

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

* Catatan: Sub-judul tidak perlu dimasukkan

1st Mukhammad Fahlevi Ali Rafsanjani
S1-Teknik Fisika, Fakultas Teknik
Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indoensia
rozakalfi@student.telkomuniversity.ac.i
d

2nd Abrar Ismardi
S1-Teknik Fisika, Fakultas Teknik
Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indoensia
abranselah@telkomuniversity.co.id

3rd Asep Suhendi
S1-Teknik Fisika, Fakultas Teknik
Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indoensia
suhendi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Penelitian ini menghasilkan prototipe elektroda karbon screen printed electrode (SPE) dengan nanokomposit ZnO/PVA/Graphene termodifikasi untuk deteksi logam berat kadmium dalam sampel cair. Logam berat seperti kadmium merupakan polutan serius di lingkungan perairan. Prototipe SPE dirancang dan diproduksi dengan hemat biaya, dan hasilnya menunjukkan kualitas yang cukup untuk mendeteksi kadmium. Nanokomposit ZnO/PVA dipilih karena stabilitas kimianya yang tinggi, mobilitas elektronik, dan kapasitas adsorpsi logam berat. Menambahkan graphene ke nanokomposit ditemukan untuk meningkatkan respons saat ini, menunjukkan peningkatan kemampuan untuk menyerap logam berat. Metode elektrokimia dengan teknik voltmeter digunakan dalam pengukuran. Karakterisasi sifat kelistrikan nanokomposit Uji elektrokimia menggunakan metode cyclic voltmeter (CV) dan square wave voltmeter (SWV) untuk menguji respon arus terhadap perubahan konsentrasi kadmium. Hasil pengujian menunjukkan respon linier terhadap konsentrasi kadmium dan sensitivitas pada nanokomposit ZnO/PVA/Graphene. Dengan perbandingan kinerja dan biaya, prototipe SPE yang dikembangkan memiliki potensi untuk digunakan untuk mendeteksi kandungan logam berat dalam sampel cair dengan cara yang lebih hemat biaya.

Kata kunci— Screen Printing, ZnO/PVA, Graphene, Kadmium, Nanokomposit, Prototipe

I. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan polutan yang banyak ditemukan di lingkungan perairan. Meningkatnya logam berat seiring dengan tingginya aktivitas industri, pertanian, dan pertambangan di sekitar lingkungan perairan seperti sungai. *Cadmium* (Cd) merupakan salah satu logam berat dengan tingkat toksisitas yang paling tinggi dibandingkan dengan logam berat lainnya [1]. *Cadmium* disebut polutan yang berbahaya karena berasal dari perpaduan metalurgi, pertambangan yang mana berdampak buruk bagi lingkungan. Menurut standar baku mutu kesehatan lingkungan, parameter kimia media air untuk keperluan higiene sanitasi,

kandungan maksimum Cd yaitu 0.005 mg/l[2]. Dengan sumber yang sama seperti logam timbal, logam Cd dapat menyebabkan beberapa efek penyakit seperti kanker, bronkiolitis, emfisema, fibrosis, dan kerusakan tulang[3]. Kondisi air sekarang yang berada di lingkungan masyarakat dapat dikatakan tidak memenuhi standar baku mutu kesehatan lingkungan, disebabkan oleh jumlah akumulatif logam berat yang telah melebihi standar, sehingga berbahaya jika kandungan logam berat terakumulasi masuk ke dalam tubuh makhluk hidup. Air yang baik dan dapat digunakan untuk aktivitas sehari-hari yaitu tidak berasa dan tidak berbau[4]. Akan tetapi faktanya salah satu lingkungan perairan seperti Sungai Citarum yang sering kali digunakan untuk aktivitas masyarakat sudah tidak lagi memenuhi standar baku mutu kesehatan lingkungan yang disebabkan oleh tingginya kandungan logam berat salah satunya yaitu logam berat *Cadmium*. Mayoritas sensor pendeteksi logam berat yang ada saat ini pun memiliki harga yang terbilang relatif tinggi. Banyak metode yang dilakukan untuk mendeteksi logam berat seperti spektrometri yaitu AAS, ICP-MS, UV-Vis *spectroscopy*, X-ray *fluorescence spectroscopy* (XFS) dan 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. Dengan basis penggunaan sekali pakai (*single-use disposable sensor*), metode sensor ini dapat mengurangi

masalah kontaminasi atau biofouling serta mengurangi biaya operasional seperti perbaikan sensor[5]. Selain itu, mengingat keberadaan logam berat dengan konsentrasi kecil pun dapat membahayakan maka SPE menjadi solusi yang tepat untuk mendeteksi keberadaan logam berat dalam skala yang lebih kecil. Kemudian penggunaan nanokomposit ZnO/PVA/Graphene dalam pembuatan prototipe dikarenakan penambahan Graphene memiliki keuntungan dari sifatnya yang unik seperti luas permukaan yang besar, memiliki banyak situs aktif yang dapat menyerap logam berat, biaya rendah, dan cocok dengan berbagai metode [6-7]. Tentunya solusi ini juga akan memberikan kemudahan bagi masyarakat dan instansi pengelola air yang menetap pada daerah industri sebagai langkah pendeteksian yang sederhana dan eksekusi pengelolaan kandungan logam berat pada air.

II. KAJIAN TEORI

A. Zink Oksida

Material yang saat ini umum digunakan dalam pembuatan sensor adalah ZnO, hal ini dikarenakan oleh mudahnya untuk diproduksi, harga yang murah, dan material yang aman digunakan. Selain itu, dengan melakukan modifikasi terhadap bentuk ZnO dapat dihasilkannya sifat fisik dan kimia yang tidak sama[8]. Sehingga inilah keunggulan menggunakan ZnO sebagai bahan atau material sensor. ZnO juga mempunyai kinerja fotokatalitik yang baik dalam menentukan logam berat dan memiliki luas permukaan yang bertanggung jawab menarik muatan positif pada logam berat[9]. Zink Oksida memiliki kapasitas adsorpsi yang tinggi sehingga dapat melakukan penyerapan yang tinggi terhadap logam berat[10].

B. Polyvinyl Alkohol (PVA)

PVA adalah polimer dari bahan baku *vinylon* yang banyak di produksi dengan harga murah. PVA sendiri memiliki banyak keunggulan mulai dari ketahanan yang tinggi, biokompabilitas, daya Tarik tinggi, dan sifat degradasi. Hal yang sangat penting bagi PVA adalah dapat dijadikan sebagai Adsorben untuk ion pada logam berat[11]. Selain itu PVA mempunyai banyak gugus hidroksil yang membantu meningkatkan kapasitas penyerapan logam berat pada material lain apabila di kombinasi[12].

C. Graphene

Graphene adalah lapisan atom tunggal dari atom karbon yang disusun dengan pola heksagonal. Banyak keunggulan dari graphene karena mempunyai sifat-sifat yang unik, seperti luas permukaan yang besar, mobilitas elektron yang tinggi, dan dapat meningkatkan konduktivitas termal[13]. Graphene memiliki potensi untuk dijadikan sebagai elemen sensor terutama sensor elektrokimia karena harganya yang murah, dan cocok dengan berbagai metode. Untuk mendeteksi logam berat Graphene memiliki luas permukaan yang besar dan memiliki situs aktif yang bertanggung jawab untuk penyerapan yang lebih kuat dengan kelompok fungsional yang mempunyai kemampuan membentuk ikatan khusus dengan ion logam sehingga dapat menyerap logam berat dengan efisien[6]. Selain itu menggabungkan *graphene* dengan material lain dapat memberikan keunggulan pada luas permukaan yang jauh lebih baik dari pada *Bulk Material*[7].

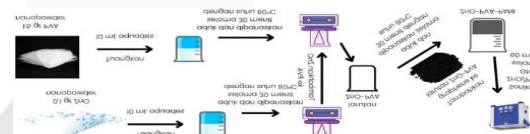
D. Screen Printed Carbon Electrode

Screen Printed Electrode digunakan untuk analisis ion logam berat dalam sampel air karena memiliki keunggulan yaitu dari ukuran yang kecil, *low cost* dan dapat melakukan analisis secara in-situ dan juga dapat dipakai berkali-kali yang menjadikannya sangat berguna untuk deteksi logam berat[14]. Menggunakan karbon sebagai pembuatan elektroda kerja dan pembantu telah mendapatkan pengakuan yang kuat di banyak aplikasi elektrokimia. karena konduktivitas listrik yang tinggi, stabilitas kimia dan termal yang baik, serta kemampuan untuk dimodifikasi secara luas[15]. Menggunakan Screen Printed Elektroda tipe *Disc*(Cakram) memiliki banyak keunggulan untuk logam berat karena bentukan dari SPCE yang membuat elektroda menjadi efisien dan meningkatkan performa yang baik dalam penyerapan logam berat dari kombinasi material dan desain yang sesuai[16].

III. METODE

A. Sintesis Material Nanokomposit ZnO/PVA/GN

Untuk proses pembuatan larutan nanokomposit ZnO/PVA dengan doping *Graphene* seperti pada Gambar 3.1, dibutuhkan ZnO sebanyak 0.1 gram yang dilarutkan dalam 10 ml aquades, serta PVA sebanyak 1.5 gram yang dilarutkan dalam 10 ml aquades. Kedua larutan tersebut diaduk dan dipanaskan selama 30 menit pada suhu 80 Celsius. Setelah itu, dicampurkan dan diaduk kembali dengan suhu 80 derajat selama 30 menit. Selanjutnya, bubuk *Graphene* ditambahkan ke larutan ZnO- PVA dan diaduk serta dipanaskan pada suhu 80 derajat selama 30 menit. Setelah tercampur sempurna, larutan ZnO-PVA-GN diadakan sonikasi selama 60 menit.



Gambar 3. 1. Skema Sintesis Nanokomposit ZnO/PVA/Graphene

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

Proses karakterisasi sifat listrik menggunakan Keithley 2400. Sampel yang akan dikarakterisasi di-deposisi dengan spin coating secara merata di atas PCB. Setelah itu, karakterisasi dilakukan menggunakan Keithley dengan PCB dipasang dua pin pada jalur tembaga yang telah dilubangi. PCB kemudian diletakkan di dalam sangkar Faraday dan dihubungkan ke Keithley dari pin. Nilai slope dan resistansi masing-masing sampel diperoleh dari persamaan regresi linier:

$$y = mx + c \quad (1)$$

y = Arus (μA), x = Tegangan (Volt), m = slope atau koefisien regresi. c = intercept maka dapat diketahui bahwa:

$$Resistansi = \frac{1}{m} \quad (2)$$

Dan konduktivitas listrik dapat dihitung dengan persamaan matematis seperti berikut:

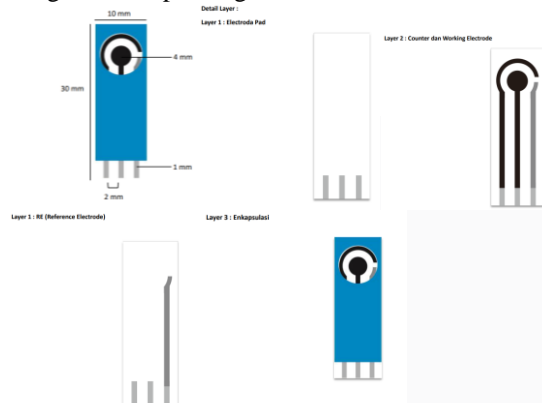
$$\text{Konduktivitas} = \frac{1}{R} \quad (3)$$

C. Pengujian Elektrokimia Thin Film Nanokomposit ZnO/PVA/GN

Kedua sampel thin film, ZnO/PVA dan ZnO/PVA/Graphene, diuji menggunakan metode elektrokimia Cyclic Voltammetry (CV). Prosesnya melibatkan tiga jenis elektroda: Elektroda Pembanding dengan bahan Ag/AgCl, Elektroda Pembantu dari bahan karbon, dan Elektroda Kerja dengan modifikasi sampel thin film. Larutan elektrolit yang digunakan adalah larutan natrium sulfat (Na₂SO₄). Proses dilakukan dari rentang tegangan swipe dari -1V hingga 1V dengan scan rate 100 mV/s. dengan CV diperoleh informasi mengenai kestabilan elektrokimia dari setiap sampel yang diuji.

D. Fabrikasi Screen Printed Carbon Electrode

Desain SPCE terdiri dari 4 layer berukuran 10 x 30 mm: kaki elektroda, reference electrode, working electrode dan counter electrode, serta lapisan enkapsulasi. Screen mesh polyester ukuran 77. Proses pencetakan SPCE dilakukan dengan mesin printing de Haart model SPSA 10.



Gambar 3. 2. Desain Screen Printed Electrode siap cetak

Layer kaki elektroda dicetak menggunakan pasta perak (Ag) dan dikeringkan pada suhu 136°C selama 30 menit. Untuk Working dan counter electrode dicetak dengan pasta karbon yang dikeringkan pada suhu 60°C selama 30 menit, sedangkan reference electrode dicetak dengan pasta Ag/AgCl dan 50°C selama 30 menit untuk pasta Ag/AgCl. Lapisan enkapsulasi dicetak dengan pasta dielektrik dan dikeringkan pada suhu 130°C selama 30 menit.

E. Pendeteksian Logam Berat Cadmium dengan Cyclic Voltametry dan Square Wave Voltammetry

Seluruh sampel nanokomposit ZnO-PVA, ZnO-PVA-Graphene akan drop casting pada bagian working electrode sebanyak 2.5 µL selama 2-3 menit pada suhu 45°C hingga kering. Selanjutnya akan diuji dengan beberapa konsentrasi cadmium yang berbeda dalam volume 500 mL air dan variasi konsentrasinya dalam ukuran 0, 20, 40, 60, dan 80 ppm. Selanjutnya akan ditetesi analit dengan volume 60 µl. Proses ini menggunakan "Rodeostat: Open Source Potensiostat" untuk mengukur proses *electrochemical* dengan metode *Cyclic Voltammetry*. Dimana rentang tegangan dari -2 Volt hingga +2 Volt dengan scan rate 100 mV/s. Setelah melakukan pengujian *Cyclic Voltammetry* dilakukannya

pengujian Square Wave Voltammetry dengan konfigurasi pada table.



Gambar 3. 3. Proses Pengujian Screen Printed Electrode terhadap Pendeteksian Logam Berat Cadmium

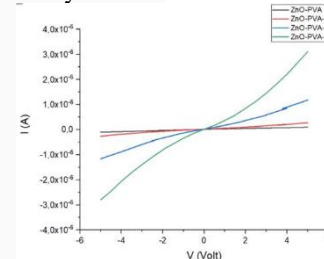
TABEL 3. 1 KONFIGURASI SWV

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

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Karakterisasi Sifat Listrik Thin Film Nanokomposit ZnO/PVA/GN

Pada Gambar 4.1, terlihat bahwa penambahan graphene pada ZnO/PVA dapat meningkatkan arus listrik. Berdasarkan analisis kurva I-V pada Tabel 2.2 di atas menunjukkan bahwa penambahan graphene pada sampel ZnO/PVA telah meningkatkan konduktivitas listrik dari sampel tersebut. Hal ini terlihat dari penurunan nilai resistansi dan kenaikan nilai konduktivitas dari sampel ZnO-PVA hingga sampel ZnO-PVA-GN 5%wt dikarenakan graphene memiliki kerapatan dan mobilitas elektron yang tinggi sehingga meningkatkan konduktivitas listriknya dan bantuan dari ZnO[17].



Gambar 4. 1. Perbandingan Respon I-V ZnO-PVA dengan ZnO-PVA-Graphene

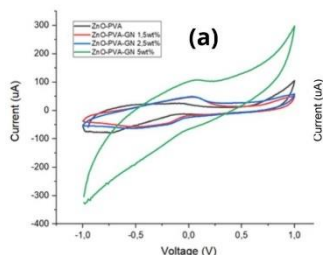
TABEL 4. 2. KONDUKTIVITAS THIN-FILM NANOKOMPOSIT ZNO/PVA/GN

Sampel	Konduktivitas (S)	Resistansi (Ohm)
ZnO-PVA	1,98E-8	5,05E+7
ZNO-PVA-GN 1.5%wt	4,87E-8	2,05E+7
ZNO-PVA-GN 2.5%wt	2,08E-7	4,8E+6
ZNO-PVA-GN 5%wt	5,29E-7	1,89E+6

B. Pengujian Elektrokimia Thin Film Nanokomposit ZnO/PVA/GN

Pada Gambar 4.2., terlihat peningkatan luas area di bawah kurva dengan penambahan graphene pada nanokomposit ZnO/PVA. Sampel dengan doping graphene menunjukkan stabilitas elektrokimia yang baik dalam

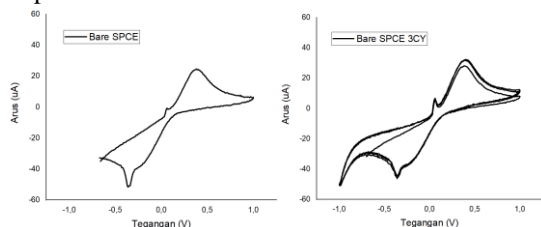
elektrolit Na₂SO₄. Hasil pengujian mencerminkan redoks yang stabil.



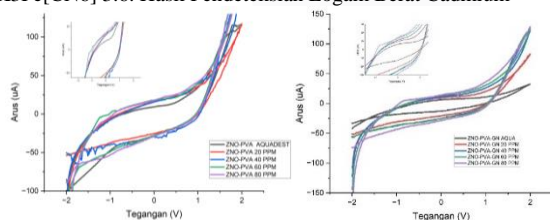
Gambar 4. 2. Pengukuran CV Pada Sampel Nanokomposit (a) Hasil CV Nanokomposit ZnO/PVA/Graphene

C. Hasil Karakterisasi SPE

Karakterisasi SPE dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan elektrokimia dari elektroda cetak layar (SPE). Grafik "*duck-shaped voltammograms*" digunakan sebagai indikator kestabilan elektrokimia dan menunjukkan transfer elektron yang penting dalam proses pendeteksian. Hasil grafik dapat dilihat (lihat Gambar 4.3). Puncak-puncak ini mengindikasikan reaksi dan transfer elektron yang berlangsung di elektroda. Pada hasil 3 siklus, terlihat konstan, menunjukkan kekokohan SPCE. Dengan ini bahwa SPCE yang dibuat telah memiliki kualitas yang memadai untuk keperluan pendeteksian.



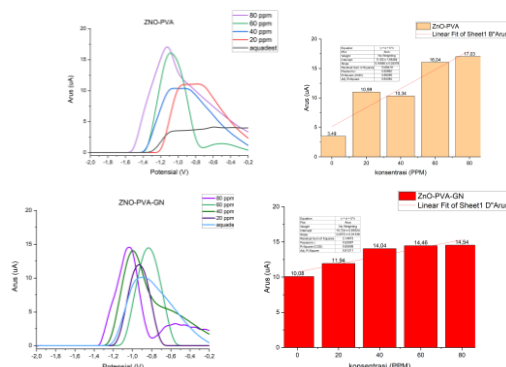
Gambar 3. 2. Karakterisasi SPCE dengan larutan 0.1 M KCL + 5mM K₃Fe(CN)₆ 3.6. Hasil Pendeteksian Logam Berat Cadmium



Gambar 4. 3. Pengujian SPCE Modifikasi Nanokomposit dengan Cadmium 0-80 ppm

Hasil pengujian pada konsentrasi (0-80 ppm) terlihat peningkatan respon arus setelah menambahkan *graphene* pada ZnO/PVA. Hal ini menunjukkan pengaruh positif penambahan *graphene* terhadap respon arus untuk mendeteksi kadmium pada kedua konsentrasi tersebut. Munculnya respons puncak arus pada pengujian melalui SWV mengindikasikan bahwa penambahan *graphene* pada ZnO/PVA dapat mengikat dengan logam berat. Analisis respon keluaran SPCE menunjukkan hubungan linearitas antara konsentrasi analit dan respon arus. Tingkat linearitas tertinggi tercapai pada SPCE dengan modifikasi ZnO/PVA (88%) dan ZnO/PVA/GN (86%). Hasil ini konsisten dengan luas area permukaan modifikator, yang mempengaruhi penyerapan target analit secara efektif. Namun, *graphene* dalam ZnO/PVA/GN, meskipun dengan konsentrasi rendah, tidak menunjukkan penyerapan optimal. Penambahan *graphene* sebagai doping material menyebabkan ikatan yang kurang efektif dengan ZnO, serta adanya aglomerasi dan dispersi yang buruk[18]. Penambahan *graphene*

menunjukkan respons linear, saturasi pada konsentrasi 20-60 ppm. Konsentrasi kadmium mempengaruhi respons arus SPCE.



Gambar 4. 4. Pengujian SPCE Modifikasi Nanokomposit dengan Cadmium 0-80 ppm menggunakan Squarewave Voltammetry, dan hasil linearitasnya

TABEL 3. 3. FUNGSI LINEAR, R-SQUARE, DAN ERROR DARI SETIAP NANOKOMPOSIT

	Fungsi linearitas ($y = a + b \cdot x$)	R-square	Error (%)
ZnO-PVA	$y = 5,1556 + 160,61x$	0,88246	10,991%
ZnO-PVA-GN	$y = 10,724 + 57,2x$	0,85908	14,092%

Dari kurva linearitas pada Gambar 4.4, sensitivitas sensor dapat dihitung sebagai rasio perubahan keluaran terhadap perubahan masukan. Sensitivitas diperoleh dari kemiringan kurva linier[19], diwakili oleh persamaan matematis:

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

dengan s = sensitivitas, Δy = puncak arus (A), dan Δx = konsentrasi (ppm).

TABEL 3. 4. SENSITIVITAS SPE MODIFIKASI

ZnO-PVA	$1.7 \times 10^{-4} \frac{A}{ppm}$
ZnO-PVA-GN	$5.57 \times 10^{-5} \frac{A}{ppm}$

Kemudian dilakukan pula perhitungan Limit of Detection (LoD) pada hasil square wave voltammetry dari ketiga nanokomposit dengan persamaan matematis sebagai berikut:

$$LoD = 3.3 \left(\frac{\sigma}{slope} \right) [20]$$

Dengan σ = standar deviasi puncak arus (μA), dan slope = sensitivitas elektroda nanokomposit ZnO/PVA, ZnO/PVA/GN dari kurva linear ($\mu A/ppm$).

TABEL 3. 5. LOD NANOKOMPOSIT

ZnO-PVA	0,112 ppm
ZnO-PVA-Graphene	0,113 ppm

Berdasarkan perbandingan antara hasil pengukuran pada jenis material ZnO-graphene dengan rentang 10-200 ppb, diperoleh LOD sebesar 0.6 ppb untuk komposit ZnO/PVA-GN dan 1.02 ppb untuk graphene saja. Meskipun pengujian tidak dapat dilakukan pada skala ppm karena keterbatasan alat, LOD untuk material ZnO/PVA, ZnO/PVA/GN adalah 0.112 dan 0.113 ppm dalam rentang pengukuran 0-80 ppm. Hal ini menunjukkan hasil pengukuran yang memadai untuk mendeteksi kadmium di atas batas ambang minimum 0.464 ppm. Dengan demikian, SPCE yang telah dibuat cukup efektif untuk mendeteksi kandungan kadmium.

Dalam perbandingan jenis material ZnO-graphene dengan rentang pengukuran 10-200 ppb, Batas Deteksi (LOD) adalah 0.6 ppb. LOD untuk graphene sendiri adalah 1.02 ppb. Keterbatasan alat mengakibatkan pengujian hanya pada skala ppm, namun LOD material ZnO/PVA dan ZnO/PVA/GN adalah 0.112 ppm dan 0.113 ppm pada rentang pengukuran 0-80 ppm.

D. Spesifikasi Pengaplikasian

Hasil pengujian menunjukkan tingkat linearitas yang signifikan: 96% untuk ZnO/PVA, 88% untuk ZnO/PVA/GN menggunakan metode SWV. Namun, hasil uji CV, puncak oksidasi yang mengindikasikan reaksi antara material dan analit tidak terdeteksi. Kemungkinan disebabkan oleh rendahnya sensitivitas alat ukur. Faktor lain, seperti partikel atau kotoran pada SPCE, dapat menghambat transfer elektron pada elektroda. Oleh karena itu, metode SWV akan dipakai untuk meningkatkan sensitivitas, yang menghasilkan variasi puncak pada setiap konsentrasi kadmium.

E. Evaluasi Ekonomi

TABEL 3. 6. TABEL EVALUASI

SPE	SPE Produksi	SPE Komersial
Harga Pokok Produksi	Rp. 75.813/unit	Rp. 157.433/unit
Biaya Tambahan	Rp. 4000.000	-
Jumlah Produksi	400 unit	400 unit
Total Harga	Rp. 34.325.348	Rp. 62.973.200

Dari evaluasi ekonomi, terlihat bahwa total biaya produksi SPE Produksi sebesar Rp. 75.813 lebih rendah daripada SPE Komersial sebesar Rp. 157.433. Hal ini menunjukkan bahwa SPE Produksi mencapai efisiensi biaya yang signifikan dan memberikan manfaat ekonomi yang berarti.

V. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil data yang didapatkan sudah terlaksana dimulai dari 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(0-80 ppm) telah dilakukan dengan menggunakan metode CV dan SWV untuk mempelajari sifat elektrokimia serta pendeteksian material terhadap logam berat. Dengan kata lain material nanokomposit ZnO/PVA dengan penambahan doping Graphene memiliki potensi untuk dapat

dijadikan sebagai modifikator yang dapat melakukan pendeteksian logam berat pada skala kecil.

REFERENSI

- [1] M. Jaishankar, T. Tseten, N. Anbalagan, B. B. Mathew, and K. N. Beeregowda, "Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals," *Interdisciplinary Toxicology*, vol. 7, no. 2. Slovak Toxicology Society, pp. 60–72, Jun. 01, 2014. doi: 10.2478/intox-2014-0009.
- [2] "BERITA NEGARA REPUBLIK INDONESIA." [Online]. Available: www.peraturan.go.id
- [3] 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.
- [4] A. P. Sari and J. Nurdiana, "PEMANTAUAN pH, KEKERUHAN DAN SISA CHLOR AIR PRODUKSI DI LABORATORIUM MINI IPA CENDANA PDAM TIRTA KENCANA KOTA SAMARINDA KALIMANTAN TIMUR."
- [5] J. Barton *et al.*, "Screen-printed electrodes for environmental monitoring of heavy metal ions: a review," *Microchimica Acta*, vol. 183, no. 2. Springer-Verlag Wien, pp. 503–517, Feb. 01, 2016. doi: 10.1007/s00604-015-1651-0.
- [6] M. Yusuf, F. M. Elfighi, S. A. Zaidi, E. C. Abdullah, and M. A. Khan, "Applications of graphene and its derivatives as an adsorbent for heavy metal and dye removal: A systematic and comprehensive overview," *RSC Advances*, vol. 5, no. 62. Royal Society of Chemistry, pp. 50392–50420, 2015. doi: 10.1039/c5ra07223a.
- [7] "Graphene-Metal Modified Electrochemical Sensors for Toxic Chemicals," 2020, pp. 91–124. doi: 10.21741/9781644900956-4.
- [8] M. A. Subhan, N. Neogi, and K. P. Choudhury, "Industrial Manufacturing Applications of Zinc Oxide Nanomaterials: A Comprehensive Study," *Nanomanufacturing*, vol. 2, no. 4, pp. 265–291, Dec. 2022, doi: 10.3390/nanomanufacturing2040016.
- [9] A. Thi Le, S.-Y. Pung, S. Sreekantan, A. Matsuda, D. Phu Huynh, and D. Phu Huynh Mechanisms, "Mechanisms of removal of heavy metal ions by ZnO particles," *Heliyon*, vol. 5, p. 1440, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.
- [10] S. Singh, D. Kapoor, S. Khasnabis, J. Singh, and P. C. Ramamurthy, "Mechanism and kinetics of adsorption and removal of heavy metals from wastewater using nanomaterials," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 3. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 2351–2381, Jun. 01, 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01196-w.
- [11] 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.
- [12] X. Yang *et al.*, "Adsorption of methylene blue from aqueous solutions by polyvinyl alcohol/graphene oxide

composites,” *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 16, no. 2, pp. 1775–1782, Feb. 2016, doi: 10.1166/jnn.2016.10708.

[13] A. R. Urade, I. Lahiri, and K. S. Suresh, “Graphene Properties, Synthesis and Applications: A Review,” *JOM*, vol. 75, no. 3, Springer, pp. 614–630, Mar. 01, 2023. doi: 10.1007/s11837-022-05505-8.

[14] I. Palchetti, A. Cagnini, M. M. Iyã, and A. P. F. Turner, “Characterisation of Screen-Printed Electrodes for Detection of Heavy Metals.”

[15] S. Fletcher, “2 Screen-Printed Carbon Electrodes,” 2015.

[16] 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.

[17] Ö. Güler, S. H. Güler, O. Başgöz, M. G. Albayrak, and I. S. Yahia, “Synthesis and characterization of ZnO-

reinforced with graphene nanolayer nanocomposites: Electrical conductivity and optical band gap analysis,” *Mater Res Express*, vol. 6, no. 9, Jun. 2019, doi: 10.1088/2053-1591/ab2b12.

[18] X. Liu *et al.*, “Graphene oxide-based materials for efficient removal of heavy metal ions from aqueous solution: A review,” *Environmental Pollution*, vol. 252, Elsevier Ltd, pp. 62–73, Sep. 01, 2019. doi: 10.1016/j.envpol.2019.05.050.

[19] “mcgrath2013”.

[20] G. Padmalaya *et al.*, “A Facile Synthesis of Cellulose Acetate Functionalized Zinc Oxide Nanocomposite for Electrochemical Sensing of Cadmium ions,” *J Inorg Organomet Polym Mater*, vol. 29, no. 3, pp. 989–999, May 2019, doi: 10.1007/s10904-018-0989-2.