



Dekolorisasi Elektrokimia *Congo Red* menggunakan Elektroda Pb-PbO₂ dan Evaluasi Perubahan COD, Sulfat, Nitrat, dan Pb Terlarut

Chantika Elda Khaliqa¹, Didik Setiyo Widodo*¹, Khabibi Khabibi¹,
Retno Ariadi Lusiana¹

¹Laboratorium Biokimia, Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang, Semarang 50275

*Corresponding author: widodo.ds@live.undip.ac.id

Received: 20 Maret 2026 / Accepted: 18 Mei 2026

Available online: 31 Mei 2026

Abstrak

Congo red merupakan zat warna azo yang bersifat toksik, persisten, dan berpotensi karsinogenik sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan perairan. Pengolahan secara elektrokimia, secara khusus disebut elektrodekolorisasi, menjadi alternatif yang efektif dan ramah lingkungan untuk degradasi dan indikasi mineralisasi parsial senyawa organik. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja elektroda Pb-PbO₂ dalam proses elektrodekolorisasi dan mineralisasi larutan *Congo red* menggunakan elektrolit pendukung NaCl. Penelitian dilakukan melalui karakterisasi elektroda menggunakan SEM-EDX, penentuan panjang gelombang maksimum dan kurva kalibrasi, serta optimasi kondisi operasi meliputi potensial aplikasi, pH, dan waktu elektrolisis. Efisiensi dekolourisasi dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis, sedangkan tingkat mineralisasi dievaluasi melalui perubahan kadar ion sulfat, ion nitrat, *Chemical Oxygen Demand* (COD), kadar logam Pb, serta identifikasi kualitatif CO₂. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi optimum dicapai pada potensial 6 V, pH 7, dan waktu elektrolisis 120 menit dengan efisiensi dekolourisasi sebesar 95,25%. Proses ini disertai peningkatan kadar ion sulfat dari 17,42 menjadi 78,31 ppm dan ion nitrat dari 1,79 menjadi 6,44 ppm, serta penurunan COD sebesar 73,43% dari 86,74 menjadi 23,05 ppm, yang mengindikasikan mineralisasi parsial, diperkuat oleh pembentukan endapan BaCO₃ pada uji lanjutan sebagai indikasi produk CO₂. Selain itu, kadar Pb terlarut menurun sebesar 42,42% dari 0,33 menjadi 0,19 ppm, yang mengindikasikan potensi lain elektrodekolorisasi larutan zat warna dalam menurunkan kandungan logam berat terlarut. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem elektrokimia Pb-PbO₂/NaCl efektif dalam menghilangkan warna dan mendorong mineralisasi *Congo red*, serta berpotensi sebagai teknologi alternatif untuk pengolahan limbah zat warna.

Kata Kunci: *Congo red*, elektrodekolorisasi, mineralisasi, elektroda Pb-PbO₂

1. Pendahuluan

Industri tekstil telah berkembang pesat seiring peningkatan kebutuhan manusia. Perkembangan tersebut berdampak negatif terhadap lingkungan karena menghasilkan limbah cair. Salah satu zat pencemar dalam limbah cair tersebut adalah pewarna sintetis. Pewarna sintetis digunakan secara luas karena bersifat stabil, tetapi karakter ini menjadikan pewarna sintetis sulit didegradasi oleh lingkungan perairan secara alami. Salah satu pewarna sintetis adalah *Congo red*. *Congo red* merupakan zat warna azo sintetis yang mengandung gugus azo (-N=N-), amina aromatik (-NH₂), sulfonat (-SO₃Na), dan cincin aromatik yang membuat struktur zat warna ini bersifat stabil. Selain itu, *Congo red* bersifat anionik dan dapat larut dalam air [1], namun dapat menyebabkan efek toksik terhadap

organisme perairan dan bersifat karsinogen terhadap manusia. Oleh karena itu, metode pengolahan yang efektif, ramah lingkungan, dan ekonomis diperlukan untuk mengolah *Congo red* sebelum dibuang ke lingkungan, yaitu dengan metode elektrolisis atau elektrodekolorisasi [2].

Metode elektrodekolorisasi merupakan metode yang memanfaatkan arus listrik searah untuk menurunkan intensitas warna (dekolourisasi) senyawa organik zat warna melalui reaksi reduksi-oksidasi (redoks) [3]. Selain itu, metode ini berpotensi menyebabkan mineralisasi dengan penguraian senyawa organik kompleks menjadi senyawa anorganik sederhana, seperti gas karbon dioksida (CO₂), air (H₂O), ion nitrat (NO₃⁻), dan ion sulfat (SO₄²⁻) [4]. Keberhasilan metode ini bergantung pada jenis elektroda dan elektrolit

Doi:

pendukung yang digunakan [2]. Pada penelitian ini digunakan elektroda timbal dioksida (PbO_2) sebagai anoda dan elektroda timbal (Pb) sebagai katoda. Hal ini karena PbO_2 termasuk material semikonduktor yang mampu menghantarkan arus listrik dengan baik dan dapat menghasilkan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) [5]. Selain itu, pada penelitian ini digunakan elektrolit pendukung berupa natrium klorida (NaCl) karena dapat terionisasi sempurna menjadi ion Na^+ dan Cl^- sehingga mampu membantu menghantarkan arus listrik serta ion Cl^- tersebut dapat menghasilkan spesies klorin aktif berupa radikal klorin ($\bullet\text{Cl}$) [6].

Elektrodekolorisasi menggunakan elektroda Pb-PbO_2 telah banyak diterapkan untuk mendegradasi berbagai zat warna azo, seperti methyl orange, methyl red, dan Remazol Black B. Meski demikian, kajian yang secara khusus mengevaluasi kinerja elektroda ini terhadap larutan *Congo red* masih terbatas, terutama yang menilai secara simultan tingkat dekolorisasi, penurunan *chemical oxygen demand* (COD), pembentukan ion sulfat dan nitrat, evolusi CO_2 , serta konsentrasi Pb terlarut. Evaluasi ini penting karena warna larutan yang hilang tidak selalu mencerminkan tingkat mineralisasi senyawa organik secara sempurna. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai efektivitas elektroda Pb-PbO_2 dalam mendegradasi *Congo red* sekaligus menilai tingkat mineralisasi dan potensi pelepasan timbal selama proses berlangsung.

2. Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat: Seperangkat alat gelas laboratorium, pipet filler, *electro analyzer* (Instek GPR-3060D), kabel dan penjepit buaya, pH meter (Ohaus), multimeter (DT-9205A), neraca analitik (Ohaus PA22mC), spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu 1280), SEM-EDX (JSM-6510 LA), serta AAS (210 VGP).

Bahan: *Congo red* (Merck, kemurnian 87%), NaCl (Merck), elektroda Pb-PbO_2 (Kayaba GM5Z-3B, luas lempeng $2,8 \text{ cm} \times 7,1 \text{ cm}$), akuades, NaOH 0,1 M (Merck), HCl 0,1 M (Merck), dan kertas saring (Whatman nomor 41).

2.2. Cara Kerja

2.2.1 Penentuan Panjang Gelombang Maksimum dan Pembuatan Kurva Kalibrasi Larutan *Congo red*

Pembuatan kurva kalibrasi dilakukan menggunakan larutan standar *Congo red* dengan konsentrasi 0, 2, 4, 6, 8, dan 10 ppm. Pembuatan kurva kalibrasi dilakukan pada setiap kondisi pH 2, 4, 7 dan 10. Sementara itu, panjang gelombang maksimum ditentukan dengan *pemindaian* larutan *Congo red* 8 ppm pada setiap kondisi pH dengan rentang 200–800 nm menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Panjang gelombang maksimum ditentukan berdasarkan nilai absorbansi tertinggi. Absorbansi setiap larutan

standar kemudian diukur pada panjang gelombang maksimum masing-masing.

2.2.2. Penentuan Potensial Aplikasi

Penentuan potensial aplikasi dilakukan menggunakan larutan kerja *Congo red* 10 ppm. Larutan tersebut ditambahkan elektrolit pendukung NaCl sebanyak 1,17 g dan dimasukkan ke dalam sel elektrolisis dengan elektroda Pb-PbO_2 yang berjarak 1,5 cm dan masing-masing dihubungkan ke *power supply menggunakan kabel dan alligator clip*. Listrik dialirkan ke dalam sel dan arus yang mengalir diukur saat potensial 0–10 V yang dipindai dengan laju 0,2 V/menit. Perlakuan yang sama dilakukan pada blanko yang terdiri atas 100 mL akuades dan 1,17 g NaCl . Data yang diperoleh dialurkan sebagai grafik potensial vs arus. Potensial aplikasi ditentukan beberapa satuan lebih besar dari titik belok pada grafik. Pada proses ini digunakan kaca FTO sebagai katoda dan karbon sebagai anoda untuk mengukur potensial aplikasi pembentukan ZnO dan Sn dalam larutan prekursor yang dilakukan variasi potensial agar dihasilkan arus yang terbaca pada multimeter dan diplotkan ke grafik V vs I sehingga dapat ditentukan potensial tetap dengan lonjakan arus yang tajam.

2.2.3. Penentuan pH dan Waktu Optimum

Penentuan pH optimum larutan dilakukan menggunakan larutan kerja *Congo red* 10 ppm. Larutan tersebut ditambahkan elektrolit pendukung NaCl sebanyak 1,17 g pada kondisi variasi pH 2, 4, 7, dan 10. Larutan kemudian dielektrolisis menggunakan potensial aplikasi yang ditentukan terdahulu selama 240 menit pada setiap kondisi pH. Absorbansi larutan sesudah elektrolisis diukur pada panjang gelombang maksimum setiap kondisi pH. Data yang diperoleh diplotkan dalam bentuk grafik antara pH larutan (sumbu x) dan persentase dekolorisasi (sumbu y). pH larutan yang menghasilkan persentase dekolorisasi tertinggi ditetapkan sebagai pH optimum larutan untuk elektrodekolorisasi.

Penentuan waktu optimum dekolorisasi dilakukan menggunakan larutan kerja *Congo red* 10 ppm. Larutan tersebut ditambahkan elektrolit pendukung NaCl sebanyak 1,17 g serta dielektrolisis menggunakan potensial aplikasi dan pH optimum larutan dengan variasi waktu 60, 120, 180, 240, 300, dan 360 menit. Nilai absorbansi larutan hasil elektrodekolorisasi diukur menggunakan panjang gelombang maksimum pada pH optimum. Data disajikan sebagai hasil representatif dari percobaan yang dioptimasi. Replikasi awal telah dilakukan dan menunjukkan tren yang konsisten dengan deviasi relatif kurang dari 5%, yang mengonfirmasi *reproducibility* proses dekolorisasi. Data yang diperoleh dialurkan dalam bentuk grafik antara

waktu (sumbu x) dan persentase dekolorisasi (sumbu y). Waktu dekolorisasi yang menghasilkan persentase dekolorisasi tertinggi ditetapkan sebagai waktu optimum untuk elektrodekolorisasi.

2.2.4 Analisis parameter.

Analisis Larutan Hasil Elektrodekolorisasi Menggunakan Spektrofotometer UV-Vis.

Elektrodekolorisasi larutan *Congo red* 10 ppm dilakukan dengan mengelektrolisis sampel setelah penambahan elektrolit pendukung NaCl sebanyak 1,17 g, pengaturan pH optimum selama waktu optimum. Larutan setelah dan sebelum elektrodekolorisasi diukur nilai absorbansi menggunakan panjang gelombang maksimum pada pH optimum dan dilanjutkan dengan pemindaian UV-Vis untuk memperoleh pola spektra UV-Vis.

Analisis Kadar Logam Pb

Analisis kadar logam Pb pada 100 mL larutan kerja *Congo red* 10 ppm dilakukan sebelum dan setelah elektrodekolorisasi menggunakan potensial aplikasi, pH optimum larutan, dan waktu optimum. Penentuan kadar logam Pb dilakukan menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Persentase penurunan kadar Pb juga ditentukan untuk mengetahui keberhasilan elektrodekolorisasi dalam menurunkan konsentrasi logam Pb terlarut.

Analisis Kadar Ion Sulfat dan Ion Nitrat

Analisis kadar ion sulfat (SO_4^{2-}) dan ion nitrat (NO_3^-) pada 100 mL larutan kerja *Congo red* 10 ppm dilakukan sebelum dan setelah elektrodekolorisasi menggunakan potensial aplikasi, pH optimum larutan, dan waktu optimum. Penentuan kadar ion sulfat dilakukan dengan metode turbidimetri, sedangkan penentuan kadar ion nitrat dilakukan dengan metode spektrofotometri UV-Vis.

Analisis Kadar Chemical Oxygen Demand (COD)

Analisis kadar COD pada 100 mL larutan kerja *Congo red* 10 ppm dilakukan sebelum dan setelah elektrodekolorisasi menggunakan potensial aplikasi, pH optimum larutan, dan waktu optimum. Penentuan kadar COD dilakukan dengan metode refluks tertutup dengan analisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Persentase penurunan kadar COD juga ditentukan untuk mengetahui keberhasilan elektrodekolorisasi dalam degradasi *Congo red*.

Analisis Gas CO_2 Menggunakan Larutan $\text{Ba}(\text{OH})_2$

Analisis keberadaan gas CO_2 dilakukan secara kualitatif dengan mengalirkan gas CO_2 hasil elektrodekolorisasi ke dalam gelas beker yang berisi larutan $\text{Ba}(\text{OH})_2$ berlebih. Sistem dibuat tertutup rapat agar gas CO_2 tidak terlepas ke udara. Hasil dinyatakan positif apabila terbentuk endapan putih BaCO_3 . Uji lanjutan juga dilakukan dengan meneteskan larutan HCl untuk memastikan bahwa

endapan putih merupakan BaCO_3 . Hasil dinyatakan positif apabila endapan larut.

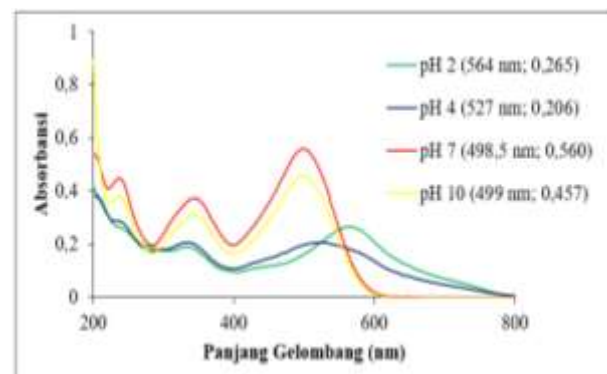
2.2.5 Karakterisasi SEM-EDX Pb-PbO₂

Karakterisasi elektroda menggunakan SEM-EDX bertujuan untuk mengetahui morfologi permukaan serta mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung pada lempeng elektroda Pb dan PbO_2 secara kualitatif dan kuantitatif. Karakterisasi tersebut dilakukan sebelum dan setelah elektrolisis untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada permukaan elektroda.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Panjang Gelombang Maksimum Larutan *Congo Red*

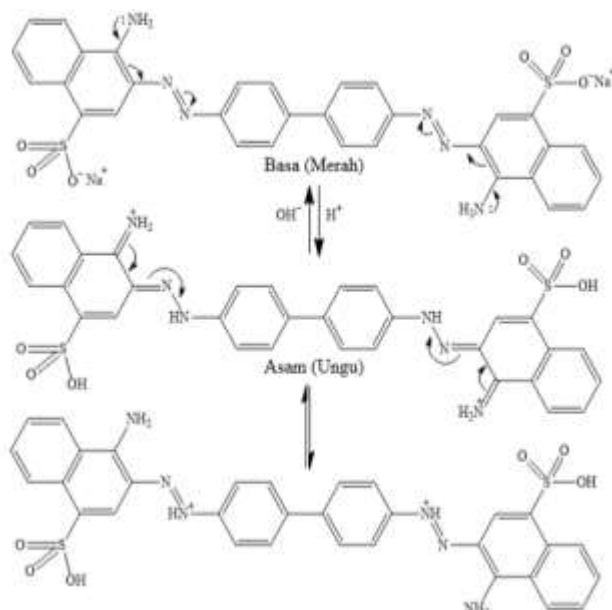
Penelitian ini dilakukan pada variasi pH 2, 4, 7, dan 10. Secara visual larutan *Congo red* pada pH 2 dan pH 4 berwarna ungu dan pada pH 7 dan pH 10 berwarna merah. Perubahan warna ini terkait dengan perubahan distribusi elektron pada pH berbeda. Pada kondisi asam, konsentrasi ion H^+ yang tinggi menyebabkan gugus azo terprotonasi. Perubahan distribusi elektron π pada cincin aromatik yang menyebabkan struktur zat warna berstruktur kationik. Sementara itu, pada kondisi netral dan basa, ion H^+ rendah sehingga molekul *Congo red* berada dalam struktur anionik sesuai dengan Gambar 1 [7].



Gambar 2 Spektra UV-Vis larutan *Congo red* 8 ppm pada pH 2, 4, 7, dan 10.

Pengaruh kondisi pH terhadap struktur molekul zat warna *Congo red* juga dapat dilihat berdasarkan pergeseran spektra pada variasi pH. Pada kondisi asam, panjang gelombang maksimum berada pada angka yang lebih panjang (*bathochromic shift*). Pada kondisi ini, protonasi mengakibatkan delokalisasi elektron π meningkat, struktur *Congo red* menjadi lebih stabil sehingga energi transisi lebih rendah dan panjang gelombang serapan lebih besar. Spektra UV-Vis larutan *Congo red* pada kondisi pH 2, 4, 7, dan 10 dapat dilihat pada Gambar 2.

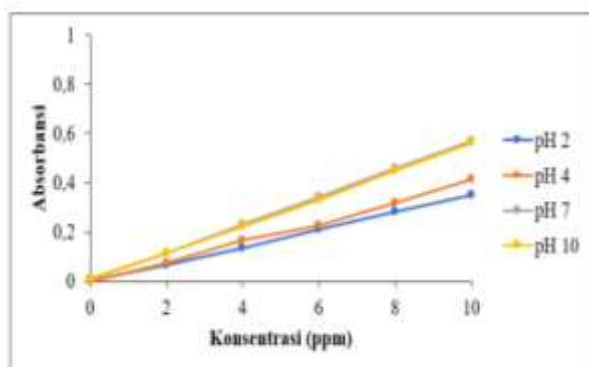
Doi:



Gambar 1 Struktur *Congo red* pada kondisi asam dan basa

3.2. Kurva Kalibrasi Larutan *Congo red*

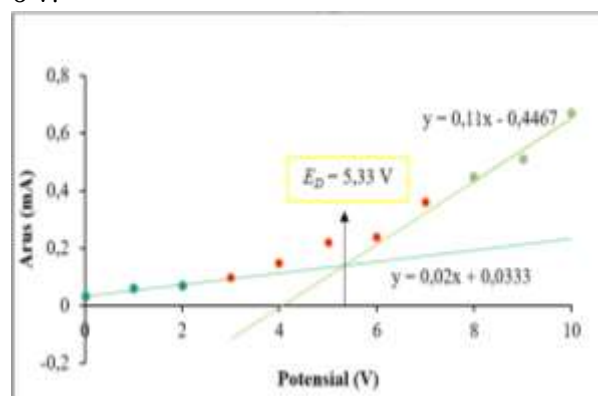
Berdasarkan Gambar 3, pada pH 2 memiliki persamaan garis $y = 0,0354x - 0,0023$ dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9993$; pH 4 memiliki persamaan garis $y = 0,0408x - 0,0039$ dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9969$; pH 7 memiliki persamaan garis $y = 0,0564x + 0,0052$ dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9998$; pH 10 memiliki persamaan garis $y = 0,0555x + 0,0029$ dengan koefisien korelasi $R^2 = 0,9996$. Koefisien korelasi untuk setiap kondisi pH mendekati angka 1, yang menunjukkan bahwa hubungan antara konsentrasi larutan *Congo red* dan absorbansi adalah linier sepanjang konsentrasi larutan standar. Selain itu, data tersebut dapat digunakan untuk penentuan konsentrasi larutan *Congo red* hasil elektrokolorisasi dengan menggunakan teknik intrapolasi.



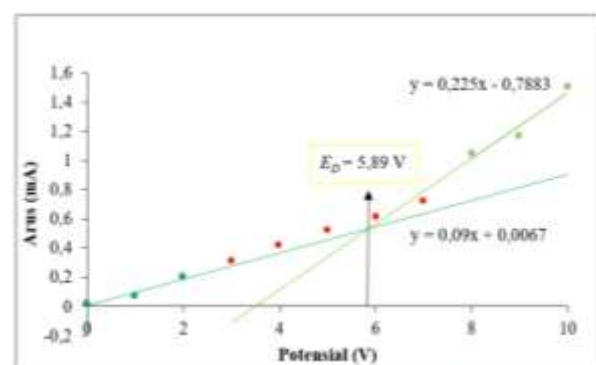
Gambar 3 Kurva kalibrasi larutan *Congo red* pada pH 2, 4, 7, dan 10

3.3. Potensial aplikasi

Potensial aplikasi ditetapkan berdasarkan potensial dekomposisi. Potensial dekomposisi merupakan potensial minimum yang secara nyata harus diberikan pada sistem elektrolisis agar reaksi reduksi-oksidasi dapat berlangsung. Kurva hubungan antara potensial dan arus berfungsi untuk mengetahui titik belok yang merupakan potensial dekomposisi (ED). Berdasarkan Gambar 4, titik belok grafik blanko berada pada nilai 5,33 V. Sementara itu, berdasarkan Gambar 5, titik belok larutan Congo red berada pada nilai 5,89 V sehingga potensial aplikasi ditetapkan di atas kedua harga potensial dekomposisi, dalam hal ini 6 V.



Gambar 4 Kurva hubungan antara potensial dan arus pada elektrolisis 100 mL akuades



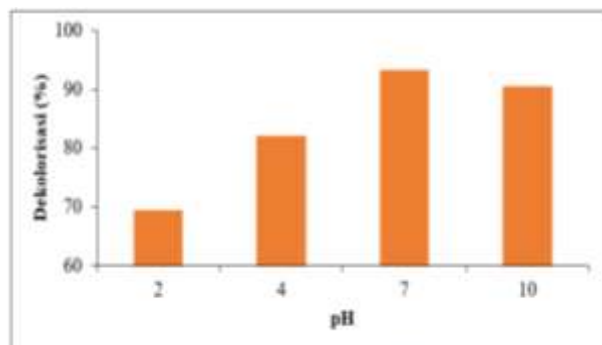
Gambar 5 Kurva hubungan antara potensial dan arus pada elektrolisis 100 mL larutan *Congo red* 10 ppm

3.4. Penentuan pH dan Waktu kontak optimum

Berdasarkan Gambar 6, larutan *Congo red* pada pH 7 menghasilkan persentase dekolorisasi tertinggi, yaitu 93,3%. Hal ini karena pada kondisi netral elektrolit NaCl menghasilkan spesies klorin aktif yang didominasi oleh asam hipoklorit (HOCl) ($E^0_{\text{HOCl}/\text{Cl}^-} = +1,49$ V) [8] yang memiliki kemampuan oksidasi lebih tinggi dibandingkan ion hipoklorit (ClO^-) ($E^0_{\text{ClO}^-/\text{Cl}^-} = +0,89$ V) [9] yang berada dalam keadaan basa. Selain itu, pada kondisi netral, stabilitas struktur *Congo red* relatif rendah sehingga lebih mudah dioksidasi, terkait dengan ketiadaan protonasi yang kurang menyetabilkan

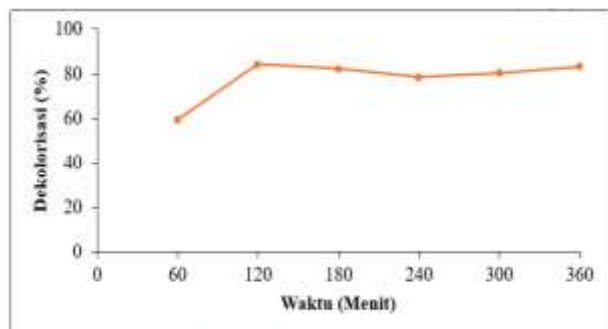
Doi:

sistem ikatan azo [10]. Protonasi zat warna bersifat *pH-dependent* dan banyak sistem menunjukkan penurunan protonasi pada rentang pH netral yang memodulasi interaksi dengan oksidator [11].



Gambar 6 Grafik hubungan antara pH dan persentase dekolorisasi pada elektrolisis 100 mL larutan *Congo red* 10 ppm

Berdasarkan Gambar 7, larutan *Congo red* pada menit ke-120 menghasilkan persentase dekolorisasi tertinggi, yaitu 84,26%. Data ini mewakili tren representatif (*representative optimized run*) dari kondisi eksperimen yang dikontrol secara ketat, pengulangan, dan *plotting* dalam grafik. Variasi hasil diperkirakan berada dalam rentang yang dapat diterima untuk studi ini. Berdasarkan data, waktu 120 menit menghasilkan jumlah $\bullet\text{OH}$ yang cukup untuk mendegradasi *Congo red* dan konsentrasi *Congo red* masih memadai untuk bereaksi dengan oksidator $\bullet\text{OH}$. Pada operasi dengan waktu lebih lama, konsentrasi *Congo red* semakin berkurang sehingga jumlah molekul yang dapat dioksidasi menjadi lebih sedikit.

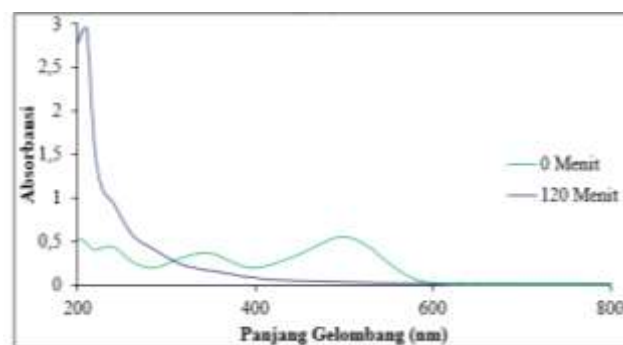


Gambar 7 Kurva hubungan antara waktu dan persentase dekolorisasi pada elektrolisis 100 mL larutan *Congo red* 10 ppm

3.5. Aplikasi Dekolorisasi

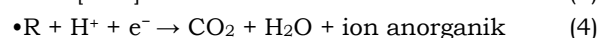
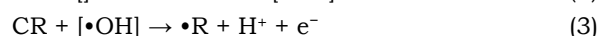
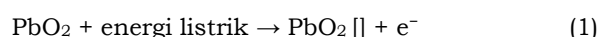
Larutan *Congo red* hasil elektrokolorisasi menggunakan potensial aplikasi 6 V dan pH 7 selama 120 menit memiliki konsentrasi larutan sebesar 0,475 ppm dengan persentase dekolorisasi sebesar 95,25%. Berdasarkan Gambar 8, pada larutan *Congo red* sebelum elektrokolorisasi terdapat puncak serapan pada panjang gelombang 498,5 nm yang menunjukkan keberadaan gugus azo yang berperan sebagai kromofor pemberi warna pada larutan *Congo red*. Pada larutan *Congo red* setelah elektrokolorisasi selama 120 menit tidak memiliki puncak serapan yang signifikan pada

daerah 498,5 nm, namun memiliki puncak pada 211 nm yang menandakan terdapat spesies teroksidasi. Hal ini menunjukkan bahwa *Congo red* telah mengalami degradasi menjadi senyawa turunan dengan rantai karbon yang pendek.

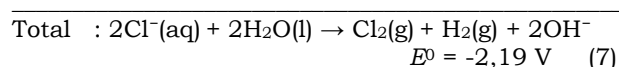
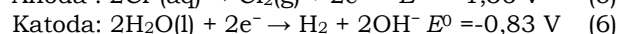
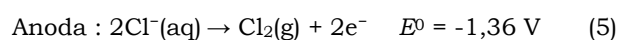


Gambar 8 Spektra UV-Vis larutan *Congo red* sebelum dan setelah elektrokolorisasi selama 120 menit

Spesies aktif yang berperan dalam mempercepat reaksi elektrokolorisasi larutan *Congo red* dengan menyerang gugus azo berupa radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) ($E^{\circ}_{\text{OH}/\text{H}_2\text{O}} = +2,8 \text{ V}$) [12]. Radikal hidroksil terbentuk akibat elektrolisis air pada permukaan PbO_2 yang diawali dengan aktivasi permukaan elektroda akibat pemberian energi listrik. Pada tahap ini, PbO_2 akan membentuk situs aktif yang disertai pelepasan elektron. Situs aktif tersebut kemudian berinteraksi dengan air yang kemudian teroksidasi membentuk $\bullet\text{OH}$. Radikal tersebut akan menyerang molekul *Congo red* sehingga menghasilkan radikal organik yang akan mengalami oksidasi lanjutan hingga terurai menjadi CO_2 , H_2O , dan ion anorganik. Hal ini sesuai dengan deskripsi (persamaan 1–4) dengan R yang menggambarkan substrat organik dan simbol [] yang menggambarkan titik permukaan elektroda [13].



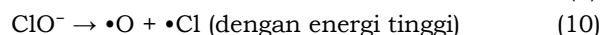
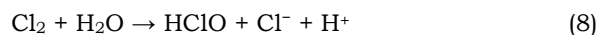
Selain itu, terdapat radikal lain berupa radikal klorin ($\bullet\text{Cl}$) ($E^{\circ}_{\text{Cl}/\text{Cl}^-} = +2,4 \text{ V}$) [14] yang terbentuk akibat gas klorin (Cl_2) mengalami reaksi hidrolisis dan mengalami proses transfer satu elektron. Gas Cl_2 dihasilkan akibat reaksi oksidasi ion Cl^- yang terdapat dalam elektrolit NaCl pada permukaan anoda sesuai persamaan (5–6) [15].



Berdasarkan persamaan (8–10) gas Cl_2 akan mengalami reaksi hidrolisis yang menghasilkan asam hipoklorit (HClO). Asam hipoklorit kemudian mengalami disosiasi asam-basa dan membentuk

Doi:

ion hipoklorit (ClO^-). Pada kondisi potensial atau energi tinggi, ion hipoklorit menghasilkan radikal klorin ($\bullet\text{Cl}$) [16]. Berdasarkan persamaan (11–12) gas Cl_2 juga dapat mengalami proses transfer satu elektron di dekat permukaan elektroda PbO_2 dan membentuk radikal antara $\bullet\text{Cl}_2^-$ yang kemudian terdisosiasi menjadi radikal klorin ($\bullet\text{Cl}$) [19].

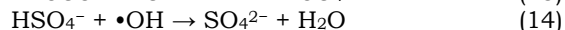
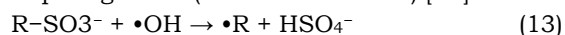


Analisis Kadar Logam Pb

Metode yang digunakan dalam analisis tersebut berupa spektrofotometri serapan atom atau AAS sesuai SNI 6989.8:2009 menggunakan gas asetilen (*high purity*) dengan tekanan minimum 100 psi, panjang gelombang 283,3 nm, batas deteksi (LOD) sebesar $< 0,01$ mg/L, larutan air bebas mineral, larutan asam nitrat pekat (pro-analisis), larutan pengencer asam nitrat 0,05 M, larutan pencuci asam nitrat 5% (v/v), dan larutan kalsium. Sebelum elektrokolorisasi, kadar Pb sebesar 0,33 ppm, kemudian menurun menjadi 0,19 ppm dengan persentase penurunan sebesar 42,42%. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrokolorisasi sekaligus mengatasi tingkat cemaran logam Pb terlarut. Pada potensial katodik, ion Pb^{2+} terdepositasi pada permukaan elektroda Pb sehingga ion Pb^{2+} tersisih dari fase larutan.

Analisis Kadar Ion Sulfat

Metode yang digunakan dalam analisis tersebut berupa turbidimetri dengan spektrofotometri UV-Vis sesuai SNI 6989.20:2019 menggunakan panjang gelombang 420 nm, air bebas mineral, larutan baku sulfat, buffer A, buffer B, dan padatan barium klorida. Sebelum elektrokolorisasi, kadar ion sulfat sebesar 17,42 ppm, yang kemudian meningkat setelah elektrokolorisasi menjadi 78,31 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa proses mineralisasi telah berlangsung. Mineralisasi terjadi ketika radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) menyerang ikatan C-S sehingga terbentuk radikal organik, ion HSO_4^- , dan ion H^+ . Radikal $\bullet\text{OH}$ kemudian mengoksidasi ion HSO_4^- menjadi H_2O dan ion SO_4^{2-} yang merupakan bentuk sulfur dengan bilangan oksidasi sulfur paling stabil (Persamaan 13–14) [20].

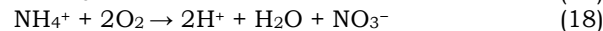
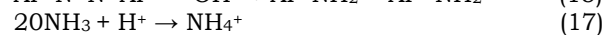
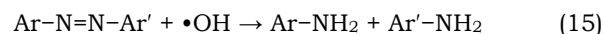


Data di atas tampak tidak sebanding dengan kandungan sulfur dalam zat warna. Nilai tersebut tidak mencerminkan mineralisasi sulfur murni dari zat warna, melainkan merupakan akumulasi interferensi produk samping elektroda. Elektroda Pb yang diduga mengalami pelindian, akan larut

sebagai Pb^{2+} yang bereaksi dengan reagen penentuan ion sulfat yang terakumulasi sebagai konsentrasi sulfat yang besar. Dugaan ini sejalan dengan data analisis Pb menggunakan AAS.

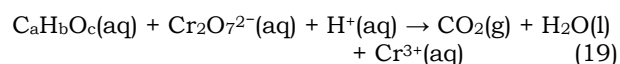
Analisis Kadar Ion Nitrat

Metode yang digunakan dalam analisis tersebut berupa spektrofotometri ultraviolet sesuai APHA 4500 NO_3^- -2023 menggunakan panjang gelombang 220 nm, air bebas nitrat, larutan asam klorida, dan larutan standar nitrat. Sebelum elektrokolorisasi, kadar ion nitrat sebesar 1,79 ppm, yang kemudian meningkat setelah elektrokolorisasi menjadi 6,44 ppm. Hal ini menunjukkan bahwa proses mineralisasi terjadi. Mineralisasi terjadi ketika radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) menyerang gugus azo sehingga terbentuk dua fragmen aromatik yang mengandung gugus amina. Gugus amina tersebut mengalami oksidasi oleh $\bullet\text{OH}$ menjadi senyawa aromatik radikal dan amonia, kemudian amonia akan terprotonasi oleh H^+ yang berasal dari pemecahan molekul air sehingga menghasilkan ion amonium. Ion amonium akan teroksidasi lebih lanjut oleh oksigen, menghasilkan ion NO_3^- yang merupakan bentuk nitrogen dengan bilangan oksidasi paling stabil (Persamaan 15–18) [20].



Analisis Kadar Chemical Oxygen Demand (COD)

Metode yang digunakan dalam analisis tersebut berupa refluks tertutup dengan spektrofotometri UV-Vis sesuai SNI 6989.2:2019 menggunakan air bebas organik, larutan pereaksi asam sulfat, larutan asam sulfamat, dan larutan baku kalium hidrogen ftalat. Sebelum elektrokolorisasi, kadar COD sebesar 86,74 ppm yang kemudian menurun setelah elektrokolorisasi menjadi 23,05 ppm dengan persentase penurunan sebesar 73,43%. Hal ini menunjukkan bahwa proses mineralisasi parsial. Mineralisasi terjadi ketika pemecahan molekul organik kompleks ($\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c$) melalui reaksi oksidasi oleh ion dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) menggunakan katalisator asam sulfat sehingga menghasilkan molekul sederhana berupa gas CO_2 dan air (Persamaan 19) [17]. Selain itu, ion Cr^{3+} hasil reduksi ion dikromat juga terbentuk dan kemudian ditentukan nilai absorbansi pada panjang gelombang 600 nm dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis.



Doi:

Analisis CO₂ menggunakan larutan Ba(OH)₂

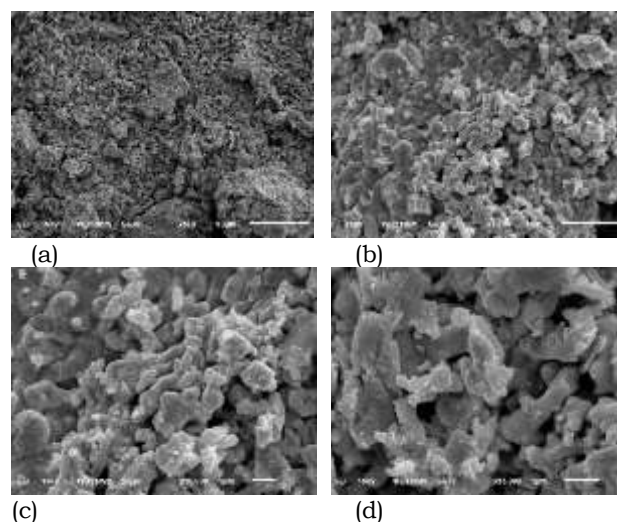
Hasil pengujian menunjukkan bahwa terdapat endapan putih BaCO₃ yang menandakan produk gas CO₂ pada proses elektrokolorisasi sesuai dengan persamaan (20–21) [20]. Pembentukan endapan putih BaCO₃ terjadi karena reaksi antara gas CO₂ dan larutan Ba(OH)₂ dalam suasana basa, yang menghasilkan senyawa BaCO₃ yang tidak larut dalam air. Ketika endapan putih BaCO₃ direaksikan dengan larutan HCl dalam suasana asam, akan terbentuk BaCl₂ yang larut dalam air disertai pelepasan gas CO₂.

**3.7. Karakterisasi Elektroda Pb-PbO₂ Menggunakan SEM-EDX****Elektroda Pb Sebelum Elektrokolorisasi.**

Elektroda Pb sebelum elektrokolorisasi memiliki hasil karakterisasi SEM-EDX dengan tegangan percepatan 15 kV, jarak kerja 11 mm, dan spot size 30 sebagai berikut. Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 9, semakin tinggi perbesaran maka morfologi permukaan elektroda Pb sebelum elektrokolorisasi terlihat semakin jelas.

Pada Gambar (a), permukaan dengan skala ukuran 50 μm menunjukkan struktur yang kasar dan tidak rata karena terdapat partikel besar dengan pori-pori yang belum terlihat secara jelas. Pada Gambar (b), permukaan dengan skala ukuran 5 μm menunjukkan terdapat partikel berukuran kecil dengan distribusi yang tidak homogen karena sebagian area lebih padat dan sebagian area lain lebih berpori. Pada Gambar (c), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan partikel yang semakin jelas dan terdapat celah di antara partikel. Pada Gambar (d), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan struktur berlapis.

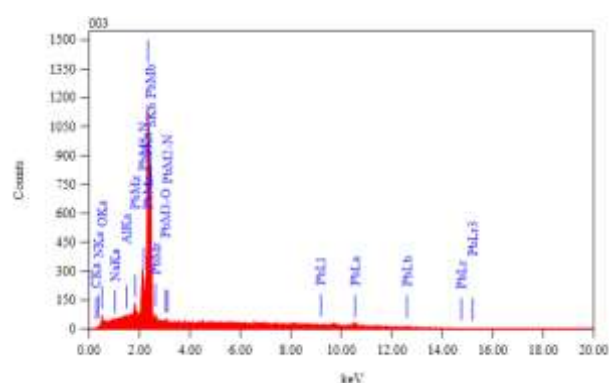
Sementara itu, berdasarkan hasil EDX pada Gambar 10 yang diinterpretasikan pada Tabel 1, elektroda Pb sebelum digunakan sebagai katoda menunjukkan bahwa unsur Pb merupakan unsur dominan dengan persentase komposisi sebesar 98,37%. Selain timbal, unsur lain dengan persentase komposisi yang lebih rendah juga terdeteksi, seperti karbon sebesar 0,21%, oksigen sebesar 1,36%, natrium sebesar 0,01%, dan aluminium sebesar 0,04%. Persentase komposisi unsur lain tersebut tidak memengaruhi fungsi elektroda Pb sebagai katoda. Oleh karena itu, elektroda Pb dapat digunakan dalam proses elektrokolorisasi.



Gambar 9 Morfologi permukaan elektroda Pb sebelum elektrolisis dengan (a) Perbesaran 500×, (b) Perbesaran 5000×, (c) Perbesaran 10000×, dan (d) Perbesaran 15000×

Tabel 1. Persentase komposisi pada elektroda Pb sebelum elektrolisis secara kuantitatif

Nomor Atom	Simbol	Nama Unsur	Kadar (%)
6	C	Karbon	0,21
7	N	Nitrogen	tidak terdeteksi
8	O	Oksigen	1,36
11	Na	Natrium	0,01
13	Al	Aluminium	0,04
16	S	Sulfur	tidak terdeteksi
82	Pb	Timbal	98,37
Total			100



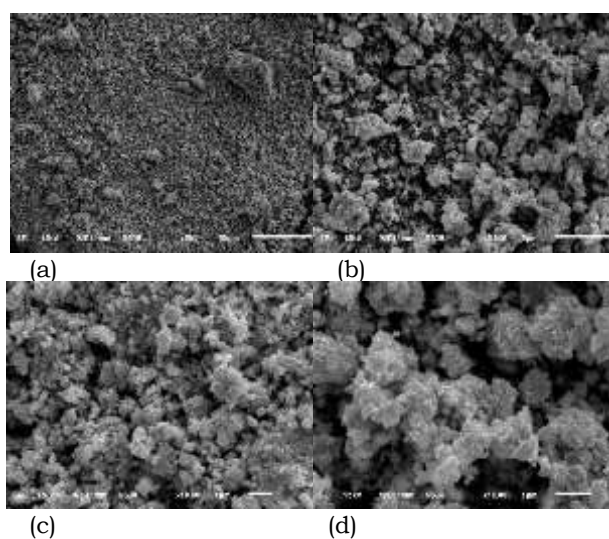
Gambar 10 Spektrum EDX pada elektroda Pb sebelum elektrolisis secara kualitatif

Elektroda PbO₂ Sebelum Elektrokolorisasi.

Elektroda PbO₂ sebelum elektrokolorisasi memiliki hasil karakterisasi SEM-EDX dengan tegangan percepatan 15 kV, jarak kerja 11 mm, dan spot size 30 sebagaimana disajikan pada Gambar 11. Berdasarkan citra SEM pada Gambar 11, semakin tinggi perbesaran, morfologi permukaan elektroda PbO₂ sebelum elektrokolorisasi terlihat semakin jelas. Pada

Doi:

Gambar (a), permukaan dengan skala ukuran 50 μm menunjukkan struktur yang kasar, tidak homogen, dan terdiri atas beberapa partikel besar dengan distribusi yang tidak merata. Pada Gambar (b), permukaan dengan skala ukuran 5 μm menunjukkan partikel yang menyebar rata dan struktur partikel seperti butiran kecil yang saling menempel membentuk lapisan padat. Pada Gambar (c), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan partikel yang semakin jelas dengan ukuran partikel yang seragam dan struktur yang lebih rapat. Pada Gambar (d), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan struktur yang lebih halus dan padat, serta partikel berbentuk granular yang tersusun rapat.



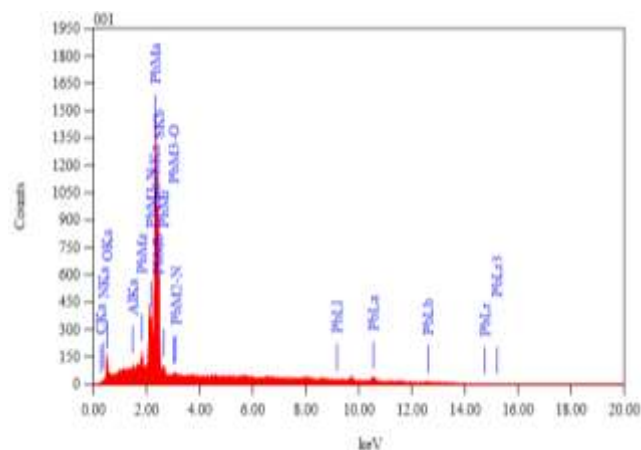
Gambar 11: Morfologi permukaan elektroda PbO_2 sebelum elektrolisis dengan (a) Perbesaran 500 \times , (b) Perbesaran 5000 \times , (c) Perbesaran 10000 \times , dan (d) Perbesaran 15000 \times

Tabel 2. Persentase komposisi pada elektroda PbO_2 sebelum elektrolisis secara kuantitatif

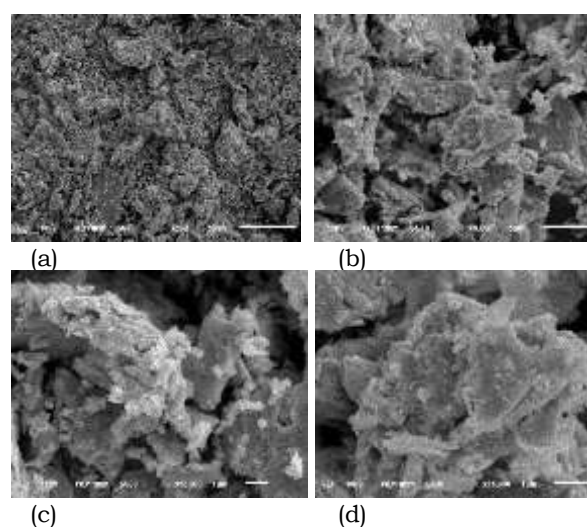
Nomor Atom	Simbol	Nama Unsur	Persentase (%)
6	C	Karbon	0,32
7	N	Nitrogen	0,42
8	O	Oksigen	2,99
13	Al	Aluminium	0,05
16	S	Sulfur	tidak terdeteksi
82	Pb	Timbal	96,23
Total			100

Elektroda Pb Setelah Elektrokolorisasi.

Elektroda Pb setelah elektrokolorisasi memiliki hasil karakterisasi SEM-EDX dengan tegangan percepatan 15 kV, jarak kerja 11 mm, dan spot size 30. Hasil SEM-EDX yang diperoleh terlihat pada Gambar 13.



Gambar 12 Spektrum EDX pada elektroda PbO_2 sebelum elektrolisis secara kualitatif



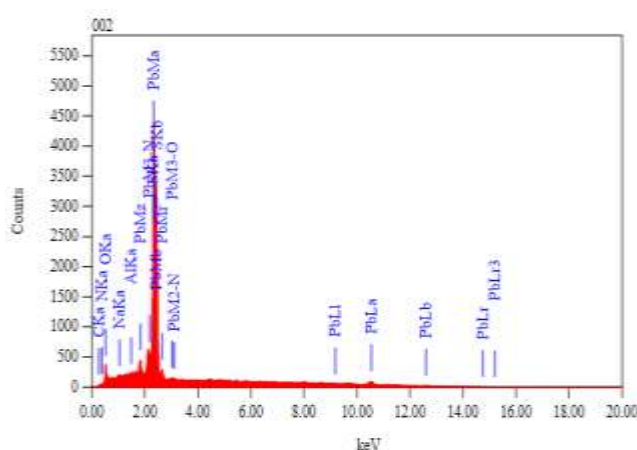
Gambar 13: Morfologi permukaan elektroda Pb setelah elektrolisis dengan (a) Perbesaran 500 \times , (b) Perbesaran 5000 \times , (c) Perbesaran 10000 \times , dan (d) Perbesaran 15000 \times

Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 13, semakin tinggi perbesaran maka morfologi permukaan elektroda Pb setelah elektrokolorisasi terlihat semakin jelas. Pada Gambar (a), permukaan dengan skala ukuran 50 μm menunjukkan struktur padat yang terbentuk secara merata di seluruh area dan terdapat gumpalan partikel. Pada Gambar (b), permukaan dengan skala ukuran 5 μm menunjukkan struktur berpori dan terdapat partikel dengan bentuk menyerupai agregat yang saling menumpuk. Pada Gambar (c), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan struktur yang kasar dan terdapat partikel yang membentuk lapisan padat yang saling terhubung. Pada Gambar (d), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan agregat partikel berbentuk lempengan yang tidak beraturan dengan ukuran yang besar dan permukaan kasar.

Doi:

Tabel 3. Persentase komposisi pada elektroda Pb setelah elektrolisis secara kuantitatif

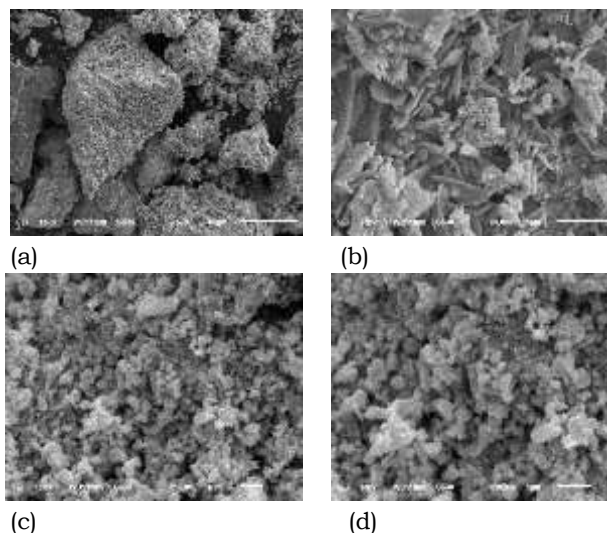
Nomor Atom	Simbol	Nama Unsur	Kadar (%)
6	C	Karbon	0,17
7	N	Nitrogen	0,35
8	O	Oksigen	2,43
11	Na	Natrium	0,07
13	Al	Alumunium	tidak terdeteksi
16	S	Sulfur	0,09
82	Pb	Timbal	96,89
Total			100

**Gambar 14:** Spektrum EDX pada elektroda Pb setelah elektrolisis secara kualitatif

Sementara itu, berdasarkan hasil EDX pada Gambar 14 yang diinterpretasikan pada Tabel 3, elektroda Pb setelah digunakan sebagai katoda menunjukkan bahwa unsur Pb merupakan unsur dominan dengan persentase komposisi sebesar 96,89%. Hal ini menunjukkan sedikit penurunan persentase komposisi unsur Pb jika dibandingkan dengan kondisi sebelum elektrokolorisasi yang disebabkan oleh deposisi unsur Pb dari larutan pada permukaan katoda setelah elektrokolorisasi. Sedangkan, unsur lain seperti oksigen mengalami peningkatan menjadi 2,43% yang kemungkinan akibat pembentukan senyawa oksida pada permukaan elektroda. Hal ini tidak menghasilkan suatu reaksi karena memiliki persentase komposisi yang kecil pada elektroda Pb.

Elektroda PbO₂ Setelah Elektrokolorisasi.

Elektroda PbO₂ setelah elektrokolorisasi memiliki hasil karakterisasi SEM-EDX dengan tegangan percepatan 15 kV, jarak kerja 11 mm, dan spot size 30 sebagai berikut.

**Gambar 15:** Morfologi permukaan elektroda PbO₂ setelah elektrolisis dengan (a) Perbesaran 500×, (b) Perbesaran 5000×, (c) Perbesaran 10000×, dan (d) Perbesaran 15000×

Berdasarkan hasil SEM pada Gambar 15, semakin tinggi perbesaran maka morfologi permukaan elektroda PbO₂ setelah elektrokolorisasi terlihat semakin jelas. Pada Gambar (a), permukaan dengan skala ukuran 50 μm menunjukkan struktur yang tertutupi oleh lapisan tidak rata dan menggumpal dengan ukuran partikel yang besar. Pada Gambar (b), permukaan dengan skala ukuran 5 μm menunjukkan partikel yang lebih jelas dan membentuk agregat seperti jarum atau lempengan. Pada Gambar (c), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan partikel berukuran kecil yang saling menempel rapat dan membentuk lapisan padat. Pada Gambar (d), permukaan dengan skala ukuran 1 μm menunjukkan struktur yang lebih halus dan seragam dengan partikel berukuran kecil yang saling terikat kuat.

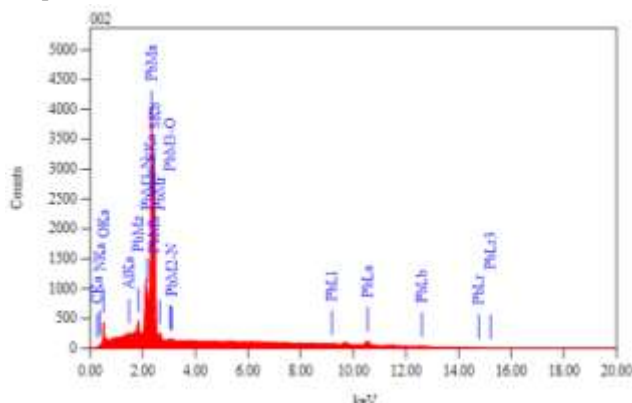
Tabel 4. Persentase komposisi pada elektroda PbO₂ setelah elektrolisis secara kuantitatif

Nomor Atom	Simbol	Nama Unsur	Kadar (%)
6	C	Karbon	0,15
7	N	Nitrogen	0,92
8	O	Oksigen	2,98
13	Al	Alumunium	0,07
16	S	Sulfur	tidak terdetek
82	Pb	Timbal	95,88
Total			100

Sementara itu, berdasarkan hasil EDX pada Gambar 16 yang diinterpretasikan pada Tabel 4, elektroda PbO₂ setelah digunakan sebagai anoda menunjukkan bahwa unsur Pb merupakan unsur dominan dengan persentase komposisi sebesar 95,88%. Hal ini menunjukkan sedikit penurunan persentase komposisi unsur Pb jika dibandingkan dengan kondisi sebelum elektrokolorisasi,

Doi:

namun demikian persentase tersebut tetap lebih rendah dibandingkan komposisi Pb pada katoda setelah elektrokolorisasi karena tidak terjadi deposisi unsur Pb dari larutan



Gambar 16: Spektrum EDX pada elektroda PbO₂ setelah elektrolisis secara kualitatif

Pembandingan Hasil.

Efisiensi dekolorisasi *Congo red* ini mencapai 95,25%, menunjukkan performa yang sangat kompetitif pemakaian elektroda Pb-PbO₂ yang dikembangkan dalam penelitian ini. Hasil ini sejalan dengan karakteristik anoda 'non-aktif' berbasis PbO₂ yang telah dilaporkan [2, 6, 8] bahwa elektroda jenis ini memiliki *overpotential* evolusi oksigen yang tinggi, sehingga memicu pembentukan radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$) yang mampu memutus ikatan azo dan seluruh sistem ikatan zat warna. Banyak studi terdahulu [2, 6] menunjukkan bahwa kinerja optimal PbO₂ dicapai pada kondisi asam. Penelitian ini memperoleh temuan data optimum pada pH netral memberikan keunggulan teknis dalam meminimalkan kebutuhan penyesuaian pH pasca-pengolahan tanpa mengurangi efisiensi degradasi secara signifikan.

Indikasi mineralisasi parsial yang diamati konsisten dengan mekanisme oksidasi elektrokimia pada anoda *inert*, bahwa molekul organik kompleks dipecah menjadi intermediet rantai pendek. Poin lain adalah manajemen risiko pelindian (*leaching*) timbal. Pada umumnya, penggunaan elektroda berbasis Pb berpotensi menyebabkan pelepasan logam berat ke lingkungan. Dalam sistem ini, ion Pb yang ada atau terlarut selama proses oksidasi ditemukan terendapkan kembali secara katodik pada katoda. Fenomena redeposisi ini bertindak sebagai mekanisme pembersihan mandiri (*self-cleaning*) yang memastikan efluen tetap aman dari kontaminasi Pb berlebih. Dengan demikian, konfigurasi aplikasi potensial 6 V dalam reaktor 100 mL ini tidak hanya menawarkan efisiensi dekolorisasi yang tinggi, tetapi juga memberikan solusi mitigasi dampak lingkungan yang lebih efektif dibandingkan sistem elektro-oksidasi timbal konvensional lain.

4. Kesimpulan

Larutan *Congo red* berhasil didekolorisasi dan dimineralisasi parsial menggunakan elektroda Pb-PbO₂ dan elektrolit pendukung NaCl. Keberhasilan ini dibuktikan dengan tingkat dekolorisasi sebesar 95,25% pada 100 mL larutan *Congo red* 10 ppm menggunakan potensial aplikasi 6 V dan pH 7 selama 120 menit yang ditunjukkan oleh penurunan intensitas puncak serapan pada spektra UV-Vis. Proses mineralisasi juga ditunjukkan oleh peningkatan konsentrasi ion sulfat dari 17,42 ppm menjadi 78,31 ppm dan ion nitrat dari 1,79 ppm menjadi 6,44 ppm, penurunan COD sebesar 73,43% dari 86,74 ppm menjadi 23,05 ppm, serta pembentukan endapan putih BaCO₃.

Ucapan Terimakasih

Penulis secara tulus menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Kimia analitik UNDIP yang menyediakan fasilitas untuk menyelesaikan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Siddiqui, S. I., Allehyani, E. S., Al-Harbi, S. A., Hasan, Z., Abomuti, M. A., Rajor, H. K., dan Oh, S., 2023, Investigation of *Congo red* Toxicity Towards Different Living Organisms: A Review, *Processes*, 11, 3, 807. <https://doi.org/10.3390/pr11030807>
- [2] Triavia, I., Widodo, D. S., dan Haris, A., 2016, Elektrokolorisasi Limbah Cair Zat Warna Batik di Kota Solo dengan Elektroda PbO₂/Cu, *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 19, 1, 11-14. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ksa/article/view/18737/13102>
- [3] P. Patmawati, D. S. Widodo, L. Suyati, K. Khabibi, and A. Haris, "Modifikasi Metode Fenton pada Dekolorisasi Limbah Pewarna Remazol Black B dengan Oksida Timbal Hasil Sintesis pada Variasi Molar Pb²⁺ dan NaOH," *Greensphere: Journal of Environmental Chemistry*, vol. 2, no. 2, pp. 23-29, Jan. 2023. <https://doi.org/10.14710/gjec.2022.16776>
- [4] Grzyb, A., Wolna-Maruwka, A., dan Niewiadomska, A., 2020, Environmental Factors Affecting the Mineralization of Crop Residues, *Agronomy*, 10, 12, 1951. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>
- [5] Sirés, I., Low, C. T. J., Ponce-de-León, C., dan Walsh, F. C., 2010, The Characterisation of PbO₂-Coated Electrodes Prepared from Aqueous Methanesulfonic Acid Under Controlled Deposition Conditions, *Electrochimica Acta*, 55(6), 2163-2172. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2009.11.051>
- [6] Widodo, D. S., Suyati, L., Gunawan, dan Haris, A., 2018, Decolorization of Artificial Waste Remazol Black B Using Electrogenerated Reactive Species, *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 21, 1,

Doi:

- 29–33. <https://doi.org/10.14710/jksa.21.1.29-33>
- [7] Saiah, F. B. D., dan Bettahar, N., 2022, Comparative Study on Adsorptive Efficiency Assessment of Congo red Dye from Aqueous Solutions Using Nanoporous Zirconia Oxides and Anionic Clays Nanosheet, *Desalination and Water Treatment*, 254, 260–273. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28329>
- [8] Alam, M. S., Hossain, M. I., Malek, M. A., Singh, N. R., Khan, M., Rahman, M., Uddin, J., dan Hassan, M. A., 2025, Electrochemical Generation of Reactive Chlorine Species Via Chloride Oxidation on –COOH-Modified Graphite Electrode to Attain Dye Degradation, *Catalysts*, 15, 11, 1046. <https://doi.org/10.3390/catal15111046>
- [9] Cruz-Díaz, M. R., Rivero, E. P., Rodríguez, F. A., dan Domínguez-Bautista, R., 2018, Experimental Study and Mathematical Modeling of The Electrochemical Degradation of Dyeing Wastewaters in Presence of Chloride Ion with Dimensionally Stable Anodes (DSA) of Expanded Meshes in a FM01-LC Reactor, *Electrochimica Acta*, 260, 726–737. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.12.025>
- [10] Liu, Z., Zhong, Y., Chen, Z., Zhang, X., dan Wang, X., 2025, Efficient activation of peroxodisulfate by Cu-loaded carbon catalysts for the degradation of highly concentrated Congo red, *Industrial Crops and Products*, 236, 122066, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122066>
- [11] Ismail, G. A., dan Sakai, H., 2024, pH-Dependent Dye Protonation and the Effect of Iron on Dye Degradation During Fenton-Based Processes, *Ozone: Science & Engineering*, 46(4), 294–308, <https://doi.org/10.1080/01919512.2023.2285690>
- [12] Zhang, W., Chen, J., Wang, J., Cui, C.-X., Wang, B., dan Zhang, Y., 2021, Impact of Active Chlorines and •OH Radicals on Degradation of Quinoline Using the Bipolar Electro-Fenton Process, *Water*, 13, 2, 128. <https://doi.org/10.3390/w13020128>
- [13] Li, J., Zheng, L., Li, L., Shi, G., Xian, Y., dan Jin, L., 2006, Photoelectro Synergistic Catalysis at Ti/TiO₂/PbO₂ Electrode and Its Application on Determination of Chemical Oxygen Demand, *Electroanalysis*, 18, 22, 2251–2256. <https://doi.org/10.1002/elan.200603644>
- [14] Djaballah, M.L., Belghit, A., Dehne, A., Merouani, S., Hamdaoui, O., dan Ashokkumar, M., 2023, Radicals (•OH, Cl•, ClO• and Cl₂•-) Concentration Profiles in The Intensified Degradation of Reactive Green 12 by UV/Chlorine Process: Chemical Kinetic Analysis Using a Validated Model, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 439, 114557. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114557>
- [15] Kevin, V. L. A., Handoogo, R., dan Sutikno, J. P., 2021, Pra Desain Pabrik Asam Klorida dari Elektrolisis Garam Industri, *Jurnal Teknik ITS*, 10, 2, 2301–9271.
- [16] Souza, R. B. A. de., dan Ruotolo, L. A. M., 2013, Phenol Electrooxidation in Different Supporting Electrolytes Using Boron-Doped Diamond Anodes, *International Journal of Electrochemical Science*, 8, 1, 643–657. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)14047-8](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14047-8)
- [17] Lei, Y., Lei, X., Westerhoff, P., Zhang, X., dan Yang, X., 2021, Reactivity of Chlorine Radicals (Cl• and Cl₂•-) With Dissolved Organic Matter and The Formation of Chlorinated Byproducts, *Environmental Science and Technology*, 55, 1, 689–699. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05596>
- [18] Puzenat, E., Lachheb, H., Karkmaz, M., Houas, A., Guillard, C., dan Herrmann, J. M., 2003, Fate of Nitrogen Atoms in The Photocatalytic Degradation of Industrial (Congo red) and Alimentary (Amaranth) Azo Dyes: Evidence for Mineralization Into Gaseous Dinitrogen, *International Journal of Photoenergy*, 5, DOI: <https://doi.org/10.1155/S1110662X03000138>
- [19] Sholiha, D. L., Safarina, N., dan Musawwa, M. M., 2021, Measurement of COD, TDS, and Hexavalent Chromic Metals as a Quality Monitoring of Bengawan Solo River Bodies in the Environmental Laboratory Service Gresik, *Indonesian Journal of Chemical Research*, 6, 2, 59–70. <https://doi.org/10.20885/ijcr.vol6.iss2.art2>
- [20] Fitriani, R. D., 2016, *Degradasi Elektrokimia Zat Warna Naphthol Blue Black Menggunakan Elektroda Pasta Karbon Nanopori*, Tesis, Universitas Airlangga.