

Prototipe Sensor Pendeteksi Bakteri *Escherichia coli* pada Sampel Air Berbasis Nanokomposit ZnO/PVA

1st Luthfi Aprilo Gunawan

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

luthfigunawantekfis@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Abrar

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

abrselaha@telkomuniversity.ac.id

3rd Indra Wahyudhin Fathona

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

indrafathonah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Bakteri berbahaya yang bersifat patogen dapat menyebabkan berbagai penyakit kepada manusia dimana dapat ditemui dalam air maupun makanan. Air sebagai sumber utama kebutuhan sehari-hari seringkali terkontaminasi bakteri, salah satunya bakteri *Escherichia coli* yang dapat menyebabkan permasalahan terhadap tubuh manusia terutama pada sistem pencernaan jika kandungan bakteri tersebut terlalu tinggi. Oleh karena itu, diperlukan suatu teknologi yang dapat mendeteksi bakteri *E. coli* secara efektif dan terjangkau. Prototipe sensor dibuat berbentuk *Screen Printed Electrode* (SPE) dimana pada bagian elektroda kerja akan dilapisi dengan nanokomposit ZnO/PVA dan dilakukan pengujian deteksi bakteri *E. coli* dengan metode *cyclic voltammetry* pada konsentrasi CFU yang berbeda-beda untuk mengetahui kinerja dari prototipe sensor. Selain itu nanokomposit ZnO/PVA yang disintesis akan dikarakterisasi dengan pengukuran arus-tegangan I-V pada sifat listrik dan elektrokimia, *X-ray diffraction*, dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* untuk sifat kristal dan strukturnya. Hasil pengujian pendeteksian bakteri *E. coli* pada konsentrasi 1×10^6 CFU hingga 6×10^6 CFU dengan metode elektrokimia *cyclic voltammetry* menunjukkan adanya kenaikan arus puncak seiring dengan adanya peningkatan konsentrasi bakteri. *Limit of detection* (LOD) yang diperoleh yakni sebesar $1,97 \times 10^6$ CFU sehingga prototipe sensor dapat mendeteksi keberadaan bakteri *E. coli* ditandai dengan adanya kenaikan arus yang dihasilkan ketika pengujian *cyclic voltammetry*.

Kata kunci— ZnO/PVA, *E. coli*, Elektrokimia, Elektroda

I. PENDAHULUAN

Kemampuan deteksi semikonduktor logam oksida (*Metal Oxide Semiconductor*) terlihat lebih baik untuk mendeteksi gas, logam maupun bahan berbahaya lainnya, termasuk bakteri. Kehadiran bakteri dalam jumlah yang berlebihan akan mengganggu metabolisme tubuh, bahkan sangat berbahaya bagi sistem pencernaan manusia. Maka dari itu perlu diketahui keberadaan dan kadar bakteri yang ada dalam air, terutama bakteri *Escherichia coli*. Pada proyek ini akan dirancang sebuah prototipe sensor pendeteksi bakteri *E. coli* berbasis nanokomposit ZnO/PVA.

Kehadiran bakteri yang terdapat dalam air minum yang dikonsumsi dapat menyebabkan permasalahan bagi tubuh manusia terutama pada sistem pencernaan manusia jika jumlah bakteri tersebut tinggi atau berlebihan. Salah satu kebutuhan pangan utama manusia pada kehidupan sehari-hari adalah air minum dimana jika air minum yang dikonsumsi tercemar atau terkontaminasi bakteri dapat menyebabkan penyakit, bakteri yang umumnya terdapat dalam air yaitu bakteri *Escherichia coli* dimana berdasarkan studi yang telah dilakukan diketahui infeksi bakteri *E. coli* yang dapat menyebabkan penyakit diare, yaitu dengan konsentrasi sekitar 1×10^6 hingga 1×10^{10} CFU [1]. Selain itu standar air minum yang digunakan tidak boleh mengandung bakteri *E. coli* dan bebas dari bakteri koliform atau dinyatakan sebagai 0 CFU/100 mL sampel air. Keberadaan bakteri *E. coli* dalam air dapat dijadikan sebagai indikator kualitas air minum dimana jika terdapat bakteri tersebut menandakan bahwa air terkontaminasi oleh feses dan kemungkinan juga terdapat mikroorganisme patogen lainnya [1]. Oleh karena itu perlu diketahui keberadaan dan kadar bakteri yang terdapat dalam air agar dapat terhindar dari penyakit yang tidak diinginkan. Beberapa metode deteksi bakteri *E. coli* yang umum digunakan adalah dengan metode *polymerase chain reaction* (PCR) dan *enzyme-linked immunosorbent assay* (ELISA) dimana metode tersebut memiliki kekurangan yakni deteksi yang lambat, mahal, harus diuji di laboratorium dan perlu pelatihan untuk dapat melakukannya [2], [3]. Sehingga dibutuhkan sensor pendeteksi bakteri yang lebih sederhana, sensitif, *low cost*, dapat digunakan tanpa pelatihan khusus serta dapat diuji secara langsung di tempat.

serta bakteri. Di antara beberapa logam oksida lainnya, ZnO mudah diperoleh, biaya rendah, biokompatibel, dan bahan yang kurang beracun dibanding logam oksida lain [4]. Studi menunjukkan bahwa ZnO dapat diaplikasikan sebagai bahan sensor pendeteksi bakteri *E. coli* dikarenakan nanopartikel pada ZnO pada saat kontak langsung dengan dinding sel bakteri *E. coli* yang merupakan bakteri gram negatif akan bereaksi dengan memberikan muatan negatif pada sel bakteri sehingga akan ada kenaikan arus pada material sensor yang dibuat [5], [6]. Material sensor dapat ditingkatkan kemampuannya dengan penambahan *Polyvinyl*

alcohol (PVA) dimana material PVA memiliki biokompatibilitas, kurang beracun, biodegradabilitas, dan kelarutannya dalam air yang dapat menghindari aglomerasi atau agregasi maka PVA sangat cocok untuk digunakan dalam berbagai aplikasi elektronik, optoelektronik, bioteknologi dan sebagainya [7].

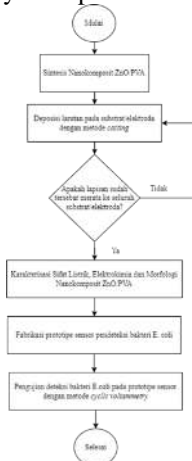
II. KAJIAN TEORI

ZnO (Zinc Oxide) berperan sebagai filler merupakan semikonduktor multifungsional yang termasuk ke dalam kelompok semikonduktor II-VI dengan band gap yang lebar sekitar 3,3 eV, memiliki energi ikat eksiton yang besar sekitar 60 meV, daya serap terhadap sinar UV yang efektif dan stabilitas kimia yang baik. Band gap yang lebar dan energi ikat eksiton yang besar inilah yang menjadikan ZnO sebagai semikonduktor yang fungsional dimana dapat diaplikasikan pada banyak bidang teknologi [7], [8]. PVA (Polyvinyl alcohol) yang berperan sebagai matriks merupakan suatu polimer berwarna putih yang tidak beracun, biokompatibel, tahan panas dan bersifat semi-kristal, dimana PVA juga polimer yang dapat larut dalam air dan telah digunakan secara luas sebagai matriks dari berbagai nano filler. PVA dikenal memiliki penghalang oksigen yang kuat karena memiliki ikatan hidrogen yang kuat dari kelompok hidroksil (OH) dalam PVA sehingga sifat mekanik dan listriknya akan dipengaruhi secara signifikan oleh kelembaban luar, kelarutan dan ketebalannya. Dibandingkan dengan bahan material umum lainnya PVA memiliki kekakuan, perpanjangan, dan ketahanan abrasi yang lebih baik [7], [9].

Berdasarkan sifat dan karakteristiknya dipilih material logam oksida ZnO (Zinc Oxide) untuk dijadikan material sensor, hal ini didasarkan oleh sifat dan karakteristiknya yang dapat dilihat dari band gap dan energi ikat eksiton yang besar, tidak beracun dan memiliki aktivitas elektrokimia yang baik [10]. Selain itu satu faktor yang penting yaitu penelitian yang menggunakan ZnO sebagai material sensor pendeteksi bakteri E. coli lebih banyak dilakukan dibandingkan dengan material logam oksida lain yang sangat jarang digunakan untuk mendeteksi bakteri E. coli.[2]–[4], [11], [12].

III. METODE

A. Diagram Alir Proyek Capstone



GAMBAR 1.

Diagram Alir Proyek Capstone Design

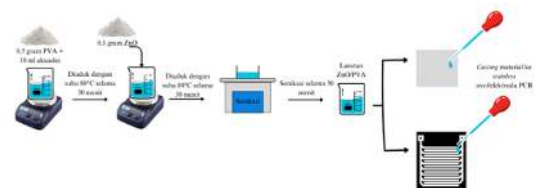
Gambar 1 menunjukkan tahapan pengerjaan proyek capstone design pembuatan prototipe sensor dalam bentuk flowchart. Pengerjaan dimulai dengan melakukan sintesis nanokomposit ZnO/PVA, kemudian dilakukan proses deposisi larutan nanokomposit ZnO/PVA di atas substrat kaca dan elektroda dengan metode spin-coating dan casting. Jika hasil deposisi tersebar merata maka dapat dilanjutkan sifat morfologi dengan FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) dan struktur kristal dengan XRD (X-Ray Diffraction). Setelah karakterisasi dilanjutkan dengan fabrikasi prototipe sensor berdasarkan desain yang telah dibuat. Tahapan terakhir yang dilakukan yaitu pengujian deteksi bakteri E. coli pada prototipe sensor yaitu dengan metode CV (Cyclic Voltammetry) dimana akan diamati reaksi oksidasi dan reduksi bakteri ketika kontak langsung dengan sensing film berupa thin film nanokomposit ZnO/PVA.

B. Sintesis Nanokomposit ZnO/PVA

Sintesis nanokomposit ZnO/PVA dilakukan dengan pembuatan larutan ZnO/PVA dengan menambahkan 0,5 gram PVA ke dalam 10 ml akuades lalu diaduk pada hot plate stirrer untuk diperoleh larutan PVA setelah itu ditambahkan 0,1 gram ZnO nanopowder ke dalam larutan PVA sebelumnya untuk dicampur dan diaduk lagi pada hot plate hingga diperoleh larutan ZnO/PVA yang homogen. Komposisi dan proses pembuatan larutan ZnO/PVA dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 2 di bawah.

TABEL 1. Komposisi Bahan Pembuatan Larutan ZnO/PVA

Bahan/Material	Komposisi
Poly(vinyl alcohol) (PVA) Sigma Aldrich (87-90% hydrolyzed, average mol wt 30,000-70,000)	0,5 gram
Zinc Oxide (ZnO) Sigma Aldrich (ZnO nanopowder <100 nm particle size)	0,1 gram
Akuades	10 ml



GAMBAR 2.

Proses Pembuatan Larutan ZnO/PVA

C. Karakterisasi Material dan Prototipe Sensor

Karakterisasi material yang dilakukan yakni karakterisasi FESEM, XRD, I-V dan elektrokimia sedangkan untuk karakterisasi pada prototipe sensor hanya dengan karakterisasi elektrokimia.

1. Karakterisasi Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)

Pengujian FESEM (Field Emission Scanning Electron Microscopy) dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Lanjut Cibinong – BRIN dengan menggunakan alat FESEM Thermo Scientific Quattro S. Preparasi sampel nanokomposit ZnO/PVA dilakukan dengan mendeposisi larutan ZnO/PVA yang telah dibuat sebelumnya ke substrat kaca berukuran 2,5

cm x 1,5 cm. Metode deposisi yang dilakukan yaitu *spin-coating* dengan menggunakan alat SCS 6800 *Spin Coater Series* di laboratorium Fisika Material Universitas Telkom. Sampel yang telah dipreparasi selanjutnya dikirim ke Laboratorium Karakterisasi Lanjut Cibinong – BRIN dan diberikan perlakuan tambahan berupa *coating* Au agar citra FESEM yang dihasilkan menjadi lebih jelas.

2. Karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD)

Preparasi sampel nanokomposit ZnO/PVA dilakukan dengan mendeposisi larutan ZnO/PVA ke substrat kaca berukuran 2,5 cm x 1,5 cm. Metode deposisi yang dilakukan yaitu *spin-coating* dengan menggunakan alat SCS 6800 *Spin Coater Series* di laboratorium Fisika Material Universitas Telkom, selanjutnya pengujian XRD (*X-Ray Diffraction*) dilakukan di Laboratorium Karakterisasi Lanjut Bandung – BRIN dengan menggunakan alat D8 Advance Eco (Bruker) Bragg-Bentano Diffraction.

3. Karakterisasi Sifat Listrik I-V

Pengujian sampel material nanokomposit ZnO/PVA dilakukan di Laboratorium Fisika Material Teknik Fisika Universitas Telkom dengan menggunakan alat Keithley 2400. Karakterisasi ini dilakukan untuk memperoleh hasil grafik atau kurva arus terhadap tegangan. Sampel material di-*casting* terlebih dahulu pada PCB sebelum dilakukan karakterisasi lalu selanjutnya dapat dihubungkan dengan Keithley untuk karakterisasi I-V.

4. Karakterisasi Sifat Elektrokimia *Cyclic Voltammetry*

Pengujian sampel material nanokomposit ZnO/PVA dilakukan di Laboratorium Fisika Material Teknik Fisika Universitas Telkom dengan menggunakan alat potensiostat *open source Rodeostat*. Preparasi sampel dilakukan dengan melakukan *casting* material ke *stainless steel* yang akan digunakan sebagai elektroda kerja pada pengujian elektrokimia dimana larutan elektrolit yang digunakan berupa Na₂SO₄ 1 M. Selanjutnya dilakukan karakterisasi pada *screen printed electrode* (SPE) untuk mengetahui apakah SPE yang dibuat dapat berfungsi dan dapat tersambung dengan baik pada potensiostat. Pada karakterisasi SPE digunakan larutan elektrolit berupa 0,1 M KCl + 5 mM K₃[F3(CN)₆] untuk melihat respon reduksi dan oksidasinya.

D. Pengujian Pendeteksian Bakteri *E. coli*

Pengujian pendeteksian bakteri *E. coli* dilakukan untuk melihat performa prototipe sensor dalam mendeteksi keberadaan bakteri. Preparasi prototipe sensor dilakukan dengan memodifikasi bagian elektroda kerja pada SPE dengan melakukan *casting* nanokomposit ZnO/PVA dengan mikro pipet dan dikeringkan pada *hotplate*. Konsentrasi bakteri yang digunakan bervariasi dari 10⁶ hingga 6x10⁶ CFU. Pengujian dilakukan dengan menyambungkan prototipe sensor berupa SPE dengan potensiostat *rodeostat* lalu sampel bakteri ditetaskan pada bagian *sensor chamber* untuk proses pendeteksian bakteri *E. coli*. Skema pengujian dapat dilihat pada gambar 3 di bawah.



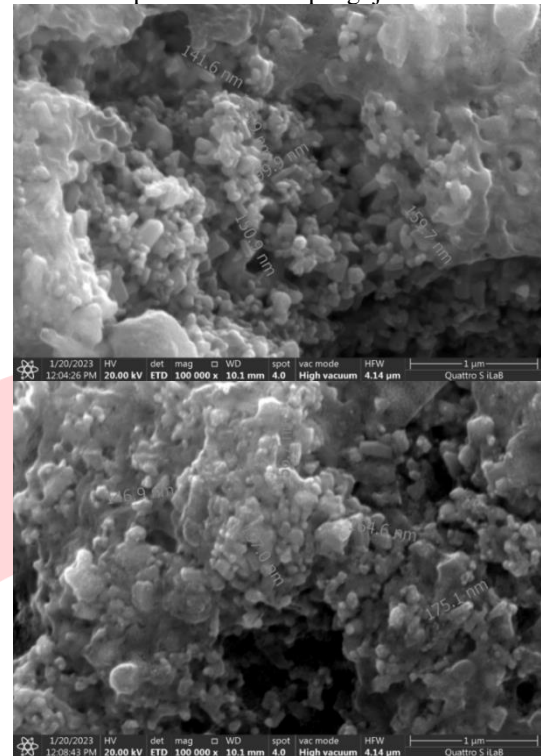
GAMBAR 3.

Skema Pengujian Pendeteksian Bakteri *E. coli*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Karakterisasi FESEM

Berikut merupakan hasil dari pengujian FESEM:



GAMBAR 4.

Hasil FESEM Nanokomposit ZnO/PVA

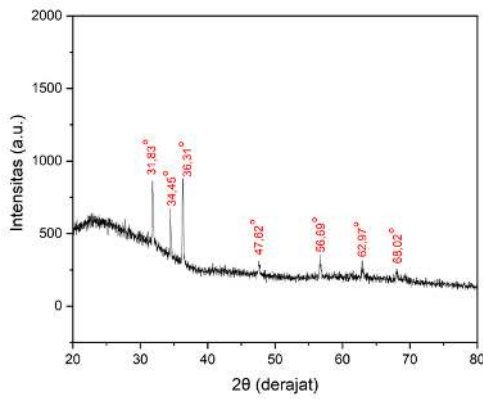
FESEM (*Field Emission Scanning Electron Microscopy*) adalah salah satu teknik untuk menganalisis morfologi suatu material yang berskala mikrometer dan nanometer. Hasil dari citra FESEM ditunjukkan pada gambar 4 dimana morfologi nanokomposit ZnO/PVA dengan perbesaran 100.000 kali menunjukkan bahwa nanopartikel ZnO tersebar merata pada matriks PVA. Nanopartikel ZnO yang tersebar berbentuk heksagonal *nanorod*. Adanya agglomerasi pada nanokomposit ZnO/PVA dapat disebabkan karena terdapat penambahan nanopartikel ZnO ke dalam matriks PVA [13], [14]. Ukuran partikel nanokomposit ZnO/PVA berdasarkan hasil citra FESEM yakni sekitar 137 nm hingga 199,9 nm.

B. Hasil Karakterisasi XRD

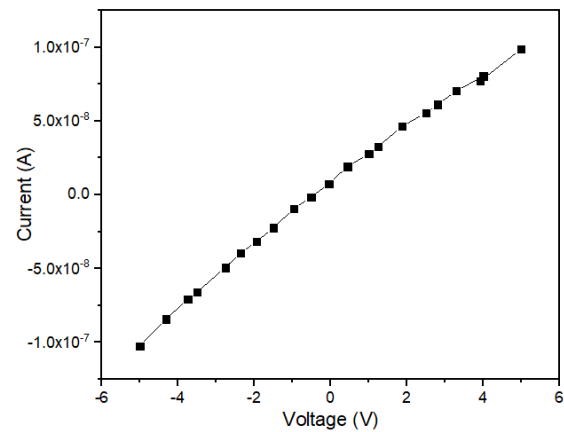
Berikut merupakan hasil dari karakterisasi XRD:

TABEL 2
Data XRD Nanokomposit ZnO/PVA

hkl	2θ	FWHM	Ukuran Kristal (nm)	d (Å)
100	31,830	0,100	86.28	2,809
002	34,459	0,100	86.87	2,600
101	36,317	0,101	86.45	2,471
102	47,621	0,130	69.76	1,908
110	56,697	0,100	94.28	1,622
103	62,975	0,100	97.30	1,474
112	68,027	0,120	83.41	1,377



GAMBAR 5. Pola XRD Nanokomposit ZnO/PVA



GAMBAR 6. Kurva I-V Nanokomposit ZnO/PVA

X-Ray Diffraction (XRD) adalah salah satu teknik yang digunakan untuk menganalisis kristalinitas suatu material yang didasarkan dari pola XRD. Pola ini dapat digunakan untuk menentukan ukuran kristal material yang diuji [15]. Berdasarkan hasil data dari pola XRD nanokomposit ZnO/PVA pada gambar 5 terdapat puncak difraksi yang berada pada $2\theta = 31,830^\circ; 34,459^\circ; 36,317^\circ; 47,621^\circ; 56,697^\circ; 62,975^\circ; \text{ dan } 68,027^\circ$ yang berkesesuaian dengan bidang (100), (002), (101), (110), (103) dan (112) secara berturut-turut dimana dapat diperoleh bahwa terdapat keberadaan ZnO (*Zinc Oxide*) dan hal ini didasari dengan JCPDS no. 36-1451 yang juga menunjukkan bahwa dari pola XRD tersebut ZnO mempunyai struktur kristal berupa *wurtzite* heksagonal [7], [16], [17].

Berdasarkan persamaan Scherrer dapat ditentukan ukuran kristal dari nanokomposit ZnO/PVA sebagai berikut:

$$D = \frac{K \lambda}{\beta \cos \theta} \tag{1}$$

Dimana D adalah ukuran kristal rata-rata, K merupakan konstanta Scherer (0,9), λ adalah panjang gelombang sinar-X (0,154 nm), β adalah nilai dari FWHM dan θ merupakan sudut difraksi. Tabel 2 menunjukkan ukuran hasil dari ukuran kristal rata-rata nanokomposit ZnO/PVA berdasarkan bidang hkl-nya. Besar rata-rata dari keseluruhan ukuran kristal bidang hkl-nya diperoleh sebesar 86,33 nm.

C. Hasil Karakterisasi I-V

Hasil pengujian kurva I-V ditunjukkan pada gambar 6 dibawah. Grafik atau kurva yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai arus yang dihasilkan berada pada rentang satuan -100 nA hingga 100 nA untuk tegangan -5 V hingga +5 V dan berbentuk kurva *ohmic* serta dapat dikategorikan sebagai semikonduktor.

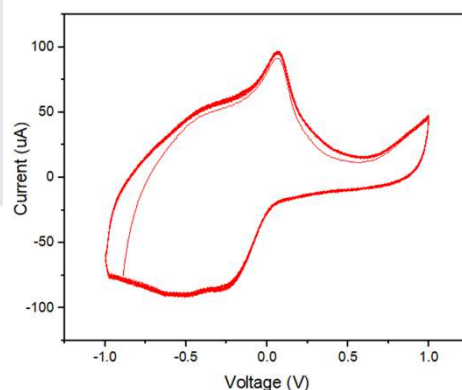
Untuk menentukan nilai resistansi dilakukan *linear fitting* untuk memperoleh nilai *slope* dengan menggunakan *software origin* dan diperoleh $slope = 1,985 \times 10^{-8}$ dimana *slope* juga dapat diperoleh sebagai nilai konduktansi dari material sedangkan untuk resistansi dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut :

$$R = \frac{1}{m} \tag{2}$$

Dimana R adalah resistansi dan m merupakan *slope* dari hasil *linear fitting*. Diperoleh nilai konduktansi sebesar $1,985 \times 10^{-8} \Omega^{-1}$ dan resistansinya sebesar $50,37 \times 10^6 \Omega$ atau 50,37 M Ω dimana dengan nilai resistansi yang besar ini maka arusnya akan sangat kecil sehingga dapat dikatakan bahwa nanokomposit ZnO/PVA sensitif terhadap besar tegangan yang diberikan, maka dari itu jika diaplikasikan untuk mendeteksi bakteri diharapkan dapat sensitif sesuai dengan hasil pengujian I-V yang telah dilakukan.

D. Hasil Karakterisasi Elektrokimia

Hasil pengujian CV nanokomposit ZnO/PVA sebagai elektroda kerja pada *stainless steel* ditunjukkan pada gambar 7 di bawah. Pengaturan parameter yang digunakan yaitu rentang tegangan ± 1 V, *scan rate* 100 mV/s dan jumlah *cycle*-nya sebanyak 30 serta menggunakan larutan elektrolit berupa larutan Na₂SO₄ (natrium sulfat) 1 M.

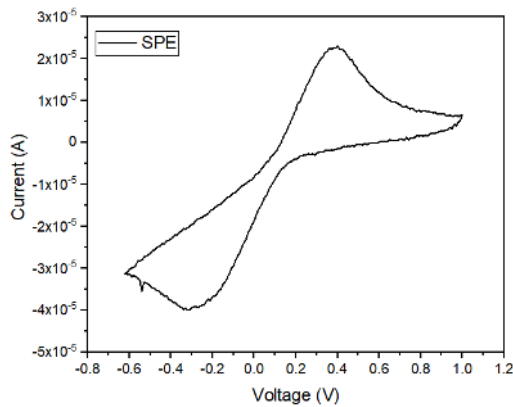


GAMBAR 7. Kurva CV Nanokomposit ZnO/PVA

Berdasarkan hasil grafik atau kurva CV yang telah diperoleh menunjukkan bahwa dengan *scan rate* 100 mV/s dan jumlah *cycle* sebanyak 30 menghasilkan grafik yang stabil dimana tidak terjadi fluktuasi atau sangat kecil fluktuasinya. Hal ini terlihat pada bentuk grafik yang tidak

berubah secara signifikan atau konstan meskipun telah dilakukan pengujian sebanyak 30 cycle. Hasil dari pengujian ini akan digunakan sebagai acuan untuk pengujian deteksi bakteri E. coli sehingga parameter yang dibutuhkan telah diperoleh dari hasil kinerja pengujian CV yang telah dilakukan.

Pengujian elektrokimia SPE menggunakan larutan $K_3[Fe(CN)_6]$ 5 mM dalam 0,1 M KCl dengan hasil grafik CV pada gambar 8.

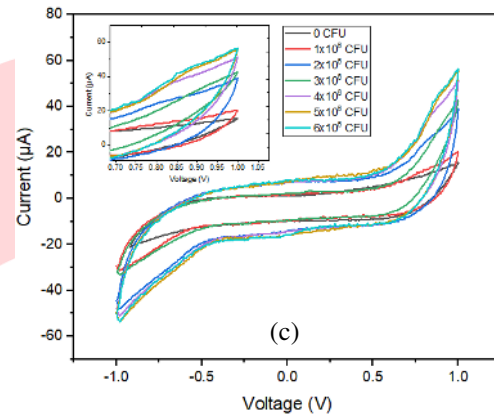
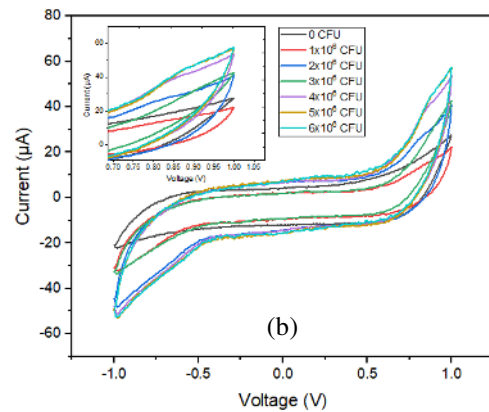
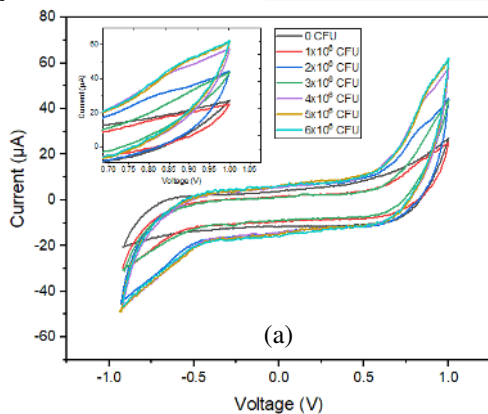


GAMBAR 8. Grafik CV Pengujian Elektrokimia SPE

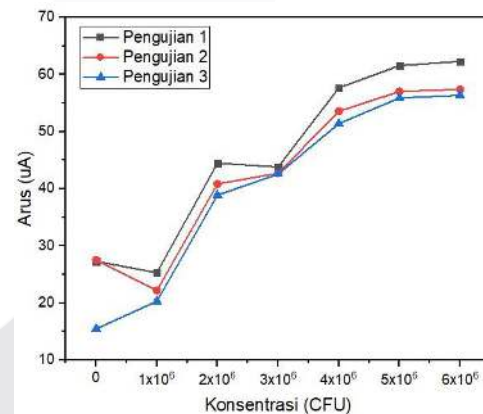
Pengaturan parameter yang digunakan yaitu rentang tegangan $\pm 0,5$ V, scan rate 100 mV/s dan jumlah cycle-nya sebanyak 1 untuk memeriksa apakah SPE dapat digunakan. Hasil pengujian menunjukkan terdapat puncak reduksi dan oksidasi dengan orde arus μA sehingga SPE yang dibuat dapat digunakan dan dapat terhubung dengan potensiostat serta selanjutnya dapat dimodifikasi bagian *working electrode* pada SPE dengan nanokomposit ZnO/PVA untuk aplikasi deteksi bakteri E. coli.

E. Hasil Pengujian Pendeteksian Bakteri E. coli

Hasil pengujian pendeteksian bakteri E. coli dapat dilihat pada gambar 9 di bawah ini.

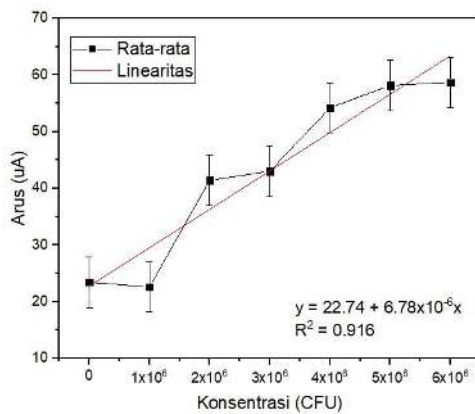


GAMBAR 9. (a), (b), (c) Grafik CV Pengujian Deteksi Bakteri E. coli 1-3 berurutan



GAMBAR 10. Perbandingan Hasil Arus Puncak Pengujian 1-3

Hasil pengujian deteksi bakteri terlihat pada gambar 9 yang menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan konsentrasi bakteri E. coli akan meningkatkan arus puncak yang dihasilkan. Kenaikan arus ini dapat dijelaskan karena adanya kehadiran dari sel-sel bakteri yang rusak akibat kontak atau bereaksi dengan permukaan elektroda kerja ZnO/PVA yang mana terjadi interaksi elektrostatik antara ZnO bermuatan positif dengan sel E. coli bermuatan negatif sehingga muncul muatan listrik dan adanya transfer elektron yang meningkatkan konduktivitas dan aliran arus dari elektroda kerja. Selain itu terdapat kebocoran ion dan sitoplasma dari bakteri ke lingkungan sekitarnya yang memungkinkan meningkatkan konduktivitas [11], [18]–[20].



GAMBAR 11.

Linearitas Arus Puncak Rata-rata terhadap Konsentrasi bakteri

Berdasarkan grafik CV hasil pengujian deteksi bakteri dilakukan analisis terhadap kenaikan arus puncak rata-rata yang dihasilkan dengan mem-plot menjadi grafik. Terlihat hasil plot grafik pada gambar 2.4 dapat diperoleh nilai linearitas sebesar 0,916 serta persamaan garis $y = (6,78 \times 10^{-6}x + 22,74) \mu A$ yang menunjukkan bahwa arus puncak akan meningkat seiring dengan pertambahan konsentrasi bakteri *E. coli* yang diuji. Nilai *slope* sebesar $6,78 \times 10^{-6}$ dan besar σ adalah 4,44, sehingga diperoleh LOD pada pengujian ini adalah sebesar $1,97 \times 10^6$ CFU yang artinya konsentrasi bakteri dalam paling kecil yang dapat dideteksi secara akurat yaitu sebesar $1,97 \times 10^6$ CFU.

V. KESIMPULAN

Prototipe sensor berbasis nanokomposit ZnO/PVA dengan ukuran dimensi kecil dan fleksibilitas yang baik serta dapat mendeteksi bakteri *E. Coli* telah berhasil difabrikasi dimana cara kerjanya ditunjukkan dengan adanya perubahan respon arus terhadap kenaikan konsentrasi bakteri. *Limit of Detection* yang diperoleh pada prototipe sensor yakni sebesar $1,97 \times 10^6$ CFU yang mana jika dibandingkan dengan sensor elektrokimia lain maupun dengan jenis alat deteksi masih sangat besar, hal ini disebabkan karena pengujian yang dilakukan pada prototipe sensor hanya berada pada rentang konsentrasi bakteri 10^6 hingga 6×10^6 yang masih dalam satu orde sehingga untuk pengembangan prototipe sensor kedepannya perlu dilakukan pengujian dengan konsentrasi bakteri yang lebih bervariasi rentang konsentrasinya dari 10^1 hingga 10^8 CFU untuk melihat kemampuan prototipe dalam mendeteksi keberadaan bakteri *E. coli* dalam konsentrasi yang sangat kecil.

Selain itu karena pengujian yang dilakukan menggunakan potensiostat *homemade* seperti rodeostat kemungkinan hasil yang diperoleh masih terdapat kekurangan sehingga juga perlu dilakukan pengujian pendeteksian dengan metode elektrokimia lain seperti DPV (*Differential Pulse Voltammetry*) menggunakan potensiostat yang berkualitas seperti Metrohm agar dapat menganalisis hasil pendeteksian dengan lebih baik.

REFERENSI

- [1] W. P. Rahayu, S. Nurjanah, and E. Komalasari, *Escherichia Coli : Patogenitas, Analisis dan Kajian Risiko*. Bogor: IPB Press, 2021.
- [2] S. Khan, Akrema, S. Qazi, R. Ahmad, K. Raza, and Rahisuddin, "In Silico and Electrochemical Studies for a ZnO-CuO-Based Immunosensor for Sensitive and Selective Detection of *E. coli*," *ACS Omega*, vol. 6, no. 24, pp. 16076–16085, Jun. 2021, doi: 10.1021/acsomega.1c01959.
- [3] S. Mutlaq *et al.*, "Conductometric Immunosensor for *Escherichia coli* O157:H7 Detection Based on Polyaniline/Zinc Oxide (PANI/ZnO) Nanocomposite," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 19, p. 3288, Sep. 2021, doi: 10.3390/polym13193288.
- [4] N. Jaiswal, C. M. Pandey, S. Solanki, I. Tiwari, and B. D. Malhotra, "An impedimetric biosensor based on electrophoretically assembled ZnO nanorods and carboxylated graphene nanoflakes on an indium tin oxide electrode for detection of the DNA of *Escherichia coli* O157:H7," *Microchim. Acta*, vol. 187, no. 1, p. 1, Jan. 2020, doi: 10.1007/s00604-019-3921-8.
- [5] A. Kareem, M. Al Maamori, and S. N. K. AL-Thomir, "Preparation and Characterization of Antimicrobial PVA / ZnO Nanocomposite for Biomaterial Applications," *JUBES*, vol. 26, no. 2, pp. 286–294, 2018.
- [6] B. Abebe, H. C. A. Murthy, E. A. Zereffa, and Y. Adimasu, "Synthesis and characterization of ZnO/PVA nanocomposites for antibacterial and electrochemical applications," *Inorg. Nano-Metal Chem.*, vol. 51, no. 8, pp. 1127–1138, 2021, doi: 10.1080/24701556.2020.1814338.
- [7] S. A. Khan, A. Rahman, and F. B. D. A. Ibrahim, "The impact of film thickness on the properties of ZnO/PVA nanocomposite film," *Mater. Res. Express*, vol. 8, no. 7, 2021, doi: 10.1088/2053-1591/abf081.
- [8] D. Ponnamma *et al.*, "Synthesis, optimization and applications of ZnO/polymer nanocomposites," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 98, no. January, pp. 1210–1240, May 2019, doi: 10.1016/j.msec.2019.01.081.
- [9] S. Padinhattayil and K. S. Rai, "PVA/GO-ZnO hybrid nanocomposites: Synthesis, Analysis and Applications," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 23, pp. 1982–1992, Jun. 2021, doi: 10.17485/IJST/v14i23.236.
- [10] J. M. George, A. Antony, and B. Mathew, "Metal oxide nanoparticles in electrochemical sensing and biosensing: a review," *Microchim. Acta*, vol. 185, no. 7, p. 358, Jul. 2018, doi: 10.1007/s00604-018-2894-3.
- [11] M. G. Al-Fandi *et al.*, "Direct electrochemical bacterial sensor using ZnO nanorods disposable electrode," *Sens. Rev.*, vol. 38, no. 3, pp. 326–334, Jun. 2018, doi: 10.1108/SR-06-2017-0117.
- [12] A. Pangajam, K. Theyagarajan, and K. Dinakaran, "Highly sensitive electrochemical detection of *E. coli* O157:H7 using conductive carbon dot/ZnO nanorod/PANI composite electrode," *Sens. Bio-Sensing Res.*, vol. 29, no. November 2019, p. 100317, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.sbsr.2019.100317.
- [13] M. M. Abutalib, "Effect of zinc oxide nanorods on the structural, thermal, dielectric and electrical properties of polyvinyl alcohol/carboxymethyl

- cellulose composites,” *Phys. B Condens. Matter*, vol. 557, no. January, pp. 108–116, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.physb.2019.01.018.
- [14] S. A. Khan, A. Rahman, H. Mokhtar, and N. Azam, “Characterization and application of nano-composite zinc oxide / poly vinyl alcohol thin-film in solar cell performance enhancement,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 9, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1007/s12206-022-04.
- [15] D. Titus, E. James Jebaseelan Samuel, and S. M. Roopan, “Nanoparticle characterization techniques,” in *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*, Elsevier, 2019, pp. 303–319. doi: 10.1016/B978-0-08-102579-6.00012-5.
- [16] K. D. Dejen, E. A. Zereffa, H. C. A. Murthy, and A. Merga, “Synthesis of ZnO and ZnO/PVA nanocomposite using aqueous Moringa Oleifera leaf extract template: antibacterial and electrochemical activities,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 464–476, Jan. 2020, doi: 10.1515/rams-2020-0021.
- [17] N. K. Sekar *et al.*, “Fabrication of Electrochemical Biosensor with ZnO-PVA Nanocomposite Interface for the Detection of Hydrogen Peroxide,” *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 18, no. 6, pp. 4371–4379, Jun. 2018, doi: 10.1166/jnn.2018.15259.
- [18] Q. kamil H. Al-Atafy’, J. D. M. Al-Janabi’, and B. A. A.-H. Al-Mayahi’, “Detection of E.coli O157 in water and food using nanosensor,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1999, no. 1, p. 012025, Sep. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1999/1/012025.
- [19] E. Ren, C. Zhang, D. Li, X. Pang, and G. Liu, “Leveraging metal oxide nanoparticles for bacteria tracing and eradicating,” *View*, vol. 1, no. 3, p. 20200052, Sep. 2020, doi: 10.1002/VIW.20200052.
- [20] Y. Jiang, L. Zhang, D. Wen, and Y. Ding, “Role of physical and chemical interactions in the antibacterial behavior of ZnO nanoparticles against E. coli,” *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 69, pp. 1361–1366, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.msec.2016.08.044.