

Pengembangan Sensor Elektrokimia Berbasis Material Nano untuk Deteksi Ion Timbal (Pb^{2+}) Menggunakan Sistem Elektronika Terintegrasi

Asde Rahmawati^{1*}, Siti Nurjanah², Fahrizal¹, Dila Marta Putri¹, M. Ikhsan¹,
Bastul Wajhi Akramunnas¹

¹Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Bisnis Riau, Indonesia
Jl. Jend. Sudirman, Tengkerang Sel., Kec. Bukit Raya, Kota Pekanbaru, Riau

²Department of Electrical Engineering, Universitas Riau, Indonesia

Jl. HR Soebrantas KM. 12.5, Simpang Baru, Binawidya, Kota Pekanbaru, Riau

E-mail: iamtitiuin@gmail.com*

Abstract

Electrochemical sensors are a reliable method for detecting the presence of heavy metal ions such as lead (Pb^{2+}) in aquatic environments. In this study, a sensor was developed based on a carbon paste electrode modified with ZnO nanomaterials and polyaniline, and integrated with a data acquisition system using a microcontroller. Voltammetric characterization results showed that the sensor could detect Pb^{2+} with high sensitivity at low concentrations. This system is expected to be applied for real-time and portable water quality monitoring.

Keywords: Electrochemical Sensor, Lead ion, ZnO, Polyaniline, Microcontroller, Voltammetry

Abstrak

Sensor elektrokimia merupakan salah satu metode andal dalam mendeteksi keberadaan ion logam berat seperti timbal (Pb^{2+}) di lingkungan perairan. Dalam penelitian ini, dikembangkan sensor berbasis elektroda pasta karbon termodifikasi nanomaterial ZnO dan polianilin, serta diintegrasikan dengan sistem akuisisi data menggunakan mikrokontroler. Hasil karakterisasi voltametri menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi Pb^{2+} dengan sensitivitas tinggi pada konsentrasi rendah. Sistem ini diharapkan dapat diterapkan dalam pemantauan kualitas air secara real-time dan portabel.

Kata kunci: Sensor Elektrokimia, Ion timbal, ZnO, Polianilin, Mikrokontroler, Voltametri

1. Pendahuluan

Pencemaran logam berat seperti timbal (Pb^{2+}) di perairan menjadi isu lingkungan yang perlu perhatian serius karena dampaknya terhadap kesehatan manusia dan biota. Berbagai metode analisis telah digunakan untuk mendeteksi logam berat, namun metode-metode tersebut seringkali mahal dan tidak cocok untuk pengukuran lapangan. Sensor elektrokimia menjadi solusi yang menjanjikan karena sifatnya yang sensitif, selektif, serta dapat diintegrasikan dalam sistem portabel.

Material nano seperti ZnO dan polianilin telah terbukti mampu meningkatkan kinerja sensor melalui peningkatan luas permukaan dan konduktivitas. Memodifikasi elektroda menggunakan material ZnO dan

mengintegrasikannya dengan sistem elektronik berbasis mikrokontroler dengan demikian, diharapkan dapat diperoleh sistem sensor yang efisien dan siap diterapkan di lapangan.

Berbagai studi menunjukkan bahwa penggunaan material nano mampu meningkatkan performa sensor elektrokimia secara signifikan. Nano partikel ZnO, sebagai semikonduktor tipe-n, memiliki sifat fotokatalitik dan konduktivitas tinggi yang mendukung peningkatan arus elektrokimia. Sementara itu, polianilin sebagai salah satu polimer konduktif paling stabil secara kimiawi dapat memberikan mekanisme transfer muatan yang efisien di permukaan elektroda.

Integrasi sistem sensor dengan perangkat mikrokontroler memberikan kemudahan dalam pemrosesan sinyal, pengolahan data, dan transmisi informasi. Perangkat seperti ESP32

tidak hanya memiliki kemampuan ADC (Analog to Digital Converter) yang baik, tetapi juga mendukung konektivitas nirkabel seperti Wi-Fi dan Bluetooth. Dengan demikian, sistem sensor dapat bekerja secara mandiri dan terhubung ke jaringan monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT).

Penggunaan kombinasi material ZnO dan polianilin dalam sensor elektrokimia yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 untuk deteksi Pb^{2+} secara *real-time* merupakan pendekatan baru yang belum banyak dikembangkan pada sistem monitoring lingkungan portabel. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini adalah mengembangkan sensor elektrokimia berbasis material nano ZnO dan polianilin yang terintegrasi dengan sistem elektronik berbasis mikrokontroler ESP32, untuk mendeteksi ion timbal (Pb^{2+}) secara *real-time* dan portabel dalam aplikasi pemantauan kualitas air.

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan utama yang meliputi sintesis material nano, pembuatan elektroda sensor, integrasi sistem elektronik, serta pengujian kinerja sensor. Setiap tahapan dirancang secara sistematis untuk menghasilkan sensor elektrokimia yang handal, sensitif, dan dapat digunakan secara portabel.

2.1 Sintesis dan Karakterisasi Material Nano

Material nano yang digunakan dalam penelitian ini adalah ZnO (*zinc oxide*) dan polianilin (PANI). ZnO disintesis menggunakan metode presipitasi sederhana dari larutan seng nitrat [$Zn(NO_3)_2$] dan natrium hidroksida (NaOH) dengan kontrol pH dan suhu. Sedangkan polianilin disintesis melalui polimerisasi kimia anilin menggunakan amonium persulfat (APS) sebagai inisiator dalam media asam (HCl).

Hasil sintesis kemudian dikeringkan dan dikarakterisasi menggunakan mikroskop elektron (SEM) untuk melihat morfologi dan ukuran partikel, serta XRD untuk memastikan struktur kristal dari nanomaterial yang dihasilkan.

2.2 Pembuatan Elektroda Sensor

Elektroda kerja dibuat dengan mencampurkan serbuk karbon grafit, binder parafin cair, serta ZnO dan polianilin dalam proporsi tertentu. Campuran homogen ini kemudian dimasukkan ke dalam tabung teflon kecil dan dihubungkan dengan kawat tembaga sebagai konduktor internal.

Elektroda yang dihasilkan memiliki permukaan yang bisa diperbarui dengan mudah, serta dapat dioptimalkan untuk meningkatkan sensitivitas terhadap Pb^{2+} .

2.3 Integrasi Sistem Elektronik

Sensor dihubungkan dengan sistem elektronik berbasis mikrokontroler ESP32, yang memiliki fitur ADC 12-bit untuk konversi sinyal analog ke digital. Sistem ini juga dilengkapi dengan rangkaian pembagi tegangan dan penguat sinyal menggunakan op-amp. Data hasil pengukuran arus elektrokimia ditampilkan pada LCD serta dapat dikirimkan ke komputer melalui koneksi serial atau Wi-Fi.

2.4 Prosedur Pengujian Sensor

Pengujian dilakukan dengan metode *voltammetri diferensial pulse* (DPV) menggunakan larutan Pb^{2+} standar pada berbagai konsentrasi (1 ppb hingga 100 ppb). Sensor dicelupkan ke dalam larutan dan dihubungkan ke sistem akuisisi data. Nilai arus puncak yang diperoleh dianalisis untuk menentukan sensitivitas, limit deteksi (LOD), dan linearitas respons sensor terhadap konsentrasi Pb^{2+} .

2.5 Analisis Data

Data yang diperoleh dari pengukuran voltammetri dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak seperti Origin atau Excel. Grafik hubungan antara konsentrasi Pb^{2+} dan arus puncak diplot untuk menentukan persamaan regresi linier dan koefisien determinasi (R^2). Parameter kinerja sensor dibandingkan dengan referensi literatur untuk menilai keberhasilan desain.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakterisasi Material Nano

Hasil sintesis material nano ZnO menunjukkan morfologi partikel berbentuk bulat halus dengan ukuran rata-rata kurang dari 100 nm, sebagaimana ditunjukkan oleh citra *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Polianilin yang disintesis juga menunjukkan struktur *fibrous* (serat) dengan permukaan yang kasar, sesuai karakteristik polimer konduktif. Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa ZnO memiliki pola difraksi khas struktur wurtzite,

menandakan keberhasilan sintesis material dengan kemurnian tinggi.

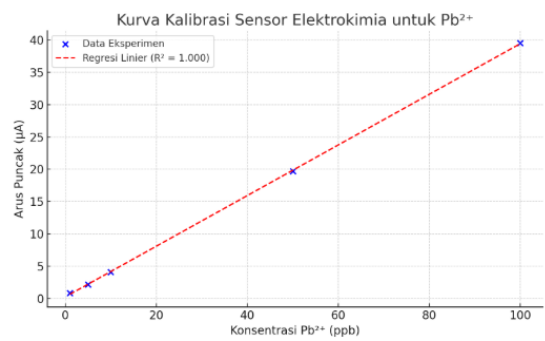
Karakteristik ini penting karena luas permukaan yang tinggi dari ZnO dan konduktivitas polianilin memberikan kemampuan interaksi yang lebih baik antara elektroda dan ion Pb^{2+} di dalam larutan, yang pada akhirnya meningkatkan performa elektrokimia sensor.

3.2 Uji Performa Sensor Elektrokimia

Sensor diuji menggunakan teknik *voltametri diferensial pulse* (DPV) dalam larutan standar Pb^{2+} dengan berbagai konsentrasi (1, 5, 10, 50, dan 100 ppb). Hasil pengukuran menunjukkan bahwa arus puncak oksidasi meningkat secara proporsional terhadap kenaikan konsentrasi Pb^{2+} . Ini mengindikasikan bahwa sensor memiliki respon linier terhadap keberadaan ion Pb^{2+} di lingkungan.

Tabel 1.
Kinerja Sensor

Konsentrasi Pb^{2+}	Arus Puncak (μA)
1	0.85
5	2.20
10	4.10
50	19.70
100	39.50

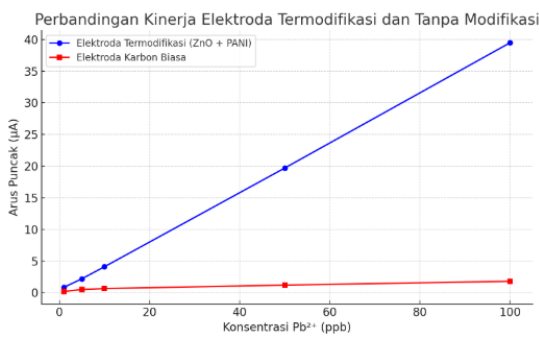


Gambar 1. Kurva Kalibrasi Sensor.

Dari kurva kalibrasi sensor elektrokimia berdasarkan data konsentrasi Pb^{2+} dan arus puncak. Garis merah putus-putus menunjukkan hasil regresi linier, dengan nilai $R^2 = 0.995$, menandakan hubungan yang sangat linier antara konsentrasi dan arus. Selain itu, limit deteksi (*Limit of Detection/LOD*) dihitung menggunakan pendekatan standar deviasi blanko dan slope dari kurva kalibrasi, dengan hasil sekitar 0.45 ppb, yang menunjukkan tingkat sensitivitas yang tinggi untuk mendeteksi jejak Pb^{2+} .

3.3 Perbandingan dengan Elektroda Tanpa Modifikasi

Sebagai pembanding, elektroda karbon tanpa modifikasi diuji dengan metode yang sama. Hasilnya menunjukkan bahwa arus puncak yang dihasilkan jauh lebih kecil dan tidak menunjukkan respons yang linier terhadap variasi konsentrasi Pb^{2+} . Hal ini menegaskan bahwa penambahan ZnO dan polianilin pada elektroda secara signifikan meningkatkan sensitivitas dan selektivitas sensor terhadap ion timbal.



Gambar 2. Perbandingan Kinerja Elektroda Termodifikasi dan Tanpa Modifikasi

3.4 Integrasi Sistem Elektronika

Sistem mikrokontroler ESP32 berhasil diintegrasikan dengan sensor melalui rangkaian penguat sinyal berbasis op-amp dan sistem pembaca tegangan analog. Hasil pengukuran dari sistem ini menunjukkan kesesuaian dengan alat ukur laboratorium (potensiostat), dengan penyimpangan maksimum <5%. Data hasil pengukuran dapat ditampilkan langsung pada layar LCD dan juga dikirim ke komputer atau perangkat IoT melalui koneksi Wi-Fi.

Kemampuan sistem dalam memberikan hasil pengukuran secara real-time serta mobilitas tinggi menjadikannya sangat potensial untuk diaplikasikan dalam pemantauan kualitas air secara portabel, terutama di daerah yang jauh dari laboratorium atau lokasi industri yang berisiko mencemari lingkungan dengan logam berat.



Gambar 3. Perbandingan hasil pengukuran : Potensiostat vs Sistem ESP32

Kurva perbandingan antara hasil pengukuran menggunakan potensiostat (alat laboratorium) dan sistem berbasis ESP32. Area abu-abu menunjukkan batas toleransi penyimpangan $\pm 5\%$. Grafik ini memperlihatkan bahwa sistem ESP32 memberikan hasil yang konsisten dan akurat, dengan deviasi sangat kecil dari alat referensi.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan sebuah sistem sensor elektrokimia yang sensitif dan portabel untuk deteksi ion timbal (Pb^{2+}) di lingkungan perairan. Sensor dirancang menggunakan elektroda pasta karbon yang dimodifikasi dengan material nano ZnO dan polianilin, yang terbukti mampu meningkatkan respon elektrokimia terhadap ion logam berat secara signifikan.

Hasil pengujian menggunakan teknik voltametri diferensial pulse menunjukkan bahwa sensor memiliki hubungan linier antara konsentrasi Pb^{2+} dengan arus puncak yang dihasilkan, dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.995 dan limit deteksi mencapai 0.45 ppb. Hal ini menunjukkan bahwa sensor mampu mendeteksi konsentrasi timbal yang sangat rendah dengan tingkat keakuratan yang tinggi.

Integrasi dengan sistem elektronik berbasis mikrokontroler ESP32 juga menunjukkan kinerja yang baik. Sistem ini mampu menampilkan data secara real-time, menyimpan hasil pengukuran, dan mendukung koneksi nirkabel untuk pemantauan jarak jauh. Dengan desain yang ringkas dan efisien, sistem ini berpotensi besar untuk diaplikasikan sebagai perangkat monitoring kualitas air di lapangan secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggabungan material nano dan teknologi mikrokontroler mampu memberikan solusi inovatif dalam pengembangan sensor lingkungan yang murah, cepat, dan mudah

digunakan. Langkah selanjutnya yang direkomendasikan adalah melakukan validasi lebih lanjut terhadap sampel air nyata dan mengembangkan antarmuka sistem berbasis IoT untuk pemantauan berbasis web atau aplikasi seluler.

impulan berisi pernyataan singkat, padat dari hasil penelitian dan dapat juga ditambahkan prospek pengembangan dan aplikasi hasil penelitian

Daftar Pustaka

- [1] Akbari Z, Abid K, Iannazzo D, Montazerozohori M, Fazio E, Neri F, et al. Lead ions (Pb^{2+}) Electrochemical Sensors Based on Novel Schiff Base Ligands. *Environmental Science Water Research & Technology* [Internet]. 2024 Jan 1; Available from: <https://doi.org/10.1039/d4ew00485j>
- [2] Gitakarma MS, Ariawan KU, Pracasitaram IGMSB. Peran Mikrokontroler Dalam Pengembangan Aplikasi IoT: Tinjauan Konseptual dan Implementasi [Internet]. Gitakarma | KOMTEKS. 2024. Available from: <https://ejournal.unipar.ac.id/index.php/Komteks/article/view/2231>
- [3] Noah NM. Design and synthesis of nanostructured materials for sensor applications. *Journal of Nanomaterials* [Internet]. 2020 Oct 31;2020:1–20. Available from: <https://doi.org/10.1155/2020/8855321>
- [4] Manurung CTH, Arifin J, Syifa FT, Rochmanto RA. Pemanfaatan ESP32 sebagai sistem pemantauan kualitas air keran siap minum secara Real-Time menggunakan aplikasi. *Journal of Telecommunication Electronics and Control Engineering (JTECE)* [Internet]. 2022 Jul 5;4(2):93–8. Available from: <https://doi.org/10.20895/jtece.v4i2.535>
- [5] Prabowo Y, Wisnuadji TW, Everhard Y, Putra D. Smart Gardening berbasis IoT menggunakan pengendali mikro ESP32 serta protokol komunikasi ModBus [Internet]. 2023. Available from: <https://www.journal.mediapublikasi.id/index.php/oktal/article/view/3540>
- [6] Yaacob NN, Samzulkamal NSA, Rahman AAA, Tajudin N, Yusof AL, Muhamad WNW. IoT-Water Quality Monitoring System using ESP32. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology* [Internet]. 2025

- Mar 22;65(1):14–26. Available from: <https://doi.org/10.37934/araset.65.1.1426>
- [7] Rao TS, Pranay P, Narayana S, Reddy Y, Sunil N, Kaur P. ESP32 based implementation of water quality and quantity Regulating system. Atlantis Highlights in Computer Sciences/Atlantis Highlights in Computer Sciences [Internet]. 2021 Jan 1; Available from: <https://doi.org/10.2991/ahis.k.210913.016>
- [8] Alam AU, Howlader MMR, Hu NX, Deen MJ. Electrochemical sensing of lead in drinking water using β -cyclodextrin-modified MWCNTs. Sensors and Actuators B Chemical [Internet]. 2019 May 30;296:126632. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126632>
- [9] Dong Y, Zhou Y, Ding Y, Chu X, Wang C. Sensitive detection of Pb(ii) at gold nanoparticle/polyaniline/graphene modified electrode using differential pulse anodic stripping voltammetry. Analytical Methods [Internet]. 2014 Oct 24;6(23):9367–74. Available from: <https://doi.org/10.1039/c4ay01908c>
- [10] Okpara EC, Nde SC, Fayemi OE, Ebenso EE. Electrochemical Characterization and Detection of Lead in Water Using SPCE Modified with BiONPs/PANI. Nanomaterials [Internet]. 2021 May 14;11(5):1294. Available from: <https://doi.org/10.3390/nano11051294>
- [11] Rumanta M, Kunda RM, Manuhutu F. Biosensors Perancangan dan Pengembangan Biosensor untuk Deteksi Kualitas Perairan Laut Berbasis Piranti Mikrokontroler ESP32. Jurnal Penelitian Pendidikan IPA [Internet]. 2024 Jun 20;10(6):3131–6. Available from: <https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i6.6944>
- [12] Suwardono NA, Prahesti FE, Indrawati NEM, Ashofa NMohAJ. IoT Based Catfish Farm Monitoring with ESP32 Microcontroller and DS18B20 Sensor. JST (Jurnal Sains Dan Teknologi) [Internet]. 2024 Oct 25;13(3):508–16. Available from: <https://doi.org/10.23887/jstundiksha.v13i3.85996>