

Prinsip Kerja Sensor Elektrokimia dalam Penentuan *Chemical Oxygen Demand (COD): Review*

Principle of Electrochemical Sensor in Chemical Oxygen Demand (COD) Determination: A Review

Nur Indah Wardani^{1*}, Septi Purwaningsih², Annisa Yuliana Angeline¹,
Sari Sekar Ningrum¹, Muhamad Sofi Ardani¹ & Zhilal Shadiq¹

¹Program Studi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap, Cilacap,
Indonesia

² Program Studi Akuntansi Lembaga Keuangan Syariah, Politeknik Negeri Cilacap, Cilacap, Indonesia

Abstrak

Peningkatan kebutuhan sumber air akibat tingginya populasi masyarakat memerlukan perhatian terhadap uji kualitas air. *Chemical Oxygen Demand (COD)* adalah indikator jumlah limbah organik di dalam air. Penggunaan sensor elektrokimia dalam pengukuran COD memberikan keuntungan lebih, seperti sensitivitas tinggi dan biaya murah. Pengukuran COD menggunakan sensor elektrokimia didasarkan pada reaksi oksidasi elektrokimia senyawa organik melalui reaksi dengan radikal hidroksil (.OH) pada elektroda kerja (WE). Terdapat 2 prinsip kerja yang digunakan dalam reaksi oksidasi limbah organik, yaitu degradasi fotokatalitik dan oksidasi elektrokatalitik. Melalui degradasi fotokatalitik, limbah organik dioksidasi pada permukaan material fotokatalitik di bawah pencahayaan (*light illumination*) yang telah menghasilkan radikal hidroksil (.OH). Pada oksidasi elektrokatalitik menggunakan anoda (BDD, PbO₂, dan Cu) yang mempunyai kemampuan elektrokatalitik untuk melakukan proses reaksi oksidasi limbah organik.

Kata Kunci: *chemical oxygen demand, sensor elektrokimia, degradasi fotokatalitik, oksidasi elektrokatalitik*

Abstract

The increasing demand for water resources due to population growth necessitates attention to water quality testing. Chemical Oxygen Demand (COD) is a critical parameter of the amount of organic waste in water. The use of electrochemical sensors for COD measurement offers several advantages, such as high sensitivity and low cost. COD measurement using electrochemical sensors is based on the electrochemical oxidation of organic compounds through reactions with hydroxyl radicals (.OH) on the working electrode (WE). There are two main working principles utilized in the oxidation of organic waste: photocatalytic degradation and electrocatalytic oxidation. Through photocatalytic degradation, organic waste is oxidized on the surface of photocatalytic materials under light illumination, generating hydroxyl radicals (.OH). In electrocatalytic oxidation, anodes (BDD, PbO₂, and Cu) with electrocatalytic capabilities are used to facilitate the oxidation process of organic waste.

Keywords: *chemical oxygen demand, electrochemical sensor, photocatalytic degradation, electrocatalytic oxidation*

*Corresponding author:

Nur Indah Wardani

Program Studi Teknik Pengendalian Pencemaran Lingkungan, Politeknik Negeri Cilacap
Jl. Dr. Soetomo No. 1 Sidakaya Cilacap - Jawa Tengah 53212

Email: nurindahwardani@pnc.ac.id

Pendahuluan

Air merupakan sumber daya alam yang sangat penting bagi kehidupan manusia, hewan, dan tanaman. Namun bergantung pada kualitasnya, air dapat menjadi sumber kehidupan atau menjadi penyebab berbagai penyakit (Demetillo *et al.* 2019). Salah satu parameter utama dalam pengujian air adalah *Chemical Oxygen Demand* (COD), yang digunakan sebagai indikator jumlah limbah organik dalam air. COD didefinisikan sebagai jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi limbah organik dalam air. Nilai COD menunjukkan kualitas air terhadap pencemaran zat-zat organik yang teroksidasi oleh mikroorganisme yang mengakibatkan berkurangnya oksigen terlarut dalam air (Duan *et al.* 2022a, Wang *et al.* 2022).

Metode standar untuk penentuan COD umumnya menggunakan metode titrasi dengan oksidator kuat seperti kalium permanganat (KMnO_4) dan kalium dikromat ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) (Boyles 1997). Namun, zat-zat ini bersifat toksik dan berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Metode ini juga memiliki keterbatasan karena penggunaan perak sulfat (Ag_2SO_4) yang mahal, dan asam sulfat (H_2SO_4) pekat yang berbahaya. Selain itu, metode ini memerlukan waktu refluks yang lama, yaitu antara 2 hingga 4 jam, kompleks, dan sensitivitas yang rendah (Li *et al.* 2018). Beberapa metode analisis seperti spektrofotometri (Qian Li *et al.* 2024, Guan *et al.* 2024) dan elektrokimia (Lambertz *et al.* 2024) sudah dikembangkan untuk penentuan COD baik secara langsung maupun tidak langsung. Metode elektrokimia lebih superior karena mempunyai kelebihan, seperti lebih sederhana, cepat, dapat diotomatisasi, dan sensitivitas tinggi dalam penentuan COD (Fang *et al.* 2021).

Namun, sensor elektrokimia untuk penentuan COD belum banyak dikembangkan. Review ini bertujuan memberikan pengetahuan tentang sensor elektrokimia, prinsip penentuan COD menggunakan sensor elektrokimia, dan metode elektrokimia yang digunakan untuk penentuan COD untuk mendorong pengembangan sensor elektrokimia COD.

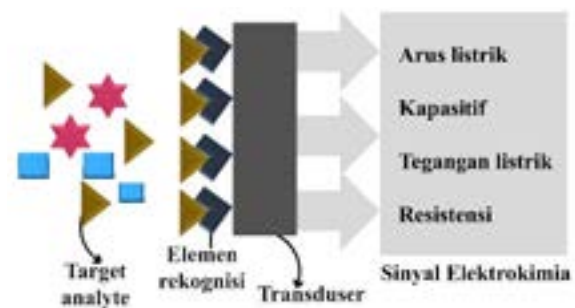
Materi dan Metode

Review ini menggunakan literatur mengenai penentuan COD menggunakan sensor elektrokimia berupa jurnal-jurnal internasional terbaru. Kriteria inklusi pada review ini berupa jurnal internasional tentang prinsip sensor elektrokimia dan penentuan COD menggunakan sensor elektrokimia terbaru dalam *Scopus database* (2019-2024). Jumlah jurnal yang digunakan sebagai acuan dalam penyusunan review jurnal ini sebanyak lebih dari 30 jurnal.

Hasil

Sensor Elektrokimia

Sensor elektrokimia terdiri dari dua elemen, transduser elektrokimia dan elemen pengenalan (*recognition element*). Sensor ini mampu memberikan informasi yang akurat dan *real-time* terhadap pengukuran COD yang dapat diamati melalui sinyal listrik (Kanoun *et al.* 2021). Sinyal elektrokimia seperti arus listrik, kapasitas, tegangan listrik, dan resistansi (Gambar 1), dapat diamati karena adanya interaksi antara target analit dan elemen pengenalan yang diubah oleh transduser elektrokimia (Bandodkar and Wang 2014).



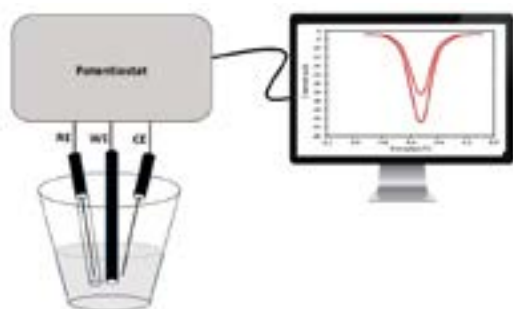
Gambar 1. Skema sensor elektrokimia (Bandodkar and Wang 2014)

Sistem sensor elektrokimia (Gambar 2) terdiri atas konfigurasi tiga elektroda dan larutan elektrolit. Larutan elektrolit berfungsi untuk mengurangi resistensi larutan. Ketika terjadi transfer elektron dari elektroda ke target analit, ion-ion dalam larutan bergerak untuk menyeimbangkan muatan dan menutup sirkuit listrik. Konfigurasi tiga elektroda mencakup elektroda kerja (*working electrode*, WE), elektroda

Table 1. Parameter analisis dalam pengukuran COD menggunakan prinsip degradasi fotokatalitik.

No.	Elektroda kerja (WE)	Limit deteksi (mg/L)	Daerah konsentrasi linier (mg/L)	Metode pengukuran	Analit	Ref.
1.	3D Pt-NPs/TNTAs/Ti ITO elektroda	0,12	1,44-672	Kronoamperometri	Glukosa	(Si <i>et al.</i> 2019)
2.	modifikasi TiO ₂ /CuS dan Pt	0,017	0,05-50	Potensiometri	Glukosa, asam asetat, fenol,	(Hao <i>et al.</i> 2021)
3.	NiFe ₂ O ₄ /SrTiO ₃ -GCE	0,222 μ M	1mM-10 mM	Voltametri sapuan linier (LSV)	Hydrazine	(Lam <i>et al.</i> 2024)
4.	FeN ₅ SACs-TiO ₂ NTAs SPCS	1,38	0,5-49,4	Potensiometri	Campuran senyawa organik	(Zhang <i>et al.</i> 2025)
5.	TF/PT/SnO ₂ -Sb	3,03	20-6000	Amperometri	Glukosa	(Huo <i>et al.</i> 2024)
6.	A/R-TiO ₂	0,10	1,0-300	Kronoamperometri	Senyawa organik	(Zhang <i>et al.</i> 2024)
7.	FTO/TiO ₂ /PbO ₂	0,7	5-100	Amperometri	Glukosa	(Wang <i>et al.</i> 2023)
8.	Tib/SnO ₂ -Sb ₂ O ₃ /nano- β -PbO ₂	0,8	500-9000	Voltametri sapuan linier (LSV)	Glukosa	(Wang <i>et al.</i> 2022)
9.	CuO _x /Cu foam elektroda	0,96 ppm	5-600 ppm	Voltametri sapuan linier (LSV)	Glukosa, asam askorbat, sukrosa, laktosa, glisin	(Pei Li <i>et al.</i> 2024)
10.	Ni(OH) ₂ /GCE	2,3	10-340	Amperometri	Glukosa	(Jin <i>et al.</i> 2024)
11.	CuCoOx-modified electrode	5,957	96,3-481,5	Amperometri	Glukosa	(Dong <i>et al.</i> 2024)
12.	AuNPs/ Au elektroda	0,12	0-400	kronoamperometri	Glukosa	(Xie <i>et al.</i> 2024)
13.	BDD thin-film elektroda	1,1	0-80	Amperometri	Fenol, asam malonik	(Latifah <i>et al.</i> 2023)
14.	BDD elektroda	3,899	5-200	Kronoamperometri	Glukosa	(Lin <i>et al.</i> 2023)
15.	C/SiO ₂ elektroda	32,2	53-670	Kronoamperometri	Glukosa	(Duan <i>et al.</i> 2022b)
16.	SPE_Cu/C elektroda	26	0-400	Kronoamperometri	Glukosa	(Duan <i>et al.</i> 2022a)
17.	Nano-Cu/Cu-wire elektroda	2,6	2-595	Amperometri	Glisin	(Elfeky <i>et al.</i> 2022)
18.	Ni/ZnO/Cu	0,6036	2,3603-577,8	Amperometri	Glukosa	(Fang <i>et al.</i> 2021)
19.	PbO ₂ elektroda	2,05	4,17-200	Amperometri	Kalium hydrogen ftalat	(Yin <i>et al.</i> 2021)
20.	CuONf/Cu elektroda	2,11	50-1000	Voltametri sapuan linier (LSV)	Glukosa	(Carchi <i>et al.</i> 2019)

pembanding (*reference electrode*, RE), dan elektroda pendukung (*counter electrode*, CE).



Gambar 2. Skema sistem sensor elektrokimia (Cotchim 2020, Wang *et al.* 2021)

Elektroda kerja (working electrode, WE)

Elektroda kerja merupakan tempat terjadinya reaksi kimia karena aplikasi potensial. Elektroda ini dapat dibuat dari berbagai material, seperti karbon, kaca, dan merkuri. Potentiostat akan mengontrol potensial yang di berikan pada elektroda kerja sebagai fungsi dari potensial elektroda pembanding (Westbroek 2005).

Elektroda pembanding (reference electrode, RE)

Dalam sel elektrokimia, elektroda pembanding memberikan potensial yang stabil dan diketahui, yang digunakan sebagai

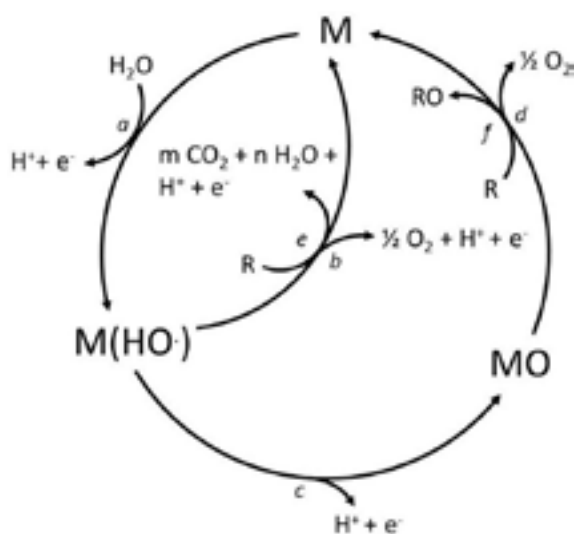
titik referensi terhadap potensial elektrode lain yang diukur (Westbroek 2005).

Elektroda pendukung (counter electrode, CE)

Ketika potensial diberikan pada elektroda kerja, analit akan mengalami reduksi atau oksidasi, dan arus listrik akan mengalir. Elektroda pendukung melengkapi sirkuit listrik yang digunakan. Arus listrik yang dimonitor adalah aliran electron antara elektroda kerja dan elektroda pendukung (Westbroek 2005).

Prinsip Pengukuran COD Menggunakan Sensor Elektrokimia

Pengukuran COD dengan sensor elektrokimia didasarkan pada oksidasi senyawa organik yang terlarut dalam air. Gambar 3 menunjukkan oksidasi polutan atau limbah organik dapat terjadi secara langsung di anoda melalui pembentukan radikal hidroksil (.OH) atau oksigen aktif yang terkemisorpsi (*chemisorbed*). Proses ini disebut oksidasi anodik atau



Gambar 3. Mekanisme oksidasi elektrokimia senyawa organik: (a) pembentukan radikal hidroksil (.OH), (b) evolusi oksidan melalui oksidasi elektrokimia radikal hidroksil (.OH), (c) pembentukan oksida metal dengan tingkat oksidasi lebih tinggi, (d) evolusi oksigen melalui dekomposisi kimia oksida logam tingkat oksidasi tinggi, (e) pembakaran elektrokimia senyawa organik melalui radikal hidroksil (.OH), dan (f) konversi elektrokimia senyawa organik melalui oksida logam. (Dicitak ulang dari Martínez-Huitle & Ferro, 2018 dengan izin).

oksidasi langsung, yang memungkinkan penghancuran total senyawa organik atau konversinya secara selektif menjadi produk oksidasi (Martínez-Huitle and Ferro 2006). Umumnya, pengukuran COD dengan sensor elektrokimia direpresentasikan oleh senyawa organik seperti glukosa, glisin, dan kalium hydrogen ftalat. Proses oksidasi anodik dapat dilakukan melalui prinsip degradasi fotokatalitik dan oksidasi elektrokatalitik.

Degradasi fotokatalitik

Degradasi fotokatalitik merupakan proses pemanfaatan cahaya/sinar (*light illumination*) sebagai sumber energi untuk mendegradasi polutan atau limbah organik dalam air melalui oksidasi pada material semikonduktor yang berada pada elektroda kerja (WE). Proses ini diawali dengan penyerapan cahaya oleh material semikonduktor, yang menyebabkan perpindahan elektron dari pita valensi menuju pita konduksi. Kemudian, molekul air (H_2O) akan berinteraksi dengan elektron di pita konduksi menghasilkan senyawa superoksida (O_2^-), sementara air (H_2O) yang berinteraksi dengan muatan positif (*holes*) di pita valensi menghasilkan radikal hidroksil (.OH). Polutan organik dalam air akan terdegradasi oleh radikal hidroksil (.OH) melalui reaksi oksidasi (Hao *et al.* 2021, Si *et al.* 2019, Lam *et al.* 2024, Zhang *et al.* 2025, Huo *et al.* 2024, Zhang *et al.* 2024, Wang *et al.* 2023, Wahyudi *et al.*, 2023).



Gambar 4. Mekanisme pengukuran COD menggunakan CuS/TiO_2 modifikasi elektroda ITO dan Pt (Dicitak ulang dari Hao *et al.*, 2021 dengan izin).

Gambar 4 menunjukkan mekanisme pengukuran yang dilakukan oleh Hao *et*

al. (2021) menggunakan elektroda ITO (*indium tin oxide*) yang dimodifikasi dengan CuS/TiO_2 pada fotoanoda dan Pt pada katoda untuk menghasilkan reaksi radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$), yang selanjutnya bereaksi dengan limbah organik melalui mekanisme fotokatalitik. Perbedaan tegangan listrik diantara fotoanoda dan katoda yang sebanding dengan nilai COD terpantau melalui metode potensiometri. Nilai COD dapat diukur melalui perubahan sinyal tegangan dalam waktu lima menit. Sensor ini memiliki daerah konsentrasi linier pengukuran 0,05-50 mg/L dan limit deteksi 0,017 mg/L (Hao *et al.* 2021).

Penggunaan prinsip degradasi fotokatalitik dalam pengukuran COD memiliki keuntungan, antara lain tidak memerlukan reagen yang berbahaya, mudah dalam pengoprasian, serta memiliki sensitivitas tinggi. Namun, metode ini memerlukan sumber cahaya sebagai sumber penghasil radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$). Ragam parameter analisis dalam pengukuran COD menggunakan prinsip degradasi fotokatalitik disajikan dalam Tabel 1.

Oksidasi elektrokatalitik

Oksidasi elektrokatalitik merupakan proses oksidasi langsung dengan menggunakan elektroda dengan konduktivitas tinggi dan bersifat elektrokatalitik. Pengukuran COD dengan prinsip oksidasi elektrokatalitik telah dilakukan menggunakan berbagai elektroda kerja (WE) seperti *boron doped diamond* (BDD) (Latifah *et al.* 2023, Lin *et al.* 2023), PbO_2 (Wang *et al.* 2023), emas (Au) (Xie *et al.* 2024), SiO_2 (Duan *et al.* 2022a, Duan *et al.* 2022b) dan tembaga (Cu) (Pei Li *et al.* 2024, Dong *et al.* 2024, Elfeky *et al.* 2022, Carchi *et al.* 2019, Fang *et al.* 2021). Melalui aplikasi tegangan potensial pada elektroda kerja (WE) dalam medium basa, molekul air (H_2O) teradsorpsi pada permukaan elektroda dan menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) untuk berinteraksi dengan polutan organik.

Elektroda komposit nano- PbO_2 terbaru telah dibuat oleh Wang *et al.* (2022) menunjukkan potensi sangat baik dalam penentuan COD dengan biaya rendah,

sensitivitas deteksi yang tinggi. Prinsip pengukuran COD menggunakan elektroda PbO_2 dapat dilihat pada Gambar 5a. Oksidasi dan mineralisasi zat organik menyebabkan ketidakseimbangan $\cdot\text{OH}$ dan mengubah nilai arus pada elektroda kerja, sehingga menghasilkan respons arus pada elektroda PbO yang sebanding dengan nilai COD dalam air (Wang *et al.* 2022).

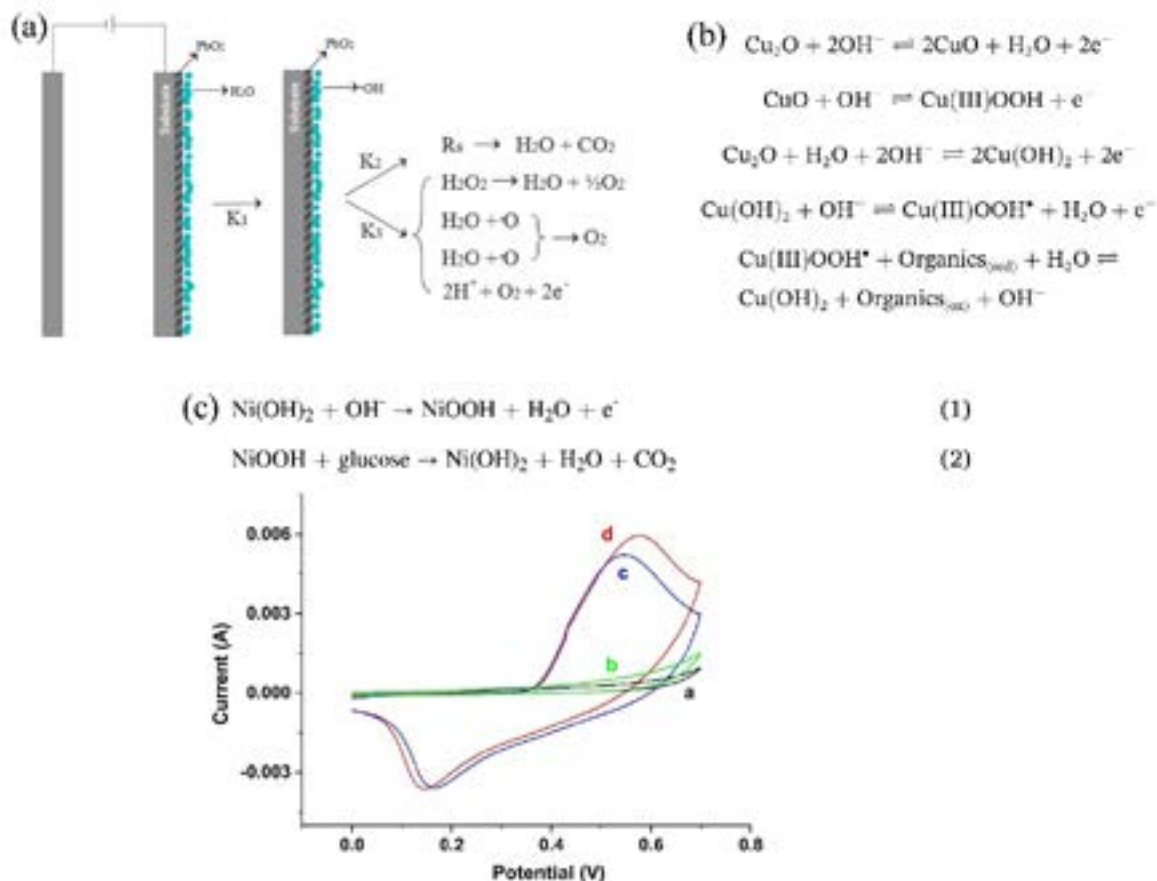
Gambar 5b menunjukkan mekanisme pengukuran COD yang dilakukan oleh P. Li *et al.* (2024) menggunakan elektroda $\text{CuOx}/\text{Cu foam}$ melibatkan berbagai reaksi redoks spesies tembaga (Cu) dan limbah organik yang berkontribusi pada proses oksidasi COD. Elektroda yang dikembangkan menunjukkan kemampuan anti interferensi, sensitivitas tinggi, dan stabilitas yang tinggi.

Jin *et al.* (2024) mengembangkan modifikasi elektroda karbon kaca (GCE) dengan nikel(II) hidroksida ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) untuk penentuan COD dalam sampel air. Gambar 5c menunjukkan reaksi elektroda $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{GCE}$ terhadap glukosa sebagai representasi dari COD. Siklik voltammogram pada Gambar 5c juga menunjukkan bahwa puncak oksidasi yang meningkat menunjukkan kemampuan elektrokatalitik $\text{Ni}(\text{OH})_2/\text{GCE}$ terhadap oksidasi glukosa.

Penentuan nilai COD menggunakan prinsip oksidasi elektrokatalitik yang telah dilakukan menunjukkan operasi yang sederhana, sensitivitas tinggi, dan penggunaan bahan yang tidak berbahaya, namun prinsip ini memerlukan material elektroda yang mempunyai kemampuan katalitik tinggi untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$).

Pengukuran COD menggunakan sensor elektrokimia melalui degradasi fotokatalitik dan oksidasi katalitik telah menunjukkan pengukuran yang mempunyai sensitivitas tinggi, deteksi limit rendah, dan tidak menggunakan zat-zat yang bersifat toksik dan berbahaya.

Penggunaan material elektroda untuk menghasilkan radikal hidroksil ($\cdot\text{OH}$) masih terbatas dan perlu dilakukan pengembangan untuk mendapatkan pengukuran COD yang lebih mudah, biaya operasi lebih murah, dan memiliki selektivitas yang tinggi terhadap



Gambar 5. (a) Diagram prinsip reaksi dari penentuan COD menggunakan PbO_2 , (b) mekanisme reaksi oksidasi COD menggunakan elektroda $CuOx/Cu\ foam$, dan (c) mekanisme reaksi dan siklus voltammogram dari elektroda $Ni(OH)_2/GCE$ (Ditetak ulang dari Wang *et al.* 2022; P.Li *et al.* 2024; Jin *et al.* 2024 dengan izin).

interferensi dari ion klorida dalam air.

Metode Elektrokimia

Metode potensiometri yang digunakan untuk pengukuran COD didasarkan pada pengukuran perbedaan potensial yang terjadi akibat proses oksidasi senyawa organik dengan menggunakan elektroda kerja (WE) dan elektroda pembanding (RE) ketika tidak ada arus listrik yang mengalir dalam sel elektrokimia (Zhang *et al.* 2025). Sedangkan pada metode voltametri, potensial yang diberikan terhadap elektroda kerja (WE) berubah-ubah, dan puncak arus dalam voltammogram menunjukkan terjadinya reaksi. Ketinggian puncak, yang dipengaruhi oleh konsentrasi zat yang dioksidasi seperti dalam pengukuran COD di sampel air, berfungsi sebagai sinyal pengukuran yang sebanding dengan nilai COD (Lam *et al.* 2024, Wang *et al.* 2022, Pei Li *et al.* 2024, Carchi *et al.*

2019). Kalibrasi diperlukan, tetapi metode ini adalah yang tercepat di antara ketiga metode, karena tidak memerlukan waktu tunggu untuk mencapai arus dasar yang konstan (Lambertz *et al.* 2024).

Metode elektrokimia, seperti amperometri, potensiometri, dan voltametri telah digunakan dalam penentuan konsentrasi COD dalam sampel air. Metode amperometri menerapkan potensial konstan diantara elektroda kerja (WE) dan elektroda pembanding (RE), dengan potensial yang mengakibatkan oksidasi senyawa organik berlangsung tanpa evolusi oksigen yang signifikan (Si *et al.* 2019, Huo *et al.* 2024, Zhang *et al.* 2024, Wang *et al.* 2023, Jin *et al.* 2024, Dong *et al.* 2024, Xie *et al.* 2024, Latifah *et al.* 2023, Lin *et al.* 2023, Duan *et al.* 2022a, Duan *et al.* 2022b, Elfeky *et al.* 2022, Fang *et al.* 2021, Yin *et al.* 2021). Penggunaan metode ini menghasilkan deteksi limit yang sangat rendah dan daerah linier konsentrasi

yang luas. Metode ini juga paling banyak digunakan dalam pengukuran COD.

Kesimpulan

Pengukuran COD dengan sensor elektrokimia didasarkan pada proses oksidasi senyawa organik dalam air. Terdapat dua prinsip dalam reaksi oksidasi limbah organik tanpa menggunakan zat toksik seperti KMnO_4 dan $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, yaitu degradasi fotokatalitik dan oksidasi elektrokatalitik. Pemilihan prinsip oksidasi ini disesuaikan dengan jenis elektroda kerja (WE) dan metode elektrokimia yang digunakan untuk memperoleh hasil pengukuran COD dengan sensitivitas tinggi, selektivitas tinggi, serta daerah konsentrasi linier yang luas. Metode elektrokimia, seperti amperometri, potensiometri, dan voltametri, mendukung pengukuran COD yang lebih mudah, murah, dan mendapatkan hasil pengukuran dengan sensitivitas tinggi. Oleh karena itu, sensor elektrokimia untuk pengukuran COD memiliki potensi besar untuk dikembangkan dalam bentuk perangkat *portable* yang dapat digunakan secara *real-time* dan pemantauan langsung di lapangan.

Daftar Pustaka

Bandodkar, A. J. & Wang, J. (2014). Non-invasive wearable electrochemical sensors: a review. *Trends in Biotechnology*, 32(7), 363-371.

Boyles, W. (1997). Chemical oxygen demand. *Technical information series, Booklet*, (9), 24.

Carchi, T., Lapo, B., Alvarado, J., Espinoza-Montero, P. J., Llorca, J. & Fernández, L. (2019). A Nafion Film Cover to Enhance the Analytical Performance of the CuO/Cu Electrochemical Sensor for Determination of Chemical Oxygen Demand. *Sensors*, 19(3)

Cotchim, S. (2020). Development of Electrochemical Sensors for Clinical, Forensic Science and Pharmaceutical Analyses. Unpublished Thesis (Dissertation), Prince of Songkla University.

Demetillo, A. T., Japitana, M. V. & Taboada, E. B. (2019). A system for monitoring water quality in a large aquatic area using

wireless sensor network technology. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 12.

- Dong, Z., Zhu, X., Tang, J., Liao, Y., Cheng, X., Tang, L. & Fang, L. (2024). An integrated smartphone-based electrochemical detection system for highly sensitive and on-site detection of chemical oxygen demand by copper-cobalt bimetallic oxide-modified electrode. *Microchimica Acta*, 191(6), 343.
- Duan, W., del Campo, F. J., Gich, M. & Fernández-Sánchez, C. (2022a). In-field one-step measurement of dissolved chemical oxygen demand with an integrated screen-printed electrochemical sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 369, 132304.
- Duan, W., Gunes, M., Baldi, A., Gich, M. & Fernández-Sánchez, C. (2022b). Compact fluidic electrochemical sensor platform for on-line monitoring of chemical oxygen demand in urban wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 449, 137837.
- Elfeky, E. M. S., Shehata, M. R., Elbashar, Y. H., Barakat, M. H. & El Roubay, W. M. A. (2022). Developing the sensing features of copper electrodes as an environmental friendly detection tool for chemical oxygen demand. *RSC Advances*, 12(7), 4199-4208.
- Fang, Z., Chen, D., Yan, F., Lv, J., Wang, Y. & Guan, X. (2021). A Novel Ni/ZnO/Cu Composite Electrode with High Sensitivity for Detection of Chemical Oxygen Demand. *Surfaces and Interfaces*, 24, 101091.
- Guan, L., Zhou, Y. & Yang, S. (2024). An improved prediction model for COD measurements using UV-Vis spectroscopy. *RSC Advances*, 14(1), 193-205.
- Hao, N., Dai, Z., Xiong, M., Han, X., Zuo, Y., Qian, J. & Wang, K. (2021). Rapid Potentiometric Detection of Chemical Oxygen Demand Using a Portable Self-Powered Sensor Chip. *Analytical Chemistry*, 93(24), 8393-8398.
- Huo, H.-W., Wu, X.-Q., Xie, J.-F., Li, D., Zhao, Q.-B. & Zheng, Y.-M. (2024). Rapid and

- Reliable Electrochemical Measurement of Chemical Oxygen Demand Using SnO₂-Sb-Based Anodes. *ACS ES&T Engineering*, 4(6), 1507-1519.
- Jin, J., Wang, M., Hui, C., Sun, K. & Liu, B. (2024). Electrochemical determination of chemical oxygen demand using glucose standard at nickel(II) hydroxide modified electrode. *International Journal of Electrochemical Science*, 19(2), 100467.
- Kanoun, O., Lazarević-Pašti, T., Pašti, I., Nasraoui, S., Talbi, M., Brahem, A., Adiraju, A., Sheremet, E., Rodriguez, R. D., Ben Ali, M. & Al-Hamry, A. (2021). A Review of Nanocomposite-Modified Electrochemical Sensors for Water Quality Monitoring. *Sensors*, 21(12)
- Lam, S.-M., Wong, S.-M., Sin, J.-C., Zeng, H., Li, H., Huang, L., Lin, H., Mohamed, A. R., Lim, J.-W. & Qin, Z. (2024). Bi-functional NiFe₂O₄/SrTiO₃ S-scheme heterojunction for eminent performance photocatalytic treatment of sewage effluent and electrochemical hydrazine determination. *Environmental Research*, 261, 119718.
- Lambertz, S., Franke, M., Stelter, M. & Braeutigam, P. (2024). Determination of Chemical Oxygen Demand with electrochemical methods: A review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 18, 100615.
- Latifah, D. S., Jeon, S. & Oh, I. (2023). Electrochemical Determination of Chemical Oxygen Demand Based on Boron-Doped Diamond Electrode. *J. Electrochem. Sci. Technol*, 14(3), 215-221.
- Li, J., Luo, G., He, L., Xu, J. & Lyu, J. (2018). Analytical Approaches for Determining Chemical Oxygen Demand in Water Bodies: A Review', *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 48(1), 47-65.
- Li, P., Yan, Y., Sun, Y., Chang, Q., Xie, Y. & Jiang, G. (2024). Highly sensitive electrochemical determination of chemical oxygen demand by carbon-capsulated CuOx derived from Cu foam supported Cu-MOF. *Electroanalysis*, 36(4), e202300361.
- Li, Q., Wu, S., Liu, Q., Chen, S. & Chen, F. (2024). Spectrophotometric determination of COD based on synergistic photocatalysis redox reaction using titanium dioxide nanoparticles and phosphomolybdic heteropoly acid. *Talanta*, 268, 125327.
- Lin, J., Yin, J., Gao, W. & Jin, Q. (2023). Electrochemical Determination of Chemical Oxygen Demand (COD) in Surface Water Using a Microfabricated Boron-Doped Diamond (BDD) Electrode by Chronoamperometry. *Analytical Letters*, 56(14), 2346-2358.
- Martínez-Huitle, C. A. & Ferro, S. (2006). Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chemical Society Reviews*, 35(12), 1324-1340.
- Si, H., Pan, N., Zhang, X., Liao, J., Rumyantseva, M. N., Gaskov, A. M. & Lin, S. (2019). A real-time on-line photoelectrochemical sensor toward chemical oxygen demand determination based on field-effect transistor using an extended gate with 3D TiO₂ nanotube arrays. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 289, 106-113.
- Wang, H.-W., Bringans, C., Hickey, A. J. R., Windsor, J. A., Kilmartin, P. A. & Phillips, A. R. J. (2021). Cyclic Voltammetry in Biological Samples: A Systematic Review of Methods and Techniques Applicable to Clinical Settings. *Signals*, 2(1), 138-158.
- Wang, L., Zhang, Y., Sun, X., Li, Y., Zhai, J. & Dong, S. (2023). A new FTO/TiO₂/PbO₂ electrode for eco-friendly electrochemical determination of chemical oxygen demand. *Nano Research*, 16(8), 11042-11047.
- Wang, X., Wu, D., Yuan, D. & Wu, X. (2022). A nano-lead dioxide-composite electrochemical sensor for the determination of chemical oxygen demand. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107464.
- Wahyudi, F., Saputera, W.H., Sasongko, D., & Devianto, H. (2023). Studi Pengaruh Konsentrasi Katalis ZnO untuk Degradasi Limbah Palm Oil Mill Effluent (POME) Menggunakan Teknologi Fotokatalitik. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknik*, 22(2), 105-113.

- Westbroek, P. (2005). 2 - Electrochemical methods in Westbroek, P., Priniotakis, G. and Kiekens, P., eds., *Analytical Electrochemistry in Textiles*, Woodhead Publishing, 37-69.
- Xie, S., Wu, H. & Yang, X. (2024). Microfluidic Electrochemical Sensor for Online Detection of Chemical Oxygen Demand Based on AuNPs/Au Electrodes. *IEEE Sensors Journal*, 24(23), 38584-38588.
- Yin, J., Zhang, Z., Zhang, X., Mai, Y., Luan, A., Xu, B. & Jin, Q. (2021). A batch microfabrication of a microfluidic electrochemical sensor for rapid chemical oxygen demand measurement. *Analyst*, 146(6), 1956-1964.
- Zhang, L., Dang, X. & Zhao, H. (2024). Homojunction-Incorporated Oxygen Vacancy Functionalized Spherical TiO₂ Nanocrystals for the Electrochemical Detection of Chemical Oxygen Demand. *Inorganic Chemistry*, 63(44), 21345-21353.
- Zhang, Y., Zhang, H., Sun, X., Zhao, P., Zhai, J. & Dong, S. (2025). Self-powered sensor based on a TiO₂ NTAs/FeN₅ SACs photocatalytic fuel cell for sensing chemical oxygen demand. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 426, 137146.