

Prototipe Screen-Printed Carbon Electrode Dengan Modifikasi Material Nanokomposit ZnO/Pva/Cnc Untuk Mendeteksi Cadmium Pada Sampel Cairan

1st Siti Ashila Farikha Mayundri

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

ashilafarikh@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Abrar Ismardi

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

abrarselah@telkomuniversity.ac.id

2nd Asep Suhendi

Fakultas Teknik Elektro

Universitas Telkom

Bandung, Indonesia

suhendi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Zinc Oxide merupakan bahan nanokomposit semikonduktor yang marak digunakan untuk mendeteksi keberadaan logam berat. Sebagai bentuk peningkatan performa material, penggabungan *Cellulose Nanocrystal* (CNC) dengan ZnO/PVA telah berhasil dilakukan dan dikarakterisasi diatas *Screen Printed Carbon Electrode* untuk memisahkan ion cadmium yang terkandung pada sampel cairan. ZnO/PVA/CNC dikarakterisasi dengan Pengukuran I-V dan Spesifik Kapasitansi melalui *Cyclic Voltammetry*. Hasil pengukuran I-V menunjukkan penambahan 1,25 wt% CNC dapat meningkatkan konduktivitas dari ZnO-PVA. Selain itu, hasil *Cyclic Voltammetry* dari ZnO/PVA/CNC juga menunjukkan peningkatan luas area pada penambahan 1,25 wt% CNC pada nanokomposit ZnO-PVA. Dalam pendeteksian cadmium, ZnO/PVA/CNC melalui dua metode yaitu *Cyclic Voltammetry* dan *Square Wave Voltammetry* (SWV). Pada SWV hasil menunjukkan bahwa ZnO/PVA/CNC mampu mendeteksi cadmium 0- 80 ppm pada sampel cairan.

Kata kunci— nanokomposit, ZnO, CNC, semikonduktor, deteksi, cadmium

I. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan polutan yang paling banyak ditemukan pada lingkungan perairan. Logam berat pada lingkungan perairan meningkat seiring dengan meningkatnya aktivitas industri, pertanian, dan pertambangan di sekitar lingkungan perairan seperti sungai. Meskipun dalam konsentrasi yang kecil logam berat sudah dapat menjadi ancaman bagi makhluk hidup terutama dalam hal kesehatan. Logam Cadmium (Cd) menduduki posisi ketujuh dalam tingkat toksisitas tertinggi diantara logam berat yang ada di alam, dengan sumber yang sama seperti logam timbal, logam Cd dapat menyebabkan beberapa efek penyakit seperti kanker, bronkiolitis, emfisema, fibrosis, dan kerusakan tulang [1].

Mayoritas sensor pendeteksi logam berat yang ada saat ini pun memiliki harga yang terbilang relatif tinggi. Beberapa metode yang dilakukan untuk mendeteksi logam berat seperti spektrometri yaitu atomic absorption spectroscopy (AAS), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), UV-Vis spectroscopy X-ray fluorescence spectroscopy (XFS) dan inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) memerlukan waktu yang

lebih lama, serta biaya operasi dan instrumentasi yang tinggi. Meninjau hal tersebut, modifikasi terhadap metode pendeteksian logam berat saat ini mulai banyak dilakukan. Salah satu metode yang kini digunakan yaitu dengan sensor berbasis Screen Printed Electrode (SPE). Metode pengukuran yang dilakukan dengan menerapkan prinsip elektrokimia dengan menggunakan voltammetry, dimana pengukuran dilakukan dengan menerapkan set up tiga elektroda yaitu reference electrode (RE), working electrode (WE), dan counter electrode (CE). SPE memberikan solusi kemudahan pengaplikasian pengujian sampel yang lebih efektif. Dengan bentuk yang kecil dan fleksibel memungkinkan untuk dibawa serta memiliki biaya fabrikasi yang rendah menjadikan metode ini lebih baik dari segi manufakturabilitas dan ekonomi. Selain itu, mengingat keberadaan logam berat dengan konsentrasi kecil pun dapat membahayakan maka kehadiran ZnO/PVA/CNC pada SPCE menjadi solusi yang tepat untuk mendeteksi keberadaan logam berat dalam skala yang lebih kecil. Nanokomposit ZnO/PVA/CNC memiliki kelebihan seperti stabilitas kimia yang tinggi, biodegradable, listrik, optik, kekuatan mekanik yang baik, energi band-gap yang lebar (3.7 eV), selain itu nanokomposit ZnO/PVA/CNC tetap dapat bekerja dengan optimal meskipun pada kondisi yang tidak ambient [2]. Tentunya solusi ini juga akan memudahkan masyarakat dan lembaga pengelola air yang tinggal di kawasan industri sebagai langkah pendeteksian dan implementasi sederhana untuk mengelola kandungan logam berat dalam air.

II. KAJIAN TEORI

A. Zink Oksida

Zink Oksida merupakan salah satu material semikonduktor yang banyak digunakan dalam pengaplikasian pemurnian air. Nanopartikel Zink Oksida memiliki permukaan yang luas dan memiliki permukaan celah dalam jumlah yang besar sehingga dapat meningkatkan sensitivitas material [3]. Nanopartikel Zink Oksida juga memiliki aktivitas elektrokimia yang tinggi dan batas deteksi yang rendah. Hal ini menguntungkan untuk pengukuran konsentrasi logam berat dalam jumlah yang kecil. Selain itu Zink Oksida juga memiliki kemampuan kapasitas penyerapan yang besar dan memiliki celah pita yang lebar 3.3 eV. Dimana dengan celah pita yang lebar dapat menghasilkan

efisiensi fotokatalitik yang baik untuk memisahkan dan mengurangi logam berat. Keunggulan lainnya seperti struktur tipe wurtzite menyebabkan zink oksida stabil dalam ambient condition. Zink Oksida juga sudah diakui oleh Food & Drug Administration (FDA) sebagai salah satu logam oksida yang bisa digunakan dalam industri makanan, hal tersebut dapat menunjukkan bahwa zink oksida merupakan material yang tidak berbahaya untuk digunakan.

B. Polyvinyl Alcohol

Polyvinyl Alcohol merupakan polimer terlarut dan dapat terurai yang memiliki kompatibilitas tinggi serta tidak beracun. PVA terbuat dari etilena, gas alam yang diproduksi oleh tumbuhan. Polivinil alcohol memiliki rantai karbon dengan gugus hidroksil yang mana merupakan bagian kutub dan dapat membentuk listrik statis dalam ikatan hydrogen dengan logam oksida sehingga membentuk interaksi antarmuka yang kuat. PVA juga memiliki tingkat hidrofilitas yang tinggi untuk meningkatkan pembesaran rasio dan kapasitas penyerapan untuk ion logam dibandingkan dengan polimer lainnya seperti polyethylene dan polypropylene [4]. Selain itu, PVA memiliki kestabilan termal yang baik yang berguna untuk mencegah degradasi atau pelelehan selama fabrikasi nanokomposit untuk pendeteksian ion logam. PVA juga memiliki banyak gugus hidroksil yang dapat meningkatkan sensitivitas untuk mendeteksi logam berat.

C. Cellulose Nanocrystal

Cellulose Nanocrystal merupakan material nanotruktur yang terdiri dari rantai glukosa yang tersusun secara kristalin. Cellulose Nanocrystal termasuk kedalam cellulose nanomaterial bersama Cellulose Nanofiber (CNF). Beberapa keunggulan CNC dibandingkan dengan CNF ialah memiliki ukuran yang lebih kecil, kristalisasi yang lebih kuat sehingga mencegah degradasi selama proses pendeteksian dan memiliki potensi modifikasi lebih besar [5]. CNC bersumber dari serat tumbuhan atau polisakarida bakteri. Cellulose Nanocrystal memiliki beberapa keunggulan seperti kristanilitas yang tinggi, kekuatan yang baik, luas permukaan yang besar. CNC juga memiliki struktur dengan kehadiran gugus hidroksil yang tinggi sehingga membantu meningkatkan afinitas ketika melakukan pendeteksian ion logam berat.

D. Screen Printed Electrode

Screen Printed Electrode merupakan jenis elektroda yang biasa digunakan untuk aplikasi biosensor elektrokimia. Mereka dibuat menggunakan sablon, sebuah metode di mana tinta konduktif ditumpuk lapis demi lapis menggunakan beberapa bingkai layar. Dimana terdapat 3 elektroda yang akan bekerja dalam SPE yaitu working electrode, counter electrode dan reference electrode. SPE juga memiliki keunggulan seperti biaya rendah, fleksibilitas desain, reproduktifitas proses dan elektroda yang tinggi, kemampuan untuk membuat dengan bahan yang berbeda, dan kemampuan untuk memodifikasi permukaan kerja [6]. Setiap electrode memiliki peran sebagai berikut:

1. Working electrode, memiliki responnya sensitif terhadap konsentrasi analit.
2. Reference electrode, merupakan tempat dimana tegangan tetap konstan selama proses serta menjadi titik

acuan untuk mengukur tegangan pada working electrode.

3. Counter electrode, terjadi proses yang berkebalikan pada working electrode serta menyeimbangkan reaksi redoks pada working electrode.

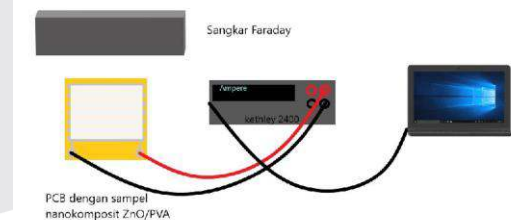
III. METODE

A. Sintesis Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

Dalam pembentukan larutan ZnO-PVA-CNC ditunjukkan pada Gambar 2.6 dimana diperlukan Zinc Oxide Nanopowder 0.1 gram yang dilarutkan ke dalam aquades dan sebanyak 1.5 gram Polyvinyl Alcohol (PVA) dilarutkan dengan aquades secara terpisah dengan larutan Zinc Oxide. Pengadukan kedua larutan dilakukan dengan masing-masing dilakukan selama 30 menit dalam suhu 80°C. Setelah melalui proses pengadukan, kedua larutan dicampurkan lalu diaduk kembali dalam suhu 80°C selama 30 menit. Penambahan Cellulose Nanocrystal pada larutan ZnO-PVA akan dibedakan menjadi 3 konsentrasi yaitu 1.25 wt%, 1.5 wt%, dan 2 wt%. Setelah mendapatkan larutan ZnO-PVA, komponen material Cellulose Nanocrystal (CNC) ditambahkan lalu diaduk selama 1 jam

B. Karakterisasi Sifat Listrik Thin Film Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

Karakterisasi sampel dilakukan dengan mengendapkan nanokomposit menggunakan metode spin coating pada PCB agar sampel merata pada lapisan sampel pada PCB, selanjutnya akan langsung dikarakterisasi dengan kethley, PCB akan ditempelkan pada 2 pin pada plat tembaga. Kemudian ditempatkan di sangkar faraday dan kethley dihubungkan ke gerendel yang terpasang. Struktur pengujian lapisan tipis pada PCB terdiri dari dua komponen utama yaitu alas berupa PCB berukuran 18,5 x 16,5 mm dengan ukuran wire 13 x 0,7 mm dan jarak antar kabel adalah 0,2 mm. Sampel *thin film* nanokomposit ZnO/PVA/CNC selanjutnya diberikan tegangan *swipe* -5 hingga 5 volt.

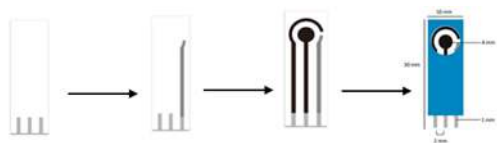


GAMBAR 3.1.

Proses Karakterisasi I-V Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

C. Fabrikasi Screen Printed Carbon Electrode

Desain SPCE dibuat dengan menggunakan aplikasi graphic design Corel Draw X7 dengan ketentuan jumlah layer adalah 4 serta ukuran desain adalah 10 x 30 mm, diameter working electrode 4 mm,



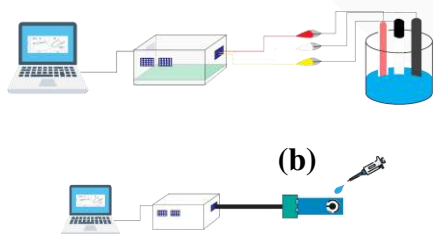
GAMBAR 3.2.

Proses Pembuatan Screen Printed Carbon Electrode

Selanjutnya adalah pembuatan screen pencetak untuk masing-masing layer dengan bahan screen mesh yang digunakan adalah berbahan polyester dengan screen mesh 77. Tahap selanjutnya adalah pencetakan SPCE dengan menggunakan mesin printing de Haart model SPSA 10, proses pertama dari pencetakan SPCE adalah layer kaki elektroda dengan menggunakan pasta perak (Ag) dengan proses satu kali sapuan kemudian dikeringkan pada suhu 136°C selama 30 menit, setelah kaki elektroda mengering dilanjutkan dengan pencetakan working dan counter electrode dengan menggunakan pasta karbon satu kali sapuan dan dikeringkan pada suhu 60°C selama 30 menit, selanjutnya pencetakan reference electrode menggunakan pasta Ag/AgCl satu kali sapuan dan dikeringkan pada suhu 50°C selama 30 menit, terakhir lapisan enkapsulasi dengan menggunakan pasta dielektrik satu kali sapuan dikeringkan pada suhu 130°C selama 30 menit.

D. Cyclic Voltammetry

Untuk melakukan pengujian prototipe dan mengetahui respon elektrokimia dari prototipe SPCE, terdapat 3 elektroda yaitu reference electrode, working electrode, dan counter electrode yang tersambung dengan potensiostat kemudian SPCE akan dilakukan karakterisasi di dalam larutan elektrolit ada range tegangan -1.0 sampai 1.0 V sebanyak 1 cycle dengan scan rate 100 mV/s untuk dilihat apakah SPE terutama pada area working electrode dapat bekerja dengan baik dalam melakukan reaksi redoks. Setelah berhasil dikarakterisasi selanjutnya akan masuk ke tahap pengujian pendeteksian dengan menggunakan larutan logam berat cadmium pada range tegangan -2.0 V sampai 2.0 V dengan scan rate 0.1 V/s [15] dengan variasi konsentrasi cadmium mulai dari 0, 20, 40, 60, 80 ppm. Dalam melakukan pengujian cyclic voltammetry terdapat beberapa parameter yang dapat mempengaruhi hasil akhirnya seperti elektrolit yang digunakan, waktu deposisi, konsentrasi objek, dan scan rate yang digunakan.



GAMBAR 3.3

Proses Cyclic Voltammetry dengan metode (a) Glassy Carbon Electrode dan (b) Screen Printed Carbon Electrode

E. Square wave Voltammetry

Sampel nanokomposit ZnO-PVA-CNC akan di drop casting pada bagian working electrode sebanyak $2.5 \mu\text{L}$ dengan menggunakan mikropipet. Hal ini bertujuan untuk

memodifikasi kemampuan working electrode bekerja dengan penggunaan nanokomposit yang dimiliki. Kemudian SPCE yang telah dimodifikasi akan melalui proses pengeringan selama 2-3 menit dalam suhu 45°C hingga sampel pada bagian working electrode mengering. Untuk metode pengujian SPCE yang telah termodifikasi akan dilakukan dengan beberapa konsentrasi cadmium yang berbeda dalam 500 mL volume air. SPCE akan diuji untuk mendeteksi logam berat Cadmium dalam ukuran 0, 20, 4, 60, dan 80 ppm.

Setelah mempersiapkan SPE dan konsentrasi cadmium yang diperlukan, pada tahap pengujian Screen Printed Carbon Electrode (SPCE) yang telah termodifikasi akan ditetesi analit dengan volume $60 \mu\text{L}$. Pengukuran ini menggunakan "Rodeostat: Open Source Potensiostat" untuk mengukur konsentrasi logam berat dengan cara mengukur arus listrik pada SPCE ketika diberikan tegangan listrik.

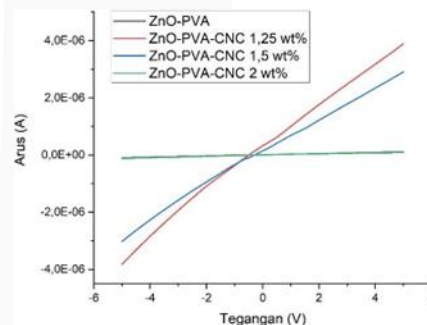
TABEL 3.1.

Spesifikasi Pengukuran dengan Square Wave Voltammetry

<i>Square Wave Frequency (Sample Rate)</i>	25 Hz
<i>Potential</i>	-2.0 V to -0.2 V
<i>Square Wave amplitude</i>	0.05 V
<i>ΔE step</i>	5 mV
<i>Quiet Value</i>	-0.4 V
<i>Quiet Time</i>	40 ms

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakterisasi Konduktivitas Thin Film ZnO/PVA/CNC



GAMBAR 4.1.

Grafik I-V Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

Dari hasil pengujian thin film ZnO/PVA/CNC diketahui bahwa arus yang didapatkan semakin kecil seiring dengan penambahan konsentrasi material CNC yaitu 1.25 wt%, 1.5 wt% dan 2 wt%. Dari grafik I-V yang ditampilkan didapatkan nilai konduktivitas pada masing-masing sampel sebagai berikut.

TABEL 4.1.

Nilai Konduktivitas Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

Sampel	Konduktivitas (S)	Resistansi (Ohm)
ZnO-PVA	$1,98 \times 10^{-8}$	$5,05 \times 10^7$
ZNO-PVA-CNC 1,25 wt%	$7,5 \times 10^{-7}$	$1,33 \times 10^6$
ZNO-PVA-CNC 1,5 wt%	$5,75 \times 10^{-7}$	$1,74 \times 10^6$

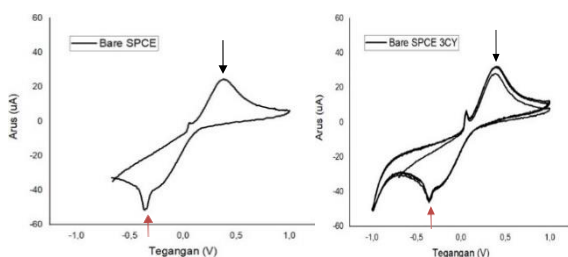
ZNO-PVA-CNC 2 wt%	$3,3 \times 10^{-8}$	$3,03 \times 10^7$
----------------------	----------------------	--------------------

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat terlihat bahwa dengan adanya penambahan cellulose nanocrystal sebesar 1,25wt% pada Nanokomposit ZnO-PVA menaikkan electrical properties. Kenaikan nilai konduktivitas ini dikarenakan CNC dapat bertindak sebagai tempat untuk Zinc Oxide berkembang. Selain itu, akibat penambahan CNC ini juga dapat merubah muatan permukaan dari zinc oxide sehingga dapat meningkatkan transport electron dan perubahan band gap (Modi & Fulekar, 2020). Dengan adanya penggabungan Zinc Oxide sebagai metal oxide dengan cellulose menghasilkan lapisan yang mampu menghantarkan listrik dengan baik dan transparansi yang tinggi (Zhang et al., n.d.). Dalam beberapa publikasi penelitian dikatakan bahwa cellulose berperan untuk zat konduktif dan membantu menjaga konektivitas serta berkontribusi dalam fleksibilitas komposit. Dalam penelitian Lee et al., 2014 menjelaskan bahwa untuk beberapa kasus tertentu adanya sifat kristal dapat bertindak sebagai penopang yang membantu bahan konduktif tetap utuh untuk menjadi kontributor kontinu terhadap aliran arus.

Namun seiring adanya penambahan konsentrasi cellulose nanocrystal terjadi penurunan nilai konduktivitas. Hal ini dikarenakan Cellulose Nanocrystal merupakan material yang terisolasi secara elektrik (Abushammala & Mao, 2023). Dimana ketika suatu bahan memiliki sifat insulator maka muatan listrik akan semakin sulit untuk lewat dengan bebas, oleh karena sifatnya maka CNC merupakan material dielektrik atau dapat dikatakan bahwa dengan tingginya konsentrasi CNC pada suatu nanokomposit dapat memblokir atau mengganggu transfer electron antara nanopartikel zinc oxide (Wasim et al., 2021). Selain itu, semakin kecil konsentrasi CNC maka nilai konduktivitasnya akan semakin besar (Chen et al., 2021). Sehingga penambahan material yang bersifat insulator seperti Cellulose Nanocrystal menyebabkan penurunan nilai konduktivitas.

B. Karakterisasi Screen Printed Carbon Electrode

Hasil karakterisasi SPCE dengan metode Cyclic Voltammetry yang dilakukan dengan meneteskan 60-70 μ l larutan larutan 0.1M KCL + 5mM $K_3[Fe(CN)_6]$ pada lingkaran SPCE seperti yang ditunjukkan Gambar xx akan memunculkan dua puncak utama yaitu puncak oksidasi dan juga reduksi yang mengindikasikan reaksi dan transfer elektron yang terjadi pada elektroda, kemudian dengan dilakukan pengulangan sebanyak 3 siklus untuk melihat tingkat kekokohan dari SPCE terlihat pola berulang pada titik puncak yang hampir sama, sehingga dapat dikatakan SPCE yang telah dibuat sudah layak guna untuk melakukan pendeteksian.

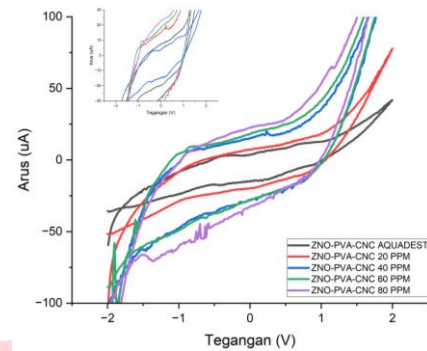


GAMBAR 4.2.

Hasil Cyclic Voltammetry untuk Karakterisasi Screen Printed Carbon Electrode

C. Pendeteksian Logam Berat Cadmium

C.1. Cyclic Voltammetry

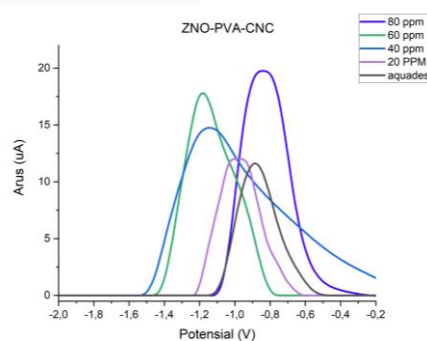


GAMBAR 4.3.

Hasil Cyclic Voltammetry untuk Pendeteksian Cadmium dengan Modifikasi Nanokomposit ZnO/PVA/CNC

Pada pendeteksian menggunakan cyclic voltammetry, hasil menunjukkan bahwa seiring bertambahnya konsentrasi cadmium terjadi kenaikan arus pada setiap pendeteksian, hal ini menunjukkan bahwa working electrode berhasil mendeteksi sesuatu sehingga terjadi kenaikan arus. Namun pada metode ini, puncak oksidasi sebagai indikasi pendeteksian logam berat tidak terlihat. Hal ini mungkin terjadi dikarenakan penggunaan rodeostat sebagai alat instrument yang bekerja sebagai potensiostat. Instrument ini memiliki tingkat sensitivitas yang lebih rendah dibandingkan potensiostat komersil. Beberapa kemungkinan tidak munculnya puncak oksidasi dikarenakan rodeostat tidak bisa mendeteksi ketika SPE diberikan modifikasi nanokomposit ZnO/PVA/CNC.

C.2. Square Wave Voltammetry



GAMBAR 4.4.

Hasil SWV Nanokomposit Zno/PVA/CNC dalam Pendeteksian Cadmium

Pada pendeteksian dengan metode Square Wave Voltammetry, hasil menunjukkan terjadi lonjakan puncak arus ketika SPE melakukan pendeteksian, Puncak arus ini menandakan kehadiran logam berat pada rentang tertentu. Tren juga menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi cadmium yang diberikan semakin tinggi pula puncak arus yang didapatkan. Hal ini dikarenakan working electrode menangkap lebih banyak ion cadmium. Untuk pendeteksian yang dilakukan, logam cadmium ditemukan pada rentang voltase -1,25 Volt hingga 0,7 Volt. Terjadinya pergeseran puncak pada pendeteksian ini dapat disebabkan oleh kontaminasi yang terjadi pada permukaan SPE, perlu diketahui bahwa pencetakan SPE masih melalui proses

manual dengan bantuan manusia. Sehingga kemungkinan kontak kontaminan yang ada pada SPE juga lebih tinggi dibandingkan pencetakan dengan mesin komersil yang lebih otomatis.

V. KESIMPULAN

Karakterisasi SPE tanpa modifikasi menggunakan pengukuran cyclic voltammetry (CV) untuk menentukan kelayakan dari SPE untuk digunakan pada pendeteksian dengan indikasi kemunculan puncak oksidasi dan reduksi dengan bentuk grafik “duck-shaped voltammogram”. Selanjutnya pengujian cadmium dengan konsentrasi 0, 20, 40, 60, 80 ppm telah dilakukan dengan menggunakan metode CV dan SWV untuk mempelajari sifat elektrokimia serta pendeteksian material terhadap logam berat. Hasil menunjukkan metode Square Wave Voltammetry memiliki hasil yang lebih baik untuk mendeteksi keberadaan logam berat dengan modifikasi Nanokomposit ZnO/PVA/CNC. Dapat dikatakan bahwa material nanokomposit ZnO/PVA/CNC memiliki potensi untuk dapat dijadikan sebagai modifikator yang dapat melakukan pendeteksian logam berat pada skala kecil.

REFERENSI

- [1] V. Dhiman and N. Kondal, “ZnO Nanoadsorbents: A potent material for removal of heavy metal ions from wastewater,” *Colloids and Interface Science Communications*, vol. 41. Elsevier B.V., Mar. 01, 2021. doi: 10.1016/j.colcom.2021.100380.
- [2] S. A. Khan et al., “Performance investigation of ZnO/PVA nanocomposite film for organic solar cell,” in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2615–2621. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.197.
- [3] W. Zhang and E. P. C. Lai, “Electrochemical detection of zinc oxide nanoparticles in water contamination analysis based on surface catalytic reactivity,” *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 22, no. 5, May 2020, doi: 10.1007/s11051-020-04823-9.
- [4] C. F. Mok, Y. C. Ching, F. Muhamad, N. A. Abu Osman, N. D. Hai, and C. R. Che Hassan, “Adsorption of Dyes Using Poly(vinyl alcohol) (PVA) and PVA-Based Polymer Composite Adsorbents: A Review,” *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 28, no. 3. Springer, pp. 775–793, Mar. 01, 2020. doi: 10.1007/s10924-020-01656-4.
- [5] J. A. Buledi, S. Amin, S. I. Haider, M. I. Bhanger, and A. R. Solangi, “A review on detection of heavy metals from aqueous media using nanomaterial-based sensors,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 42. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 58994–59002, Nov. 01, 2021. doi: 10.1007/s11356-020-07865-7.
- [6] R. R. Suresh et al., “Fabrication of screen-printed electrodes: opportunities and challenges,” *Journal of Materials Science*, vol. 56, no. 15. Springer, pp. 8951–9006, May 01, 2021. doi: 10.1007/s10853-020-05499-1.
- [7] S. Modi and M. H. Fulekar, “Synthesis and characterization of zinc oxide nanoparticles and zinc oxide/cellulose nanocrystals nanocomposite for photocatalytic degradation of Methylene blue dye under solar light irradiation,” *Nanotechnology for Environmental Engineering*, vol. 5, no. 2, Aug. 2020, doi: 10.1007/s41204-020-00080-2.
- [8] H. Zhang, C. Dou, L. Pal, and M. A. Hubbe, “Review of Electrically Conductive Composites and Films Containing Cellulosic Fibers or Nanocellulose.”
- [9] H. Abushammala and J. Mao, “Novel Electrically Conductive Cellulose Nanocrystals with a Core-Shell Nanostructure Towards Biodegradable Electronics,” *Nanomaterials*, vol. 13, no. 4, Feb. 2023, doi: 10.3390/nano13040782.
- [10] M. Wasim et al., “An overview of Zn/ZnO modified cellulosic nanocomposites and their potential applications,” *Journal of Polymer Research*, vol. 28, no. 9. Springer Science and Business Media B.V., Sep. 01, 2021. doi: 10.1007/s10965-021-02689-6.
- [11] P. Y. Chen et al., “Enhanced electrical and thermal properties of semi-conductive PANI-CNCs with surface modified CNCs,” *RSC Adv*, vol. 11, no. 19, pp. 11444–11456, Mar. 2021, doi: 10.1039/d0ra10663a.