

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI ELEKTRODA SELEKTIF ION Cd^{2+} TIPE KAWAT TERLAPIS BERBASIS POLIVINIL KLORIDA

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF A Cd^{2+} ION SELECTIVE ELECTRODE OF THE COATED WIRE BASED ON POLYVINYL CHLORIDE

Tentriati Cahaya, Aman Sentosa Panggabean*, Moh. Syaiful Arif

Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia
Jalan Barong Tongkok, Kampus Gn. Kelua, Samarinda 75321, Kalimantan Timur, Indonesia

*Corresponding Author : amanspanggabean@yahoo.com

Article History

Submitted : 30 September 2025

Accepted: 20 February 2026

ABSTRACT

This study reports the fabrication and characterization of a Cd^{2+} ion-selective electrode of the coated wire (ISE) based on PVC with sodium sulfide as the ionophore. The electrode was prepared using the optimum composition of $\text{Na}_2\text{S}:\text{PVC}:\text{DOP}$ (0.7 g:0.2 g:0.1 mL) and doped in $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ solution. The results showed a Nernstian slope of 9.5 mV/decade, detection limit of 1×10^{-5} M, optimum pH range of 6–7, response time of 20–60 s, and a lifetime of 3 days. FT-IR analysis demonstrated successful electrode characterization via the formation of Cd–S interactions, indicated by the band at 612.75 cm^{-1} . The electrode exhibited good selectivity toward Cd^{2+} over interfering ions (Zn^{2+} , Cu^{2+} , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}).

Keywords: Ion-selective electrode, Cd^{2+} ion, Na_2S , Potentiometry.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan industri mendorong peningkatan produksi yang menghasilkan limbah padat, cair, dan gas.¹ Limbah industri umumnya mengandung logam berat yang dibutuhkan organisme pada kadar tertentu, namun dapat menimbulkan toksisitas jika kadarnya terlalu tinggi.² Salah satu logam berat berbahaya yang sering terdapat dalam limbah industri adalah kadmium (Cd), yang bersifat sangat toksik meski dalam jumlah sedikit. Apabila kadarnya melebihi ambang batas, maka menandakan terjadinya pencemaran perairan akibat logam berat.³ Oleh karena itu, diperlukan metode analisis yang mampu mendeteksi keberadaan ion Cd^{2+} secara tepat, cepat dan efisien salah satunya menggunakan Elektroda Selektif Ion (ESI).

Elektroda Selektif Ion (ESI) adalah sensor elektrokimia yang sensitif terhadap aktivitas ion dalam larutan, ditandai dengan perubahan potensial yang bersifat reversibel. ESI terbagi menjadi dua tipe, yaitu kawat terlapis dan tabung. Kelebihan ESI tipe kawat terlapis meliputi tidak memerlukan perawatan khusus, mudah disimpan tanpa risiko kehilangan larutan pembanding, serta fleksibel digunakan dalam berbagai posisi, sedangkan tipe tabung hanya dapat digunakan dalam posisi tegak.⁴

Kinerja ESI umumnya dievaluasi melalui beberapa aspek parameter, seperti faktor Nernst yang berperan untuk menentukan elektroda yang tepat, diperoleh dari kemiringan kurva antara log konsentrasi larutan standar dan potensial.⁵ Untuk ion divalen, nilai teoritisnya 29,6 mV/dekade dengan batas 24,6–34,6 mV/dekade, bila berada diluar rentang tersebut maka sensor potensiometri tidak bersifat Nernstian.⁶ Batas deteksi adalah jumlah analit minimum yang masih bisa terdeteksi oleh

This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



sensor.⁷ Waktu respon adalah lama waktu yang dibutuhkan agar ion dalam membran mencapai kesetimbangan sehingga potensial sel menjadi stabil.⁸ Waktu pakai elektroda adalah periode selama elektroda dapat berfungsi normal tanpa perubahan kinerja. Parameter pengaruh ion pengganggu (selektivitas) merupakan parameter yang berperan untuk menilai kemampuan sensor dalam mengukur ion target.⁹

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan komposisi larutan yang baik dalam pembuatan elektroda selektif ion (ESI) Cd^{2+} tersalut Na_2S , serta menilai karakteristik ESI Cd^{2+} tipe kawat terlapis. Pemilihan Na_2S sebagai bahan aktif didasarkan pada prinsip *Hard and Soft Acids and Bases* (HSAB), ion sulfida (S^{2-}) sebagai basa lemah memiliki afinitas yang tinggi terhadap Cd^{2+} , sehingga mampu membentuk interaksi Cd-S yang stabil di dalam matriks membran. Karakterisasi meliputi pengukuran faktor Nernst, batas deteksi, pengaruh pH, waktu tanggap, masa pakai elektroda, dan pengaruh ion pengganggu (selektivitas) untuk mengevaluasi kinerja dan keandalan elektroda dalam analisis ion Cd^{2+} . Penelitian ini diharapkan memberikan informasi tentang pembuatan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S yang layak digunakan sebagai elektroda kerja tipe kawat terlapis, serta menjadi referensi untuk pengembangan ESI tipe kawat terlapis pada penelitian selanjutnya, khususnya untuk ion logam kadmium (Cd^{2+}).

2. METODE

2.1 Alat dan Bahan

2.1.1. Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah neraca analitik, magnetic stirrer, stopwatch, Consort Multi Parameter Analyser C3050, Fourier Transform Infrared (FT-IR) BRUKER, seperangkat alat elektroda, dan serangkaian alat gelas standar laboratorium.

2.1.2. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah aqua demineral, PVC (Aldrich), pH universal, Na_2S , $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, THF, DOP, NaOH, HCl, ZnCl_2 , CuSO_4 , dan H_2SO_4 (semua zat dengan kualitas Merck).

2.2 Prosedur Penelitian

2.2.1. Pembuatan Larutan Elektroda Tersalut Na_2S

Larutan elektroda dibuat dengan mencampurkan Na_2S , PVC, dan DOP dalam 20 mL THF sesuai variasi komposisi pada **Tabel 1**. PVC dilarutkan dalam THF, kemudian ditambahkan DOP dan Na_2S secara bertahap, lalu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 6 jam.

Tabel 1. Variasi komposisi elektroda

Komposisi ke-	Komposisi bahan		
	Na_2S (g)	PVC (g)	DOP (mL)
1	0,5	0,4	0,1
2	0,6	0,3	0,1
3	0,7	0,2	0,1
4	1,0	0,1	0,1

2.2.2. Perakitan Elektroda Kerja Tipe Kawat Terlapis

Elektroda kerja tipe kawat terlapis dibuat dari kawat tembaga (Cu) berdiameter 1,5 mm dengan panjang 10 cm. Ujung kawat terlebih dahulu dibersihkan menggunakan aqua demineral, kemudian dipolimerisasi dalam larutan AgNO_3 1 M. Bagian badan kawat dilapisi kulit kabel, sementara ujung bawah dibiarkan terbuka untuk pelapisan larutan elektroda dan ujung atas dihubungkan ke multi parameter analyser. Elektroda pembanding yang digunakan adalah elektroda Ag/AgCl.

2.2.3. Pendopan Elektroda Tersalut Na_2S

Kawat tembaga (Cu) dicelupkan ke dalam larutan elektroda, lalu dikeringkan pada suhu ruang. Elektroda tersalut Na_2S kemudian direndam dalam larutan $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ 1 M selama 7 hari, diangkat, dan dikeringkan kembali pada suhu ruang. Penggunaan waktu perendaman selama 7 hari mengacu pada penelitian Padang yang menggunakan durasi yang sama, sehingga dipilih untuk menjaga kesesuaian dalam proses pembentukan lapisan.¹⁰

2.2.4. Karakterisasi ESI Cd^{2+} Tersalut Na_2S dengan FT-IR

Karakterisasi ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dengan FT-IR bertujuan mengidentifikasi pergeseran bilangan gelombang pada elektroda Na_2S sebelum maupun setelah didoping dengan ion Cd^{2+} .

2.2.5. Faktor Nernst dan Batas Deteksi

Penentuan faktor Nernst dilakukan dengan mengukur potensial larutan $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ pada variasi 1×10^{-1} hingga 1×10^{-7} M menggunakan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dan multi parameter analyser dengan pengadukan. Hasil pengukuran kemudian diplot sebagai hubungan antara potensial (mV) dan $\log [\text{Cd}^{2+}]$. Kemiringan pada rentang konsentrasi linear digunakan untuk memperoleh nilai Nernst, sedangkan titik ekstrapolasi kurva menunjukkan batas deteksi. Metode pengukuran ini mengacu pada penelitian Yuntarso dkk. (2018) dengan penyesuaian pada jenis bahan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini.¹¹

2.2.6. Pengukuran pH

Larutan induk $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ 1 M diencerkan menjadi 1×10^{-3} M, lalu diatur pH larutan pada rentang 2–9 dengan menambahkan HNO_3 dan NaOH . Potensial larutan kemudian diukur menggunakan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dengan *multi parameter analyser* sambil diaduk. Hasil pengukuran digambarkan dalam kurva hubungan antara potensial (mV) dan pH larutan standar Cd^{2+} . Metode pengukuran ini mengacu pada penelitian Yuntarso dkk. (2018) dengan penyesuaian pada jenis bahan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini.¹¹

2.2.7. Waktu Respon (Response Time)

Penentuan waktu respon dilakukan dengan mengukur potensial larutan $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ pada variasi 1×10^{-1} hingga 1×10^{-7} M menggunakan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S melalui *multi parameter analyser* dengan pengadukan. Hasil pengukuran digambarkan dalam kurva hubungan antara waktu (s) terhadap $\log [\text{Cd}^{2+}]$. Metode pengukuran ini mengacu pada penelitian Umaningrum dkk. (2021) dengan penyesuaian pada jenis bahan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini.⁸

2.2.8. Waktu Hidup (Life Time)

Waktu hidup ditentukan dengan mengukur potensial larutan $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ pada variasi 1×10^{-1} hingga 1×10^{-7} M menggunakan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dengan *multi parameter analyser* sambil diaduk. Hasil pengukuran digambarkan dalam kurva faktor Nernst (mV/dekade) terhadap waktu pengukuran. Metode pengukuran ini mengacu pada penelitian Panggabean dkk. (2021) dengan penyesuaian pada jenis bahan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini.¹²

2.2.9. Pengaruh Ion Pengganggu (Selectivity)

Penentuan ion pengganggu dilakukan dengan mengukur potensial larutan $\text{Cd}(\text{CH}_3\text{COOH})_2$ pada variasi 1×10^{-1} hingga 1×10^{-7} M yang ditambahkan ion pengganggu dengan konsentrasi tetap 1×10^{-3} M. Ion pengganggu yang digunakan meliputi Zn^{2+} , Cu^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , dan NO_3^- . Ion Zn^{2+} dan Cu^{2+} dipilih karena Na_2S dapat bereaksi selektif dengan ion sulfida, sedangkan Cl^- , SO_4^{2-} , dan NO_3^- digunakan untuk menguji kemungkinan interferensi dari ion yang tidak membentuk sulfida stabil. Pengukuran dilakukan menggunakan ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dengan multi parameter analyser sambil diaduk. Metode pengukuran ini mengacu pada penelitian Yuntarso dkk. (2018) dengan penyesuaian pada jenis bahan elektroda yang digunakan dalam penelitian ini.¹¹

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pembuatan dan Optimasi Komposisi Elektroda Tersalut Na_2S

Pembuatan dan optimasi ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dilakukan dengan empat variasi komposisi Na_2S , PVC, dan DOP untuk menentukan komposisi terbaik berdasarkan respon potensial. Seluruh bahan dicampur menggunakan *magnetic stirrer* selama 6 jam pada suhu ruang hingga homogen. Proses pencampuran tidak menyebabkan reaksi kimia, hanya membentuk larutan ESI yang stabil. Larutan ini digunakan untuk melapisi kawat Cu, kemudian didoping dalam larutan Cd^{2+} 1 M bertujuan menjenuhkan ESI dengan ion target, sehingga ESI menjadi lebih konduktif dan resistensinya menurun.¹³ Adapun hasil optimasi komposisi ESI ion Cd^{2+} tersalut Na_2S disajikan pada **Tabel 2**.

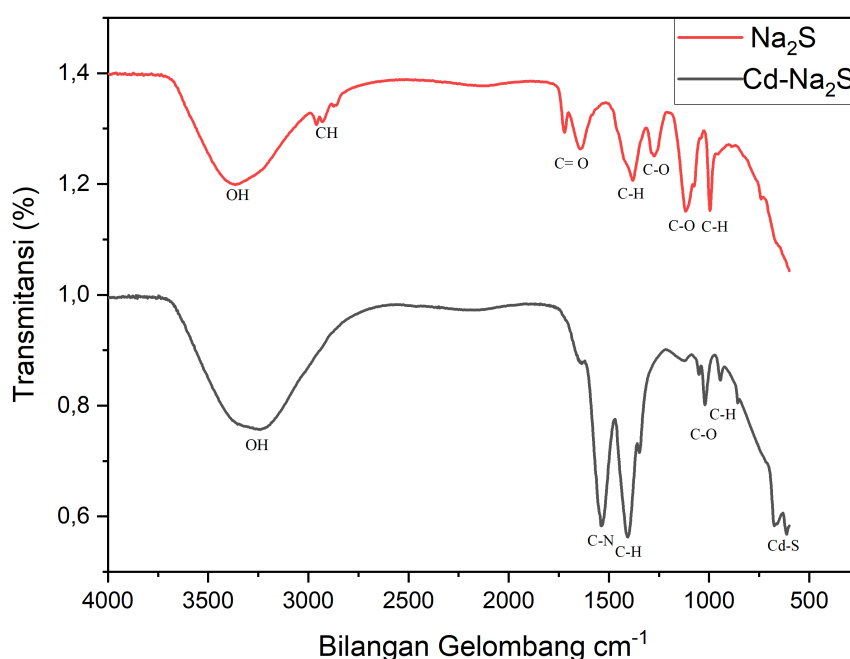
Tabel 2. Hasil optimasi komposisi ESI ion Cd^{2+} tersalut Na_2S

Komposisi Membran	Komposisi Bahan b/v			Faktor Nernst (mV/dekade)	R^2	Faktor Nernst Teoritis
	Na_2S (g)	PVC (g)	DOP (mL)			
1	0,5	0,4	0,1	7,4	0,9863	29,6 mV/dekade
2	0,6	0,3	0,1	8,3	0,9996	
3	0,7	0,2	0,1	9,5	0,9970	
4	1,0	0,1	0,1	3,8	0,9972	

Pada **Tabel 2**, menunjukkan hasil optimasi ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S , dengan faktor Nernst pada variasi pertama sebesar 7,4 mV/dekade, variasi kedua 8,3 mV/dekade, variasi ketiga 9,5 mV/dekade, dan variasi keempat 3,8 mV/dekade. Berdasarkan hasil tersebut, variasi ketiga ditetapkan sebagai komposisi optimum dan digunakan pada tahap karakterisasi berikutnya.

3.2 Karakterisasi ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dengan FT-IR

Karakterisasi ESI Cd^{2+} tersalut Na_2S dilakukan sebelum dan sesudah proses doping menggunakan FT-IR untuk mengidentifikasi gugus fungsi serta perubahan bilangan gelombang, disajikan pada **Gambar 1**.

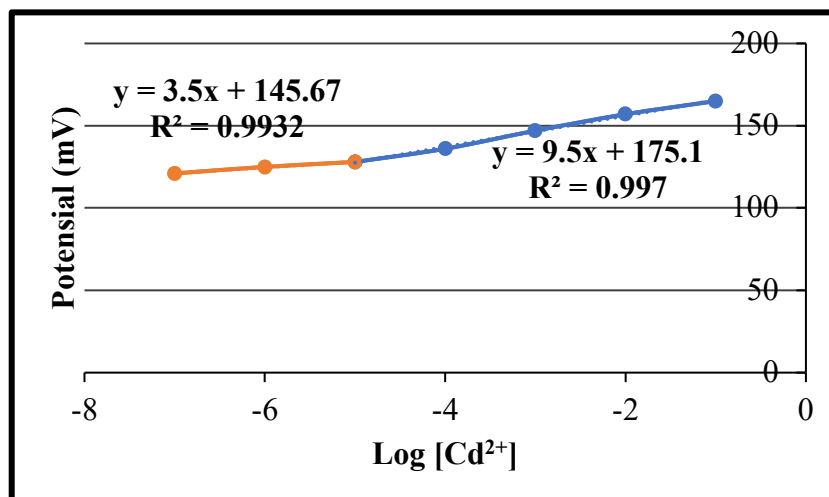


Gambar 1. Spektrum FT-IR ESI sebelum dan sesudah doping

Hasil pengujian pada **Gambar 1**. menunjukkan munculnya pita baru pada $612,75\text{ cm}^{-1}$. Pita ini merupakan ciri khas ikatan Cd-S yang menegaskan keberhasilan interaksi ion Cd^{2+} dengan gugus sulfur dalam matriks Na_2S .¹⁴ Hal ini menegaskan bahwa proses doping telah berhasil. Meskipun terjadi pergeseran bilangan gelombang, struktur utama tetap stabil dan dapat digunakan sebagai bahan fungsional dalam pembuatan ESI.

3.3 Faktor Nernst dan Batas Deteksi

Faktor Nernst adalah parameter yang menggambarkan seberapa sensitif elektroda terhadap perubahan aktivitas ion dalam larutan, dengan satuan mV/dekade. Faktor ini ditentukan dari kemiringan kurva yang menunjukkan hubungan antara log konsentrasi larutan standar (M) dengan potensial terukur (mV).⁵ Untuk ion bermuatan +2, seperti Cd^{2+} , nilai teoritis yang diharapkan berkisar 29,58 mV/dekade.



Gambar 2. Kurva Potensial (mV) Terhadap Log Konsentrasi Cd^{2+}

Berdasarkan **Gambar 2**. ESI Cd^{2+} berbasis Na_2S menunjukkan hubungan linier antara potensial (mV) dan log konsentrasi Cd^{2+} pada rentang 1×10^{-5} – 1×10^{-1} M dengan faktor Nernst 9,5 mV/dekade dan koefisien relasi 0,997. Nilai tersebut belum mencapai faktor Nernst teoritis 29,58 mV/dekade, sehingga elektroda dinyatakan belum layak.¹² Sebaliknya, penelitian Nazzala dengan bahan yang sama tanpa kawat terlapis memperoleh faktor Nernst 29,5 mV/dekade.¹⁵ Nilai tersebut menunjukkan respon elektroda tidak ideal akibat reaksi kawat Cu dengan ionofor dan Cd^{2+} , pembentukan oksida, atau ketidakseimbangan muatan di antarmuka.

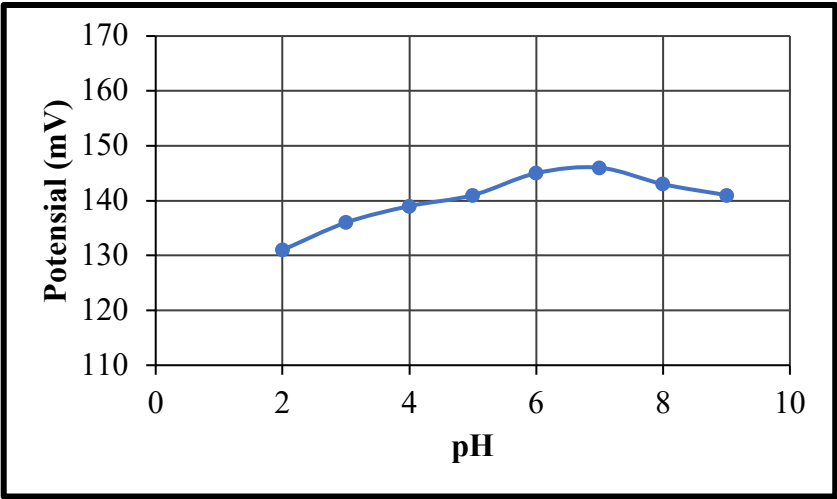
Kondisi ini menurunkan mobilitas ion dan melemahkan respon potensial. Nilai faktor Nernst yang rendah diperoleh karena adanya interferensi pada kawat Cu, dimana kawat Cu telah teroksidasi. Menurut Bobacka (1999), kelemahan elektroda tipe kawat terlapis umumnya disebabkan kontak membran-kawat Cu yang kurang stabil, sehingga potensial mudah bergeser dan sensitivitas berkurang. Batas deteksi yang diperoleh adalah 1×10^{-5} M, yang menandakan elektroda hanya mampu memberikan respon baik pada konsentrasi di atas nilai tersebut, sementara pada konsentrasi lebih rendah sensitivitasnya menurun.¹⁶ Adapun perbandingan hasil penelitian ini dengan penelitian terdahulu oleh Nazzalla (2024)¹⁵ disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Perbandingan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu

No	Keterangan	Hasil Penelitian	Penelitian oleh Nazzala (2024) ¹⁵
1.	Bahan	Na ₂ S (g): PVC (g): DOP (mL)	Na ₂ S (g): PVC (g): DOP (mL)
2.	Komposisi	0,7 g:0,2:0,1	0,6:0,3:0,1
3.	Faktor Nernst	9,5 mV/dekade	29,87 mV/dekade
4.	Batas Deteksi	1×10 ⁻⁵ M	1,2 × 10 ⁻⁴ M
5.	Pengukuran pH	6-7	4-6
6.	Waktu Tanggap	20-60 detik	10-60 detik
7.	Waktu Hidup	3 hari	5 hari
8.	Pengaruh Ion Pengganggu	Memiliki selektivitas baik terhadap ion pengganggu Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , dan SO ₄ ²⁻ .	Memiliki selektivitas baik terhadap ion pengganggu Cu ²⁺ , Zn ²⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , dan SO ₄ ²⁻ .

3.4 Pengukuran pH

ESI menunjukkan selektivitas terhadap ion target melalui interaksi dengan bahan aktif di dalamnya, di mana interaksi tersebut dipengaruhi oleh keberadaan ion H⁺ atau OH⁻ dalam larutan. Pengaruh pH terhadap kinerja ESI Cd²⁺ tersalut Na₂S ditampilkan pada **Gambar 3**.

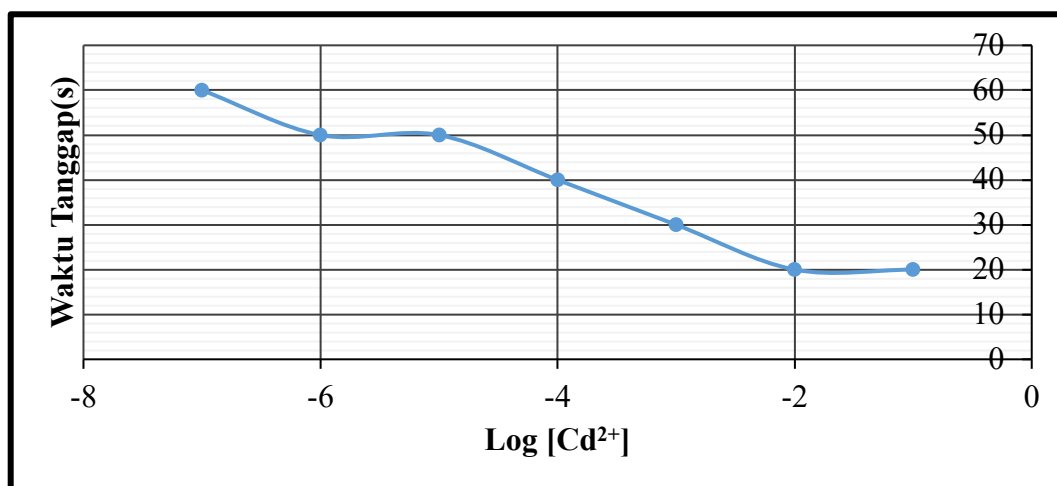


Gambar 3. Kurva potensial (mV) terhadap pH

Pengaruh pH diuji dengan pengukuran potensial pada pH 2–9. Pada **Gambar 3**, menunjukkan bahwa elektroda memberikan respon optimal pada pH 6–7. Pada pH di bawah 6, konsentrasi ion H⁺ yang tinggi bersaing dengan Cd²⁺ dalam berikatan dengan ionofor Na₂S, sehingga jumlah kompleks CdS menurun dan sensitivitas elektroda berkurang.¹⁷ Sementara itu, pada pH di atas 7, Cd²⁺ cenderung membentuk hidroksida yang tidak larut, menyebabkan berkurangnya ion Cd²⁺ bebas dan menurunkan sensitivitas serta linearitas respon elektroda.¹⁸

3.5 Waktu Tanggap (Response Time)

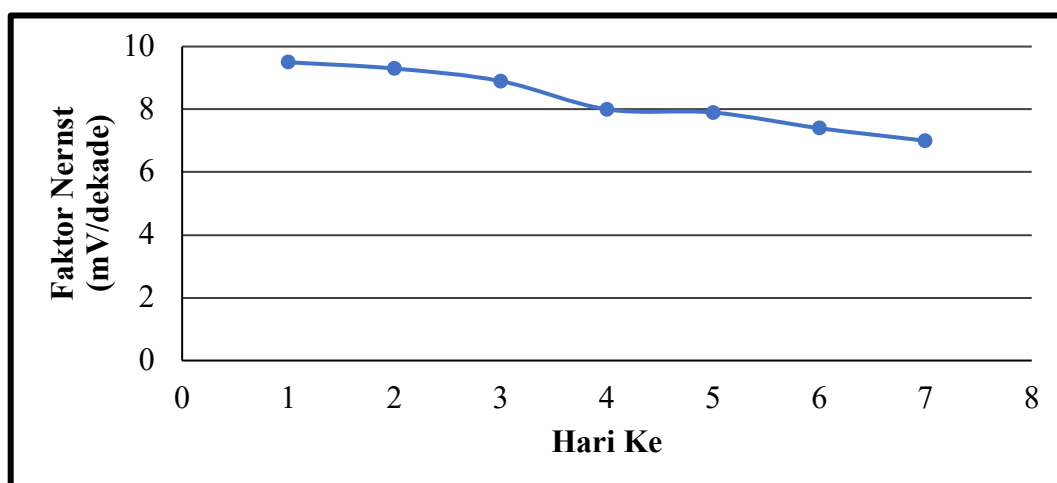
Waktu tanggap (*response time*) adalah parameter penting dalam menilai performa ESI yang mengacu pada lamanya waktu yang dibutuhkan elektroda untuk mencapai kondisi potensial yang stabil. Data pada **Gambar 4** menunjukkan bahwa elektroda memiliki waktu tanggap antara 20-60 detik. Pada konsentrasi tinggi, jumlah ion Cd²⁺ lebih banyak sehingga mobilitas meningkat dan kesetimbangan tercapai lebih cepat. Pada konsentrasi rendah, jumlah ion terbatas sehingga interaksi dengan ESI melambat dan waktu mencapai kesetimbangan menjadi lebih lama.¹²



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi Cd²⁺ terhadap waktu tanggap

3.6 Waktu Hidup (*Life Time*)

Waktu hidup (*life time*) ESI menjadi indikator penting untuk menilai kualitas elektroda pada penggunaan jangka panjang. Pengujian waktu hidup ESI dilakukan selama 7 hari. Hasil pengukuran ditampilkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Kurva Potensial Faktor Nernst Selama 7 Hari

Berdasarkan kurva pada **Gambar 4**, nilai faktor Nernst menunjukkan penurunan bertahap dari 9,5 mV/dekade pada hari pertama menjadi 9,3 mV/dekade di hari kedua, 8,9 mV/dekade di hari ketiga, 8 mV/dekade di hari keempat, 7,9 mV/dekade di hari kelima, 7,4 mV/dekade di hari keenam, dan mencapai 7 mV/dekade pada hari ketujuh. Penurunan ini menunjukkan bahwa performa elektroda menurun seiring waktu, sehingga dapat disimpulkan bahwa elektroda hanya efektif digunakan hingga hari ketiga. Penurunan kinerja ESI terhadap ion Cd²⁺ dapat terjadi akibat durasi kontak membran yang terlalu lama dengan air selama proses penggunaan. Paparan yang berkepanjangan ini dapat memicu terjadinya pembengkakan (*swelling*) pada ESI, yang kemudian menyebabkan berkurangnya sifat elastisitas ESI. Selain itu, senyawa aktif seperti ionofor dapat terlarut keluar dari permukaan membran ke dalam larutan melalui proses *leaching*, yang pada akhirnya dapat mengganggu kestabilan komposisi membran dan menurunkan performa elektroda.¹⁹

3.7 Pengaruh Ion Pengganggu (*Selectivity*)

Selektivitas ESI menunjukkan kemampuannya membedakan ion Cd²⁺ dari ion pengganggu. Apabila selektivitas ESI rendah, keberadaan ion pengganggu dapat menghasilkan respon

potensial yang keliru dan membuat hasil pengukuran tidak tepat. **Tabel 4.** menampilkan nilai koefisien selektivitas ($K_{i,j}$) terhadap ion pengganggu.

Tabel 4. Nilai koefisien selektivitas ($K_{i,j}$) terhadap ion pengganggu

Ion Pengganggu	$K_{i,j}$
Zn^{2+}	2×10^{-11}
Cl^-	1×10^{-11}
Cu^{2+}	2×10^{-11}
SO_4^{2-}	3×10^{-11}
NO_3^-	6×10^{-12}

Ion Zn^{2+} dan Cu^{2+} dipilih karena mampu berinteraksi dengan ionofor Na_2S , sedangkan ion Cl^- , SO_4^{2-} , dan NO_3^- digunakan untuk menguji kemungkinan gangguan dari ion yang tidak membentuk sulfida stabil. Data pada **Tabel 4.** menunjukkan nilai koefisien selektivitas ($K_{i,j}$) ion-ion tersebut berada pada rentang 2×10^{-11} hingga 6×10^{-12} , seluruhnya lebih kecil dari 1. Yang menandakan elektroda lebih sensitif terhadap ion utama dibanding ion pengganggu, sehingga kehadiran ion asing tidak memengaruhi hasil secara signifikan.²⁰

4. KESIMPULAN

Komposisi optimum ESI Cd^{2+} berbasis Na_2S diperoleh pada perbandingan $Na_2S:PVC:DOP$ sebesar 0,7 g:0,2 g:0,1 mL. Elektroda ini memiliki faktor Nernst 9,5 mV/dekade dengan batas deteksi hingga 1×10^{-5} M. Kinerja terbaik ditunjukkan pada pH 6–7 dengan waktu tanggap 20–60 detik dan masa pakai efektif 3 hari. Uji selektivitas terhadap ion pengganggu seperti Zn^{2+} , Cl^- , Cu^{2+} , SO_4^{2-} , dan NO_3^- menunjukkan bahwa ion-ion tersebut tidak memengaruhi kinerja ESI secara signifikan. Elektroda ini merupakan studi awal yang masih memerlukan optimasi lebih lanjut, baik pada material kawat pendukung maupun komposisi membran, untuk mencapai respons yang mendekati nilai Nernstian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ardiyanti, A., dan Kuntjoro, S. (2022). Analisis Kadar Logam Berat Kadmium (Cd) pada Tumbuhan Kangkung Air (*Ipomoea aquatica* F.) di Sungai Prambon Sidoarjo. *LenteraBio Berk. Ilm. Biol.*, vol. 11, no. 3, 414–422.
2. Karamina, H. T., Murti, A. T., dan Mujoko, T. (2021). Kandungan Logam Berat Fe, Cu, Zn, Pb, Co, Br pada Air Lindi Di Tiga Lokasi Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Dadaprejo, Kota Batu, Dau dan Supit Urang, Kabupaten Malang. *J. Ilm. Hijau Cendekia*, vol. 6, no. 2, 51–57.
3. Harahap, A. A. F., Khairunnisa, K., dan Novalia V. (2022). Analisis Unsur Logam Berat Kadmium pada Kerang Darah di Pasar Tradisional Kota Lhokseumawe. *Glosains J. Sains Glob. Indones.*, vol. 3, no. 2, 79–86.
4. Rismiarti, Z., Bisri, C., dan Irnawati, Y. (2015). Elektroda Selektif Ion (ESI) Tetraborat Tipe Kawat Terlapis Berbasis Zeolit. *Chem. Prog.*, vol. 8, no. 1, 6–11.
5. Panggabean, A. S., Hardianti, dan Pasaribu, S. P. (2017). Ion Selective Electrode-Copper(II) Based on EDTA as Ionophores in Poly(vinyl chloride) Matrix. *Asian J. Chem.*, vol. 29, no. 2, 362–366.
6. Fardiyah, Q., Berlianti, B., dan Rosemiyani, I. (2015). Pengaruh Ion Na^+ , Ion Hg^{2+} dan Ion Cr^{3+} Terhadap Kinerja Sensor Potensiometri Ion Timbal (II) Tipe Kawat Terlapis Berbasis Pirofilit. *J. Kim. Val.*, vol. 1, no. 2, 80–83.
7. Sulistyani, M., Kusumastuti, E., Huda, N., dan Mukhayani, F. (2021). Method Validation on Functional Groups Analysis of Geopolymer with Polyvinyl Chloride (PVC) as Additive Using Fourier Transform Infrared (FT-IR). *Indones. J. Chem. Sci.*, vol. 10, no. 3, 198–205.
8. Umaningrum, D., Nurmasari, R., Hasnah, S., Astuti, M. D., Wardhani, K. A., dan Qalby, S. (2021). The Coated-Wire Ion-Selective Electrode (CWISE) of Tartrazine Using Chitosan as an Ionophore. *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 24, no. 6, 206–212.

9. Wang, P., Liu, H., Zhou, S., Chen, L., Yu, S., dan Wei, J. (2023). A Review of the Carbon-Based Solid Transducing Layer for Ion-Selective Electrodes. *Molecules*, vol. 28, no. 14.
10. Padang, D. A. T. (2024). Pembuatan Elektroda Selektif Ion (ESI) Tersalut Nanopartikel Perak Termomodifikasi Kitosan (AgNPs-Chi) Tipe Kawat Terlapis Sebagai Sensor Cd^{2+} Secara Potensiometri. Universitas Mulawarman.
11. Yuntarso, A., Harsini, M., Herawati, D., dan Ngibad, K. (2018). Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda Selektif Ion Pb^{2+} Jenis Kawat Perak Terlapis Dengan Ionofor 1,10-Dibenzyl-1,10-Diaza-18-Crown-6. *J. SainHealth*, vol. 2, no. 1, 21–30.
12. Panggabean, A. S., Gripaldi, F., dan Pasaribu, S. P. (2021). Preparation and Characterization of Pb(II) Ion Selective Electrode based on Dithizone as Chemical Sensor. *Anal. Bioanal. Electrochem.*, vol. 13, no. 3, 383–392.
13. Umaningrum, D. (2021). Pembuatan Sensor Methanil Yellow Tipe Kawat Terlapis Berbasis Kitosan menggunakan Dioktil Sebakat (DOS) sebagai Plasticizer. *Akta Kim. Indones.*, vol. 6, no. 1, 1–11.
14. Elfalaky, A., Mansur, A. F., dan Maged, F. A. (2015). Polyaniline-CdS Nanocomposite; Synthesis, Structural, Thermal and Spectroscopic Analysis.
15. Nazzala, Z. O. (2024). Pembuatan dan Karakterisasi Membran Elektroda Ion Cd^{2+} Sebagai Sensor Kimia Secara Potensiometri Berbasis Polivinil Klorida (PVC) Menggunakan Natrium Sulfida (Na_2S) Sebagai Ionofor. Universitas Mulawarman.
16. Bobacka, J. (1999). Potential stability of all-solid-state ion-selective electrodes using conducting polymers as ion-to-electron transducers. *Anal. Chem.*, vol. 71, no. 21, 4932–4937.
17. Li, L. Z., Yu, S. Y., Peijnenburg, W. J. G. M., dan Luo, Y. M. (2017). Determining the fluxes of ions (Pb^{2+} , Cu^{2+} and Cd^{2+}) at the root surface of wetland plants using the scanning ion-selective electrode technique. *Plant Soil*, vol. 414, no. 1–2, 1–12.
18. Mohan, C., dan Chandra, S. (2018). Analytical & Electrochemical Studies.
19. Nisah, K. et al. (2022). Optimization of Castor Oil-Based Ion Selective Electrode (ISE) with Active Agent 1,10-Phenanthroline for Aqueous Pb^{2+} Analysis. *Membranes*, vol. 12, no. 987, 1–15.
20. Iyabu, H. (2014). *Pengantar Elektrode Selektif Ion (ESI)*, Cetakan ke-1. Gorontalo: UNG Press Gorontalo.