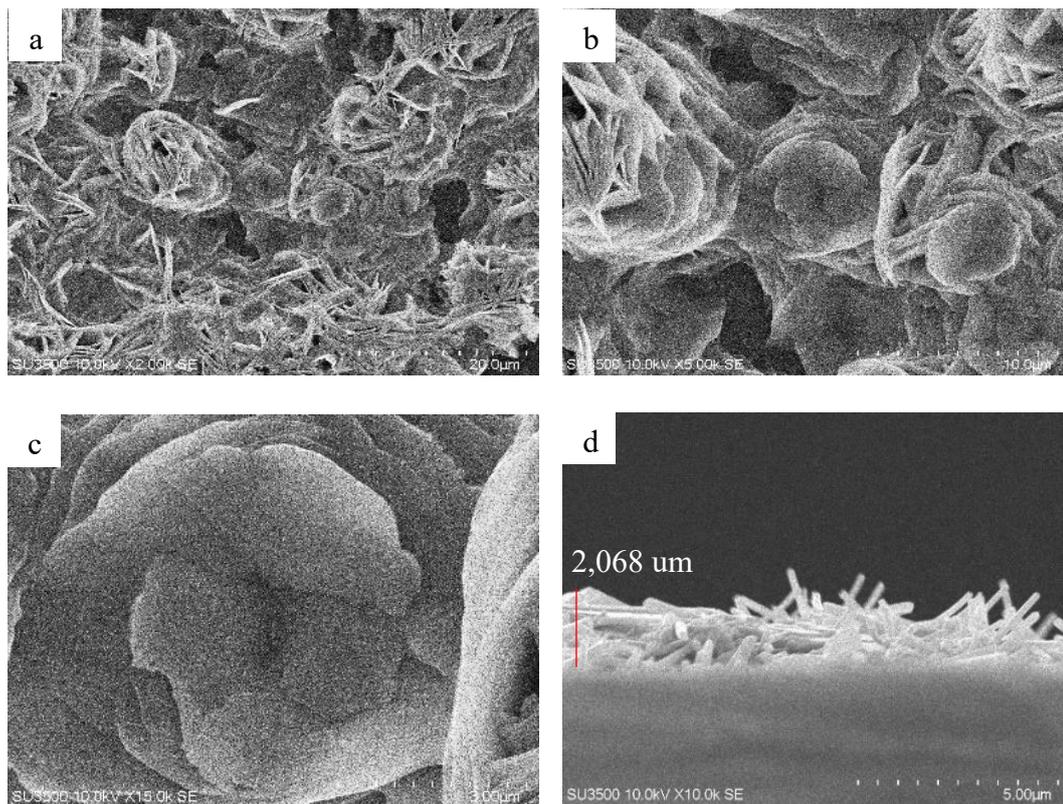
Gambar 4. 3 Hasil Pemetaan EDX *Filtrat* Sampel ZnO-Ag.



Gambar 4. 4 Pemetaan Persebaran Unsur Pada *Filtrat*, (a) Zn; (b) O; dan (c) Ag.

Hasil sintesis partikel dengan menggunakan *substrat* PMMA memiliki bentuk nanopartikel yang berbeda dengan *filtrat* ZnO-Ag. Lapisan ZnO-Ag yang tumbuh pada substrat PMMA akan memiliki struktur nanopartikel yang didominasi oleh bentuk *nanoflakes* dan *nanoflower* pada beberapa bagian. Kehadiran nanopartikel yang berbentuk *nanoflower* disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya yaitu interaksi antara partikel dan *substrat* PMMA, kondisi sintesis, dan mekanisme pertumbuhan partikel. PMMA memiliki sifat hidrofobik yang memiliki arti sebagai bahan yang menolak air. Hal tersebut menyebabkan partikel yang

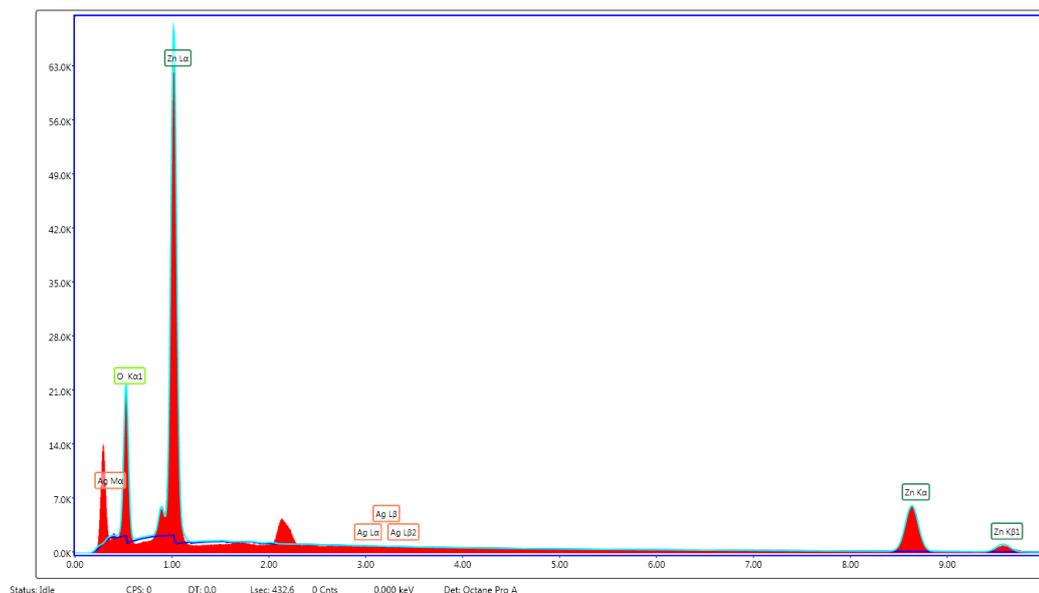
terikat pada substrat PMMA cenderung berkumpul di bagian yang memiliki energi permukaan terendah, yaitu di sekitar tepi dan sudut substrat. Suhu yang tinggi dapat meningkatkan mobilitas partikel dan memungkinkan lapisan ZnO-Ag untuk membentuk struktur yang lebih kompleks [51]. Pengaruh dari kombinasi kedua nanostruktur tersebut akan meningkatkan luas permukaan sensor sehingga akan mendeteksi lebih banyak partikel dan dapat meningkatkan sensitivitas sensor. Selain itu, bentuk struktur nano yang didominasi oleh nanoflakes dibandingkan nanoflower. Hal tersebut akan menyebabkan kinerja sensor yang lebih konduktif dan lebih selektif. Nanoflakes memiliki struktur yang lebih terbuka dibandingkan nanoflower sehingga akan menyediakan tempat lebih untuk perpindahan elektron.



Gambar 4.5 Morfologi Hasil SEM Pada Substrat ZnO-Ag; (a) Perbesaran 2.000x; (b) Perbesaran 5.000x; (c) Perbesaran 15.000x, dan (d) *cross section* perbesaran 10.000x.

Selain digunakan untuk mengamati bagian permukaan dari substrat, SEM juga digunakan untuk mengetahui morfologi internal dari lapisan. Dengan menggunakan *cross section* dapat diketahui susunan lapisan, ukuran partikel nano yang terbentuk, dan ketebalan lapisan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Choi, dkk (2020), semakin kecil ukuran nanopartikel maka akan semakin meningkatkan kinerja sensor dibandingkan dengan ukuran nanopartikel yang lebih besar. Berbanding lurus dengan ukuran nanopartikel, ketebalan lapisan yang semakin tipis juga akan menghasilkan nilai sensitivitas yang lebih tinggi daripada lapisan yang tebal [52]. Ketebalan lapisan ZnO-Ag yang tumbuh pada substrat PMMA adalah sebesar 2,068 μm .

Selain melakukan analisis morfologi, dilakukan juga pengujian EDS pada lapisan ZnO-Ag yang tumbuh pada substrat PMMA. Unsur yang paling mendominasi pada substrat PMMA yang dilapisi ZnO-Ag adalah Zn, kemudian disusul oleh O, dan terakhir adalah Ag. Hal tersebut sesuai karena penggunaan bahan pada proses sintesis didominasi oleh senyawa Zn.



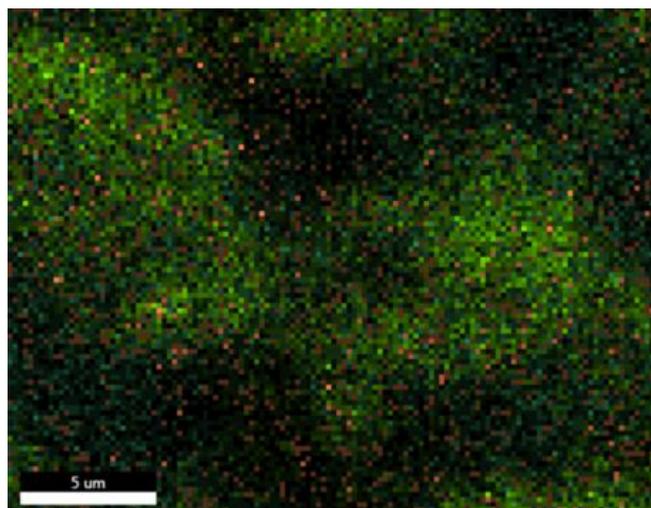
Gambar 4. 6 Hasil EDX Sampel Substrat ZnO-Ag.

Pada Tabel 4.1 ditampilkan data komposisi unsur penyusun fasa ZnO-Ag dengan unsur penyusunnya yaitu Zn, O, dan Ag. Pada fasa ZnO terbentuk kuantitas fasa sebesar 92,80wt% dengan komposisi Zn sebesar 67,14% dan O sebesar 32,86%. Kemudian pada fasa Ag terbentuk kuantitas fasa sebesar 7,20% dengan komposisi Ag sebesar 100%. Berdasarkan data tersebut, maka dapat diketahui bahwa penumbuhan lapisan tipis ZnO-Ag pada substrat PMMA telah berhasil dilakukan.

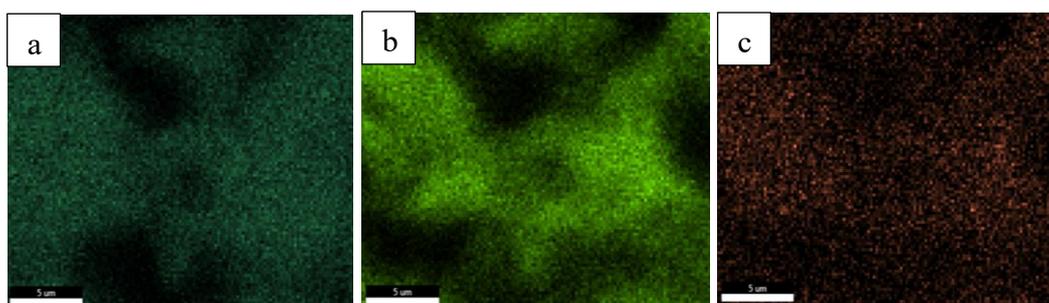
Tabel 4. 1 Komposisi Fasa ZnO-Ag

Fasa	Kuantitas Fasa (wt%)	Unsur (%)		
		Zn	O	Ag
ZnO	92,80	67,14	32,86	0
Ag	7,20	0	0	100

Selanjutnya dilakukan proses pemetaan unsur pada substrat ZnO-Ag. Proses pemetaan ini dilakukan dengan menggunakan hasil dari EDS. Gambar 4.6 menunjukkan hasil pemetaan unsur pada sampel substrat ZnO-Ag. Berdasarkan Gambar 4.6, dapat dilihat bahwa persebaran dari masing-masing unsur penyusun yaitu Zn, O, dan Ag telah tersebar secara merata. Persebaran unsur yang merata pada substrat ZnO-Ag dapat meningkatkan sensitivitas dari sensor yang akan difabrikasi [53].



Gambar 4. 7 Hasil Pemetaan EDX Substrat Sampel ZnO-Ag.



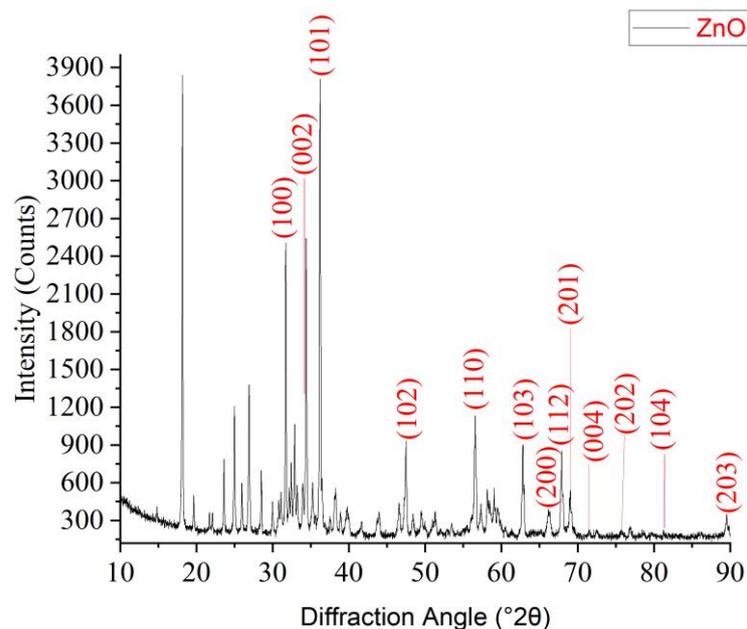
Gambar 4. 8 Pemetaan Persebaran Unsur Pada *Substrat*, (a) Zn; (b) O; dan (c) Ag

4.2 Karakterisasi XRD

Substrat PMMA yang telah ditumbuhi oleh lapisan tipis ZnO-Ag dikarakterisasi dengan menggunakan XRD. Karakterisasi XRD digunakan untuk mengetahui struktur kristal dan fasa yang terbentuk dari hasil sintesis ZnO-Ag. Analisa hasil karakterisasi XRD pada sampel ini menggunakan *software* Profex versi 5.2.8. Pada *software* memiliki fitur *match phases* yang akan membandingkan antara data pola difraksi sampel dengan pola difraksi yang terdapat pada pangkalan data *software* Profex versi 5.2.8 [54]. Hasil analisa menggunakan *software* tersebut ialah nilai *figure of merite* atau FoM yang merupakan parameter yang digunakan

untuk mengevaluasi kualitas data difraksi. Nilai FoM yang semakin tinggi memiliki kualitas hasil XRD yang semakin baik [55].

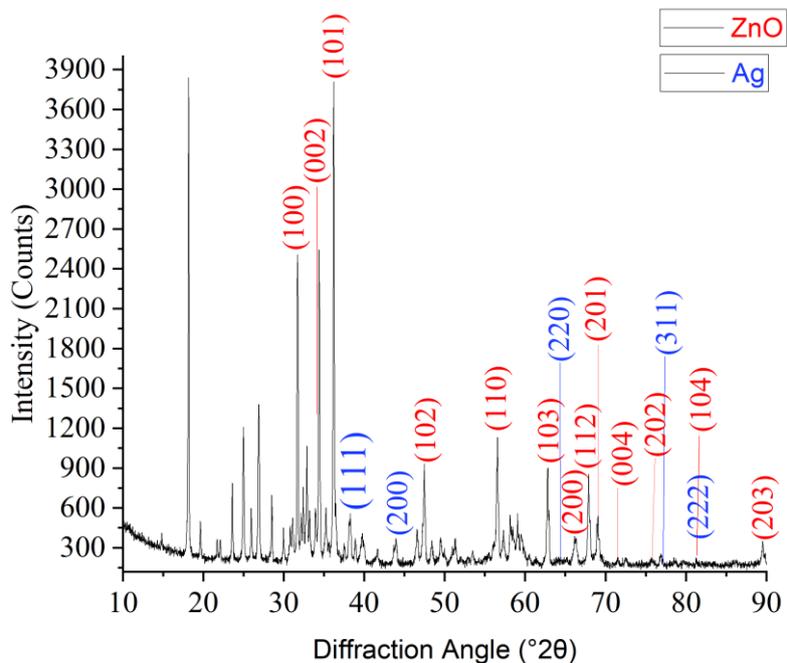
Indeks miller merupakan gambaran susunan atom, terutama bidang dan arah kisi. Indeks miller dibuat menjadi suatu system notasi yang terdiri dari h, k, dan l. Ketiga titik tersebut dipilih karena merupakan perpotongan antara satu titik kristal dengan titik lainnya sehingga membuat suatu bidang tertentu [56]. Indeks miller menentukan banyak hal dalam analisa XRD, salah satunya adalah menentukan sistem kristal yang dimiliki oleh suatu senyawa.



Gambar 4. 9 Pola Difraksi XRD Fasa ZnO.

Pada Gambar 4.9, menunjukkan beberapa puncak yang dapat dikenali sebagai fasa heksagonal dengan struktur wurtzite ZnO menurut ICSD 01-089-1397. Puncak-puncak XRD yang dihasilkan berada di sekitar sudut 2θ tersebut berada pada $31,737^\circ$; $34,379^\circ$; $36,215^\circ$; $47,484^\circ$; $56,536^\circ$; $62,777^\circ$; $66,304^\circ$; $67,868^\circ$; $69,009^\circ$; $72,465^\circ$; $76,867^\circ$; $81,270^\circ$; dan $89,492^\circ$. Puncak-puncak tersebut merupakan pola difraksi dari bidang kristal (100), (002), (101), (102), (110), (103),

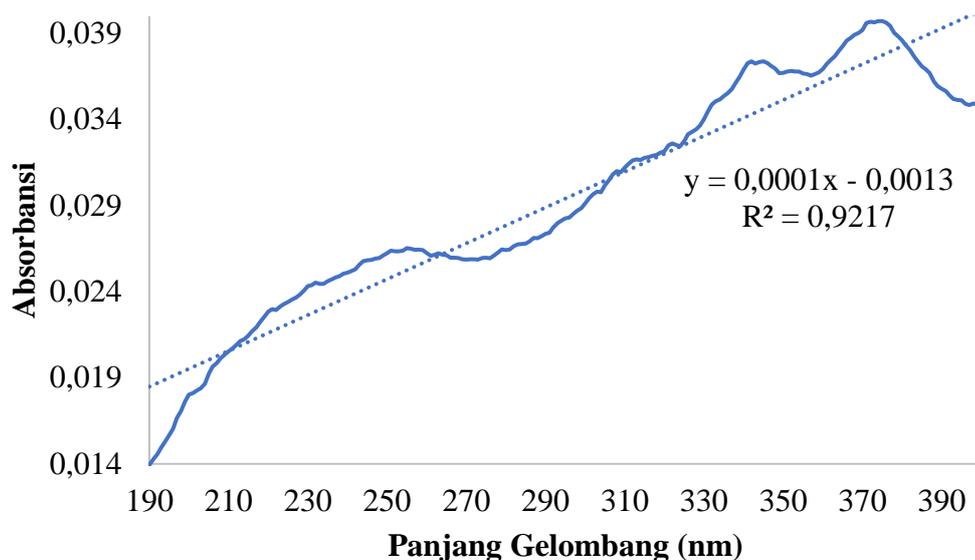
(200), (112), (201), (004), (202), (104), dan (203). Kemudian pada unsur Ag terbentuk pada puncak 38,115°; 44,299°; 64,443°; 77,397°; dan 81,541°. Berdasarkan referensi ICSD 64706 (PDF 01-087-0597), puncak-puncak tersebut merupakan pola difraksi dari bidang kristal (111), (200), (220), (311), dan (222). Fasa Ag terbentuk pada puncak-puncak yang lebih kecil dibandingkan puncak-puncak yang dimiliki ZnO. Hal tersebut disebabkan karena penggunaan massa awal Ag lebih kecil dibandingkan ZnO. Tinggi puncak XRD umumnya berbanding lurus dengan jumlah material yang dianalisis [57]. Hal ini berarti, semakin banyak massa bahan baku yang digunakan maka semakin tinggi puncak yang dihasilkan dalam pola XRD. Fasa sekunder yang dihasilkan pada penumbuhan lapisan tipis ZnO-Ag di atas substrat PMMA merupakan berunsur Ag. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.8 yang menampilkan puncak-puncak Ag yang cenderung lebih sedikit dan lebih kecil dibandingkan fasa utamanya yaitu ZnO.



Gambar 4. 10 Pola Difraksi XRD Fasa ZnO-Ag.

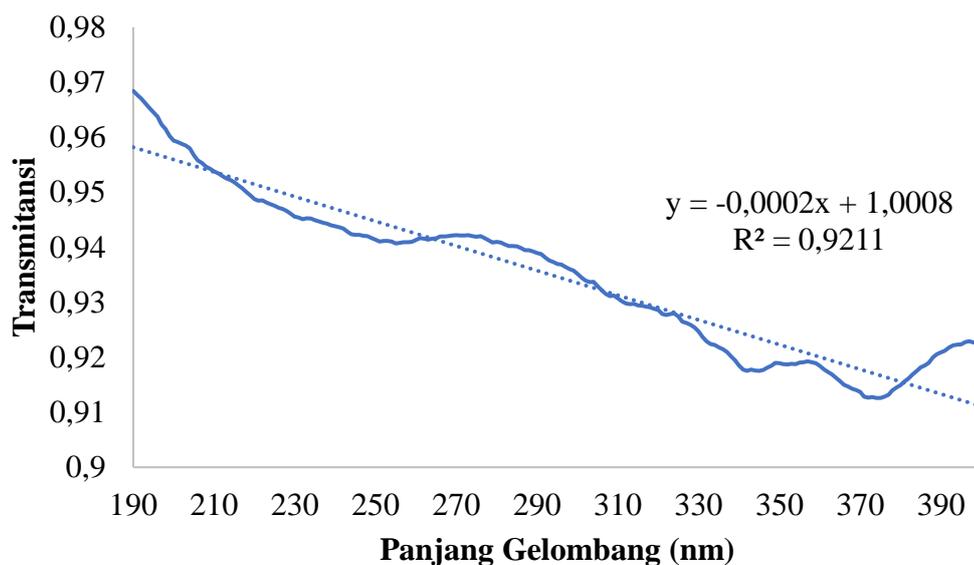
4.3 Karakterisasi UV-Vis

Ultraviolet visible spectrostocophy merupakan suatu pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan nilai absorbansi, transmitansi, dan reflektansi. Nilai absorbansi atau spektrum serapan suatu material memiliki peran yang cukup penting dalam menentukan karakteristik lapisan yang dihasilkan. Berdasarkan nilai spektrum serapan tersebut, dapat dihitung nilai koefisien serapan (α) yang menunjukkan kemampuan material untuk menyerap cahaya pada panjang gelombang tertentu. Semakin besar nilai spektrum serapan suatu zat, maka semakin banyak cahaya yang diserap oleh material tersebut sehingga akan menghasilkan nilai absorbansi yang semakin besar. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang gelombang cahaya spesifik di mana suatu material menyerap cahaya paling kuat. Puncak ini muncul sebagai titik tertinggi pada grafik yang menggambarkan hubungan antara absorbansi material dengan panjang gelombang cahaya. Pada nilai absorbansi atau spektrum serapan material dihasilkan nilai puncak spektrum serapan sebesar 0,0306 pada panjang gelombang 373 nm. Hal tersebut menandakan bahwa cahaya maksimal yang dapat diserap oleh sampel ZnO-Ag terdapat pada panjang gelombang 373 nm sebesar 0,0306. Selain itu, didapatkan nilai R^2 pada data ini adalah sebesar 0,9217. Hal tersebut mengartikan bahwa frekuensi berpengaruh terhadap nilai absorbansi yang dihasilkan.



Gambar 4.11 Grafik Absorbansi Substrat ZnO-Ag.

Nilai transmitansi dari lapisan ZnO-Ag lebih tinggi dibandingkan lapisan ZnO yang hanya memiliki transmitansi maksimum sekitar 70%. Hal ini diduga karena terjadinya difusi ion Ag^+ kedalam kisi dari ZnO yang akan melewatkan cahaya pada panjang gelombang yang lebih tinggi. Suatu substrat tidak akan memiliki nilai transmitansi 100% karena itu malah menandakan bahwa substrat tersebut tidak terlapsi. Nilai R^2 merupakan koefisien determinasi yang menunjukkan kekuatan hubungan linear antara variabel independen (X) dan dependen (Y). Semakin mendekati 1 nilai R^2 , semakin baik model regresi linear dalam menjelaskan variasi nilai Y yang disebabkan oleh variabel X. Pada penelitian ini didapati nilai R^2 pada grafik transmitansi adalah 0,9211.

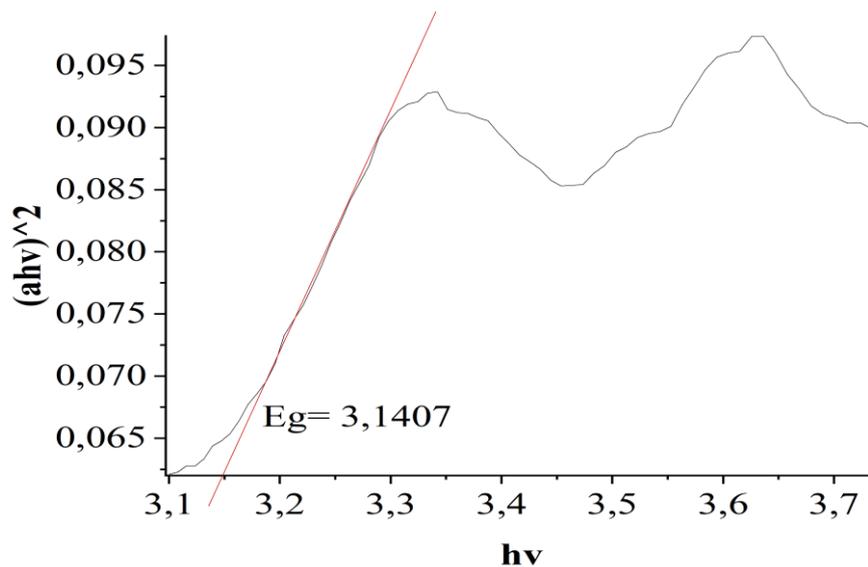


Gambar 4.12 Grafik Transmittansi Substrat ZnO-Ag.

Pada hasil karakterisasi UV Vis, didapatkan nilai absorbansi dan juga transmittansi. Berdasarkan data tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai energi celah pita dari lapisan ZnO-Ag. Energi celah pita pada sensor ZnO-Ag memiliki beberapa peran yang penting untuk menentukan karakteristik dari sensor yang dihasilkan. Penentuan nilai energi celah pita dapat menggunakan metode *Tauc Plot*. Metode *Tauc plot* adalah sebuah metode penentuan celah pita optik dengan melihat grafik linear hubungan E (eV) pada sumbu-x dan $(\alpha h\nu)$ sumbu-y.

Rentang energi celah pita (band gap) semikonduktor umumnya berkisar antara 0,2 eV hingga 3,5 eV. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Kalam dkk (2022), nilai energi celah pita ZnO adalah sebesar 3,37 eV [58]. Kemudian ketika dilakukan perhitungan nilai energi celah pita pada substrat ZnO-Ag didapatkan nilai sebesar 3,1407 eV. Berdasarkan hasil nilai tersebut, diketahui bahwa terjadi penurunan nilai energi celah pita ZnO setelah ditambahkan Ag.

Energi celah pita tersebut dapat menentukan energi yang dibutuhkan untuk teradsorpsi ke permukaan sensor, sehingga akan mempengaruhi sensitivitas dan selektivitas sensor. Semakin rendah nilai energi celah pita, semakin mudah energi cahaya tereksitasi untuk memindahkan elektron dari pita valensi ke pita konduksi, menghasilkan lebih banyak muatan bebas. Energi celah pita ZnO juga berhubungan dengan konduktivitas termalnya. Penambahan Ag yang memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dibandingkan ZnO dapat meningkatkan konduktivitas termal sensor.



Gambar 4.13 *Tauc Plot* Substrat ZnO-Ag.

4.4 Karakterisasi Sensor

Perkembangan teknologi di dunia dilandaskan pada kebutuhan manusia yang semakin beragam dan nilai efisiensinya. Sensor merupakan salah satu produk globalisasi untuk memudahkan pekerjaan manusia. Sensor memiliki banyak sekali karakteristik dan beragam pengaplikasiannya sesuai dengan karakter dan bahan yang digunakan pada saat fabrikasi. Terdapat banyak sekali jenis sensor yang telah

dikembangkan pada masa ini salah satunya yaitu sensor kapasitif. Menurut penelitian Daul, dkk (2021) sensor kapasitif banyak digunakan karena dapat mendeteksi sampel secara non-kontak [59]. Selain itu, sensor kapasitif juga menghasilkan akurasi yang cukup presisi, sehingga sensor kapasitif banyak digunakan dalam banyak industri. Sensor memiliki prinsip kerja yang berbeda-beda, sehingga menghasilkan data hasil yang tidak sama. Prinsip-prinsip teknologi sensor mencakup beragam jenis sensor, termasuk transduser resistif, induktif, kapasitif, dan piezoelektrik, yang digunakan untuk aplikasi tertentu [60].

Pada penelitian ini, substrat PMMA yang telah berhasil ditumbuhkan lapisan ZnO-Ag kemudian dirangkai menjadi sensor. Substrat tersebut diletakkan di dalam *chamber box* dan kemudian disambungkan dengan kabel koaksial agar sinyal dapat terukur dengan menggunakan alat VNA. Selanjutnya VNA akan menghasilkan data berupa DUT *imaginary* dan DUT *real*. DUT *imaginary* mewakili fase sinyal yang diukur, sedangkan DUT *real* mewakili magnitudo sinyal yang diukur. Nilai tersebut kemudian dikonversi menjadi nilai impedansi dengan menggunakan rumus

$$Z = \sqrt{Real^2} + Imaginer^2 \dots \dots \dots (4.1)$$

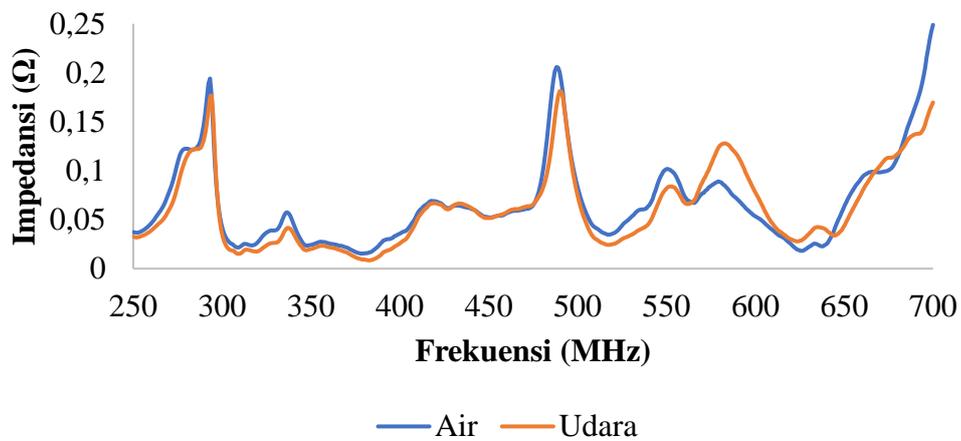
Penggunaan sensor yang telah dirangkai tersebut diawali dengan mengukur udara dan air. Hal tersebut dikarenakan nilai permitivitas dielektrik udara dan air memiliki perbedaan yang sangat signifikan. Oleh karena itu, untuk mengetahui apakah sensor tersebut bekerja dengan baik atau tidak, perlu dilakukan suatu pengujian dengan media dasar yang telah diketahui nilainya. Pada temperatur dan tekanan ruang, air memiliki permitivitas 80x lebih tinggi dibandingkan udara. Hal

tersebut dikarenakan permitivitas air dipengaruhi oleh struktur molekulnya. Adanya ikatan hidrogen di dalam air menyebabkan peningkatan momen lokal rata-rata dan penyelarasan dipol molekul, sehingga menyebabkan konstanta dielektriknya menjadi lebih besar.

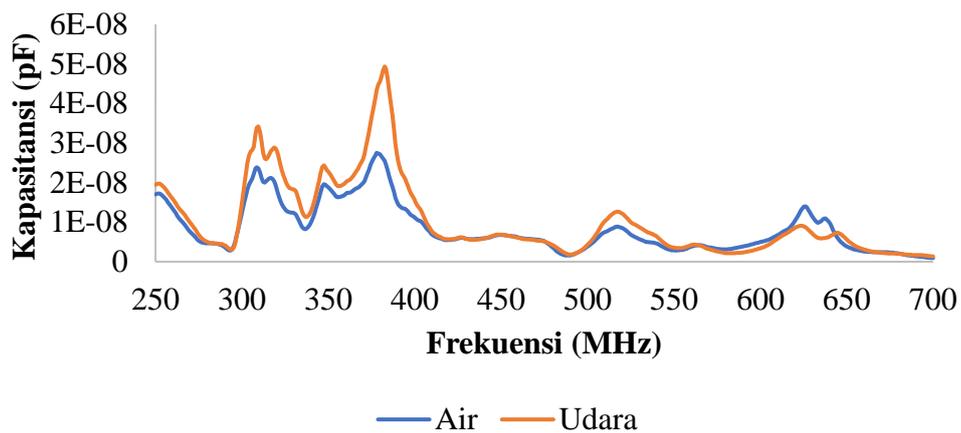
Permitivitas memiliki pengaruh terhadap besaran nilai impedansi dan kapasitansi yang dihasilkan. Permitivitas merupakan besaran yang menggambarkan kemampuan suatu material untuk menyimpan energi listrik. Oleh karena itu, permitivitas akan berbanding terbalik dengan impedansi dan akan berbanding lurus dengan kapasitansi. Air merupakan konduktor karena dapat menghantarkan listrik dengan baik, sedangkan udara adalah isolator. Air dapat menghantarkan listrik karena adanya molekul polar dan ion terlarut yang dapat bergerak bebas. Di sisi lain, udara tidak dapat menghantarkan listrik karena molekulnya nonpolar dan tidak ada ion terlarut. Oleh karena itu, air cenderung akan memiliki nilai impedansi yang lebih rendah dibandingkan udara. Impedansi merupakan besaran kompleks yang digunakan untuk mengukur penolakan suatu rangkaian listrik terhadap arus bolak-balik (AC), sehingga semakin tinggi impedansi, semakin kecil arus yang mengalir.

Pada penelitian ini, sensor ZnO-Ag yang telah dirangkai dikarakterisasi dengan menggunakan 3 variasi rentang frekuensi yang berbeda, yaitu 250-700 MHz, 1-1000 MHz, dan 1000-6000 MHz untuk mengetahui pada frekuensi mana sensor dapat bekerja secara optimal. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan data pada rentang frekuensi 250-700 MHz. Pemilihan rentang frekuensi tersebut didasarkan pada proses *trial* dan didapatkan nilai impedansi dan kapasitansi dari air dan udara yang lebih baik pendeteksiannya pada rentang frekuensi tersebut. Selain itu, pemilihan rentang frekuensi tersebut juga didasarkan pada penelitian yang telah dilakukan oleh Leng, dkk (2019) yang menunjukkan bahwa semakin rendah

frekuensi pengukuran maka akan menghasilkan nilai impedansi yang lebih tinggi karena bersifat isolator [2]. Pada penelitian tersebut juga menyebutkan bahwa daging dengan kualitas yang baik akan menghasilkan nilai impedansi yang lebih tinggi. Karena dengan memiliki impedansi yang tinggi memiliki arti bahwa kandungan air dalam daging tidak terlalu banyak sehingga daging tersebut dapat dikatakan dalam kondisi baik.



Gambar 4. 14 Kurva Impedansi Air dan Udara pada Frekuensi 250-700 MHz.



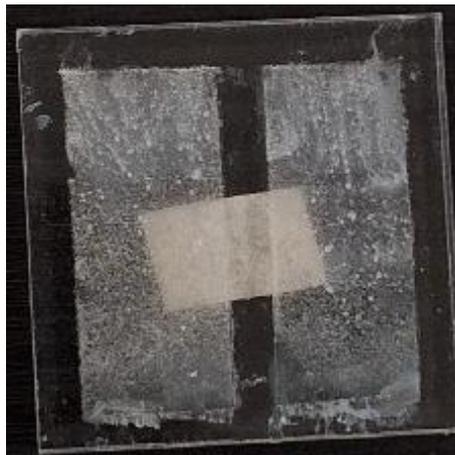
Gambar 4. 15 Kurva Kapasitansi Air dan Udara pada Frekuensi 250-700 MHz.

Pada penelitian yang telah dilakukan, didapatkan anomali hasil pengukuran karakterisasi sensor. Nilai impedansi air yang didapatkan pada pengukuran tersebut cenderung lebih tinggi dibandingkan udara. Hasil yang kurang sesuai juga didapatkan pada nilai kapasitansi air yang cenderung lebih rendah dibandingkan kapasitansi udara. Ketidaksesuaian tersebut disebabkan oleh beberapa hal yaitu, proses kalibrasi yang kurang baik, dan juga pengaruh lingkungan pada saat proses pengukuran. Namun, pada pengukuran yang telah dilakukan pada rentang frekuensi lain dan dihari yang berbeda, didapati bahwa terdapat frekuensi *state* dari sensor ZnO-Ag yaitu pada rentang frekuensi 564-644 MHz. Oleh karena itu, analisis data pada variasi daging akan difokuskan pada rentang frekuensi tersebut.

4.5 Uji Performa Sensor

Identifikasi daging secara manual umumnya dapat diidentifikasi dengan melihat warna dan baunya. Namun terdapat beberapa penjual curang yang mengatasi hal tersebut dengan memberikan bahan tambahan agar jenis dan kualitas daging menjadi lebih baik. Hal tersebut dapat merugikan konsumen, sehingga dibutuhkan bantuan alat untuk proses identifikasi daging tersebut. Terdapat beberapa alat pendeteksi jenis daging yang sudah dikomersilkan, yaitu DM300. Namun alat tersebut hanya dapat mendeteksi kualitas daging berdasarkan kelembaban dan aromanya. Selain itu, alat yang sudah dikomersilkan tersebut juga memiliki harga pasaran yang cukup tinggi. Melihat pada kinerja dan ketersediaan alat tersebut, sensor ZnO-Ag ini menawarkan beberapa kemudahan, diantaranya yaitu proses pendeteksiannya yang cepat dan harga produknya yang murah.

Pada penelitian ini telah dilakukan proses perakitan sensor pengidentifikasi daging dengan menggunakan lapisan ZnO-Ag. Lapisan tersebut ditumbuhkan di atas substrat PMMA yang kemudian dilapisi dengan cat bening untuk membatasi antara lapisan ZnO-Ag dengan sampel daging yang dideteksi. Batasan antara lapisan ZnO-Ag dengan sampel daging tersebut merupakan penerapan sensor ZnO-Ag yang bekerja dengan prinsip kapasitif. Sensor ZnO-Ag bekerja dengan memanfaatkan medan listrik yang terjadi pada saat terjadinya perubahan kapasitansi antar elektroda. Medan listrik tersebut akan dipengaruhi oleh distribusi lapisan ZnO-Ag pada permukaan substrat, sehingga dibutuhkan lapisan yang merata pada keseluruhan bagian substrat yang digunakan.



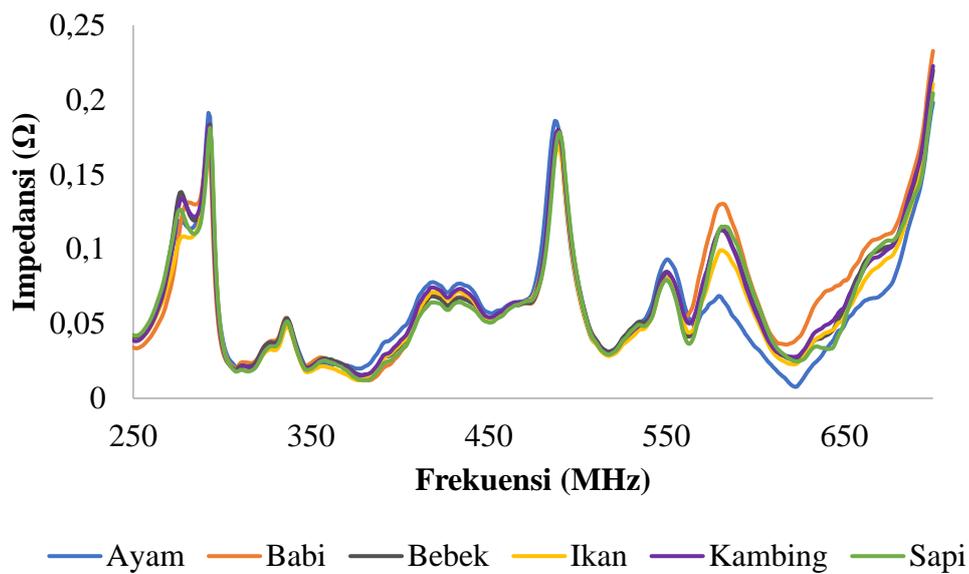
Gambar 4. 16 Substrat PMMA yang Dilapisi ZnO-Ag dengan Metode *Spin Coating*.

Berdasarkan Gambar 4. 16, lapisan ZnO-Ag yang tumbuh pada substrat PMMA terlihat cukup merata pada keseluruhan bagian substrat. Hal tersebut dikarenakan pada saat proses *seeding*, larutan prekursor yang digunakan akan tersebar merata melalui gaya sentripetal, sehingga menghasilkan ketebalan film yang merata. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Ke, dkk (2021), lapisan yang

merata tersebut akan menghasilkan nilai sensitivitas sensor yang lebih tinggi [61]. Hal tersebut menambah salah satu kelebihan sensor ZnO-Ag dibandingkan sensor pendeteksi lainnya. Selain sensitivitas yang tinggi, sensor ZnO-Ag dapat diproduksi dengan biaya yang rendah namun memiliki ketahanan yang cukup tinggi.

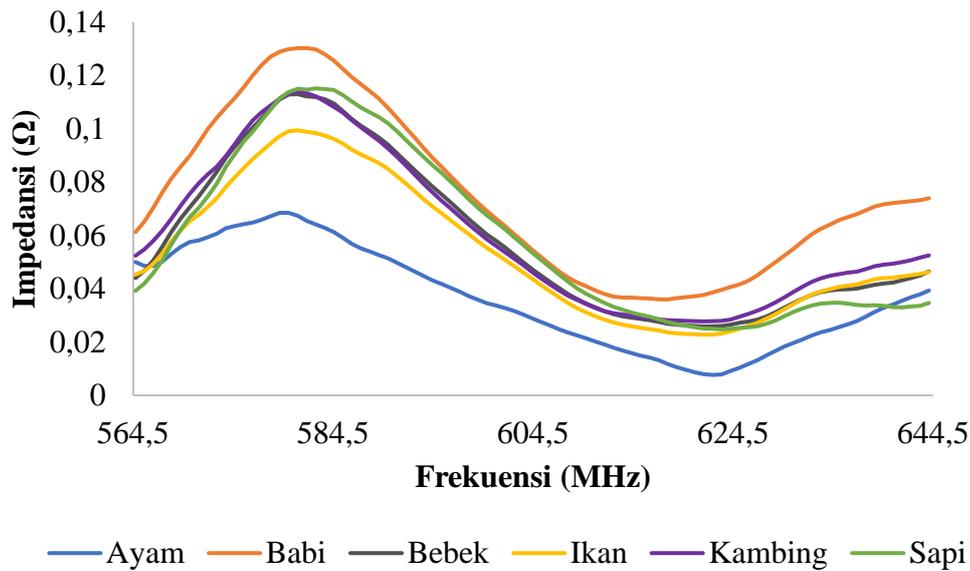
Uji performa sensor merupakan salah satu tahapan yang dilakukan untuk mengetahui apakah sensor dapat membedakan media yang akan dideteksi. Pada penelitian ini, sampel uji adalah berupa daging mentah dari beberapa jenis daging putih dan daging merah. Variasi daging putih yang digunakan pada penelitian ini adalah daging ayam, bebek, dan ikan, sedangkan variasi daging merah yang digunakan adalah babi, kambing, dan sapi. Jenis variasi daging yang digunakan tersebut merupakan beberapa jenis daging yang umum dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia.

Sensor ZnO-Ag akan melakukan pengukuran nilai variasi daging pada rentang frekuensi 250-700 MHz. Impedansi merupakan besaran kompleks yang mewakili perlawanan terhadap aliran arus bolak-balik (AC) dan terdiri dari komponen *real* berupa nilai resistif dan imajiner berupa nilai reaktif. Proses pengukuran dilakukan dengan menempatkan sampel daging pada sensor dan mencatat nilai berupa DUT *real* dan DUT imajiner pada rentang frekuensi yang sama yang digunakan untuk karakterisasi sensor. Interaksi antara lapisan ZnO-Ag dengan sampel daging yang digunakan akan menimbulkan terjadinya transfer elektron antara sampel daging dan permukaan sensor. Medan listrik menginduksi polarisasi molekul dalam sampel daging, khususnya molekul polar seperti air dan protein, sehingga akan menghasilkan nilai impedansi dan kapasitansi yang berbeda pada berbagai jenisnya.



Gambar 4. 17 Kurva Impedansi Variasi Daging.

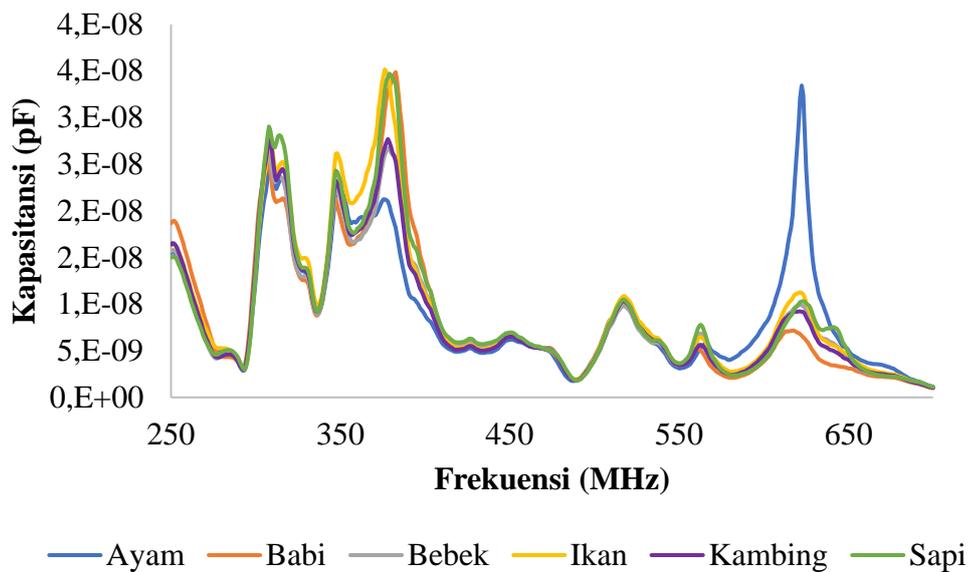
Berdasarkan Gambar 4.17, diketahui bahwa sensor ZnO-Ag dapat mendeteksi perbedaan nilai impedansi daging. Pada rentang frekuensi 300-365 MHz didapatkan tren grafik yang cenderung sama pada keenam variasi daging. Fenomena terjadinya tren grafik yang sama tersebut bisa disebut sebagai frekuensi resonansi. Resonansi terjadi pada rangkaian AC ketika efek dari dua reaktansi yang berlawanan dan sama besar, saling menghilangkan sebagai $X_L = X_C$. Selain itu, sensor tersebut dapat mendeteksi variasi daging secara signifikan pada rentang frekuensi 564-644 MHz. Hal tersebut sesuai dengan rentang frekuensi pada karakterisasi sensor yang telah dilakukan. Pada rentang frekuensi tersebut juga dideteksi nilai impedansi air yang lebih rendah dibandingkan udara. Oleh karena itu, dilakukan analisis uji performa variasi daging pada rentang frekuensi tersebut.



Gambar 4. 18 Kurva Impedansi Variasi Daging pada Frekuensi Kerja.

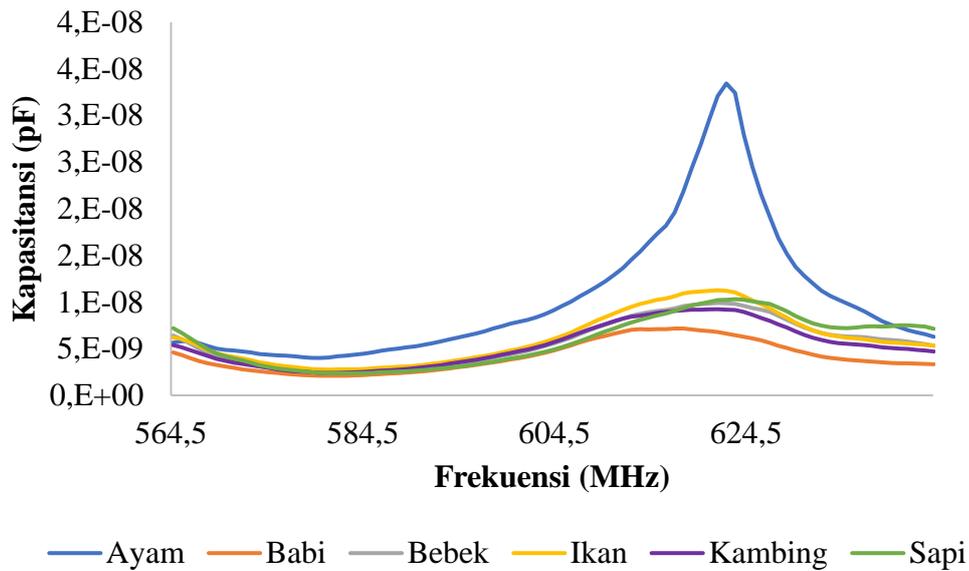
Gambar 4.18 menunjukkan perbedaan nilai impedansi pada variasi daging. Nilai impedansi dari terkecil hingga terbesar dimiliki oleh daging ayam, ikan, bebek, kambing, sapi, dan babi. Daging ayam, ikan, dan bebek merupakan jenis daging putih, sedangkan daging kambing, sapi, dan babi merupakan jenis daging merah. Hal tersebut sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Erfiza dkk (2018) yang menyatakan bahwa semakin tinggi kandungan lemak daging maka akan semakin rendah kandungan airnya [62]. Hal tersebut dikarenakan semakin tinggi kandungan lemak yang dimiliki oleh daging, maka akan semakin banyak jaringan ikat yang dimiliki oleh daging tersebut. Umumnya daging merah memiliki kandungan lemak yang lebih tinggi dibandingkan dengan daging putih. Hubungan antara nilai impedansi daging dengan kandungan air ialah berbanding terbalik. Semakin tinggi kandungan air di dalam daging, maka akan dihasilkan nilai impedansi yang lebih rendah. Untuk memvalidasi data impedansi pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18, maka dapat dihitung nilai kapasitansinya. Menurut literatur

yang ditulis oleh Yang dan Chung (2018), nilai kapasitansi akan berbanding lurus dengan kandungan air. Semakin tinggi kandungan air yang dimiliki oleh daging, maka akan menghasilkan nilai kapasitansi yang semakin tinggi. Oleh karena itu, nilai impedansi dan kapasitansi akan berbanding terbalik [63].



Gambar 4. 19 Kurva Kapasitansi Variasi Daging.

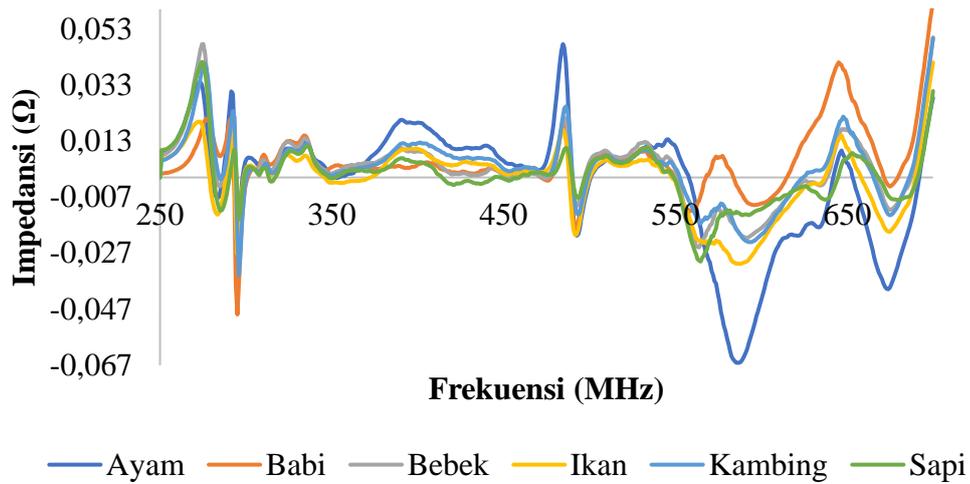
Berdasarkan Gambar 4.19 didapati kurva kapasitansi variasi daging yang nilainya berbanding terbalik dengan kurva impedansi daging. Pada kurva kapasitansi, frekuensi resonansi terjadi pada rentang frekuensi 470-550 MHz. Perbedaan frekuensi resonansi antara nilai impedansi dan kapasitansi dapat terjadi karena keduanya merupakan dua besaran yang berbeda. Namun, terdapat persamaan pada frekuensi *state* yaitu pada rentang frekuensi 550-650 MHz.



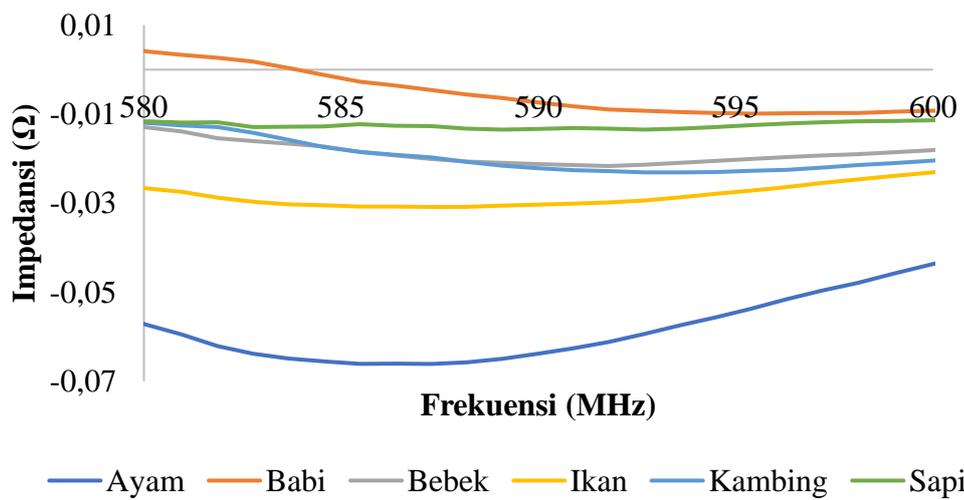
Gambar 4. 20 Kurva Kapasitansi Variasi Daging pada Frekuensi Kerja.

Berdasarkan Gambar 4.20, dapat diketahui bahwa nilai kapasitansi tertinggi dimiliki oleh daging ayam. Daging ayam umumnya memiliki kandungan air yang lebih tinggi sehingga akan menghasilkan kurva kapasitansi yang lebih tinggi dibandingkan jenis daging lainnya. Daging babi umumnya memiliki kandungan lemak yang lebih tinggi sehingga membuat daging tersebut memiliki kadar air yang lebih sedikit.

Grafik pada Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 merupakan data grafik asli dari daging. Untuk mengetahui nilai murni dari daging tanpa keterlibatan udara dapat dilakukan dengan proses normalisasi. Pada normalisasi yang dilakukan, data impedansi pada sampel dikurangi data udara. Sensor ZnO-Ag merupakan sensor yang sensitif terhadap kelembaban dan temperatur. Oleh karena itu, perlu dilakukan proses normalisasi agar dapat diketahui nilai impedansi dan kapasitansi variasi daging tanpa pengaruh udara.



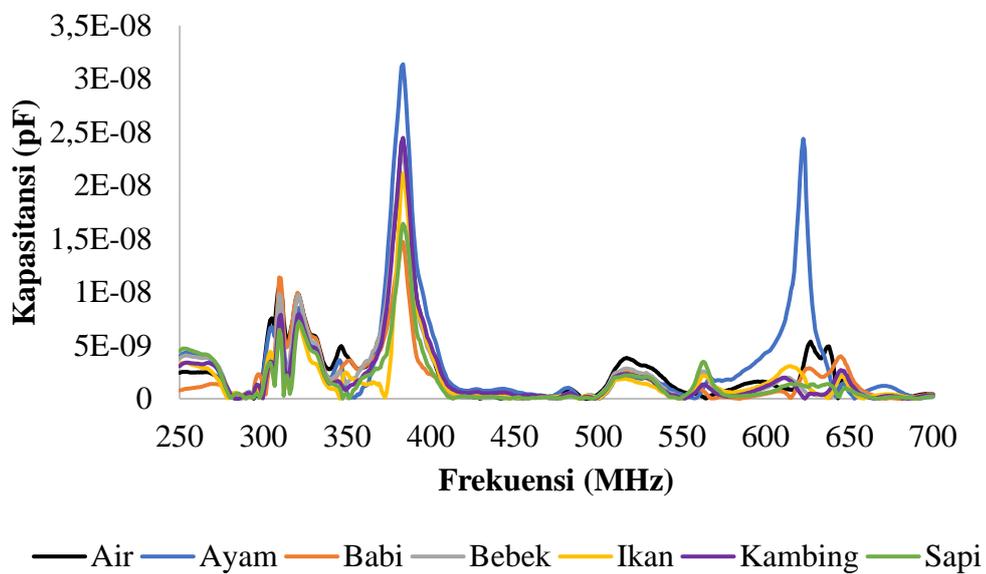
Gambar 4.21 Kurva Normalisasi Impedansi Variasi Daging.



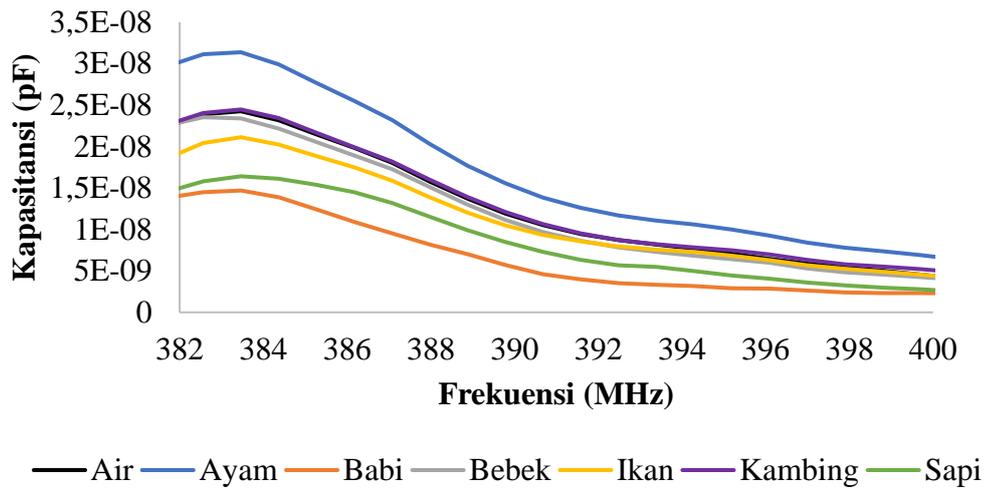
Gambar 4.22 Kurva Normalisasi Impedansi Variasi Daging Pada Frekuensi Resonansi.

Berdasarkan Gambar 4.21 dan Gambar 4.22, diketahui bahwa nilai impedansi variasi daging setelah dinormalisasi memiliki pola puncak tertinggi pada rentang frekuensi 580-600 MHz. Pada rentang frekuensi tersebut air juga memiliki pola yang sama dengan variasi daging. Hal tersebut memiliki arti bahwa pada rentang frekuensi tersebut air dan variasi daging mencapai frekuensi resonansi.

Pada frekuensi resonansi ini, rentang nilai yang dihasilkan oleh sensor akan diserap secara efisien oleh daging, menghasilkan pembacaan yang konsisten terlepas dari variasi komposisi. Puncak impedansi normalisasi yang paling terendah terdapat pada nilai impedansi normalisasi daging ayam. Nilai impedansi normalisasi daging ayam lebih rendah dibandingkan air karena kandungan air dalam ayam lebih banyak dan lebih kompleks dengan kompleksnya komposisi kimia dan struktur jaringan yang dimilikinya. Selain itu, juga didapatkan nilai impedansi normalisasi tertinggi pada daging babi.



Gambar 4. 23 Kurva Normalisasi Kapasitansi Variasi Daging.



Gambar 4. 24 Kurva Normalisasi Kapasitansi Variasi Daging Pada Frekuensi Resonansi.

Gambar 4.23 dan Gambar 4.24 menunjukkan hasil kapasitansi normalisasi dari berbagai variasi daging dengan puncak tertinggi secara berturut-turut dimiliki oleh daging ayam, kambing, bebek, ikan, sapi, dan babi. Daging bebek dan kambing memiliki nilai impedansi maupun kapasitansi yang cenderung mirip. Hal tersebut dikarenakan struktur sel daging bebek dan daging kambing memiliki kesamaan. Sel-sel pada kedua jenis daging ini memiliki membran sel yang bertindak sebagai kapasitor alami. Kapasitansi membran sel ditentukan oleh luas permukaannya, ketebalannya, dan permitivitasnya. Karena struktur sel bebek dan kambing memiliki kesamaan, maka kapasitansi membran selnya pun kemungkinan besar hampir sama. Daging ayam memiliki kandungan air yang cukup tinggi karena merupakan jenis daging putih yang memiliki sedikit stuktur jaringan ikat. Semakin sedikit jaringan ikat yang dimiliki oleh daging, maka akan menghasilkan karakteristik daging yang semakin empuk sehingga pengolahan dan masa simpannya lebih sebentar dibandingkan daging dengan jaringan ikat yang lebih besar.