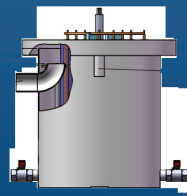
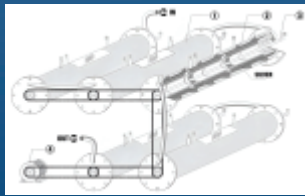
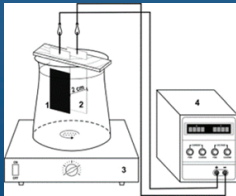


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

**APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA
UNTUK PENINGKATAN KUALITAS
PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU LINGKUNGAN
BIDANG TEKNIK LINGKUNGAN
KEPAKARAN TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA**



**OLEH:
ARIS MUKIMIN**

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA
UNTUK PENINGKATAN KUALITAS
PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2025 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA UNTUK PENINGKATAN KUALITAS PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
ILMU LINGKUNGAN
BIDANG TEKNIK LINGKUNGAN
KEPAKARAN TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA**

**OLEH:
ARIS MUKIMIN**

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2025 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Aplikasi Teknologi Elektrokimia untuk Peningkatan Kualitas Pengolahan Air Limbah Industri/
Aris Mukimin–Jakarta: Penerbit BRIN, 2025.

ix + 90 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

1. Elektrokimia
3. Limbah industri

2. Pengolahan limbah

541.37

Copy editor : Rahma Hilma Taslima
Proofreader : Martinus Helmiawan
Penata Isi : Rahma Hilma Taslima
Desainer Sampul : Rahma Hilma Taslima

Edisi pertama : Juli 2025



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 @Penerbit_BRIN
 @penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI.....	11
A. Metode Fisika, Kimia, dan Biologi.....	11
B. Metode Proses Oksidasi Lanjut	14
C. Metode Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Elektrokimia.....	16
III. TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI.....	19
A. Teknologi Elektrokimia dengan Elektroda Terlisis.	19
B. Teknologi Elektrokimia dengan Elektroda Stabil	25
IV. TANTANGAN DAN PELUANG TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA.....	47
A. Tantangan Teknologi Elektrokimia dalam Menjawab Kebijakan Pemerintah	47
B. Peluang Teknologi Elektrokimia dalam Pengolahan Air Limbah Industri di Indonesia	50
V. KESIMPULAN	53
VI. PENUTUP.....	55
VII. UCAPAN TERIMAKASIH.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	59
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	73
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	81

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1	Alat Proses Elektrokoagulasi Flotasi untuk Pengolahan Air Limbah Sistem Kontinu yang Terdiri Dari 3 Bagian.....	21
Gambar 3.2	Desain Unit Elektrokoagulasi-Flotasi	24
Gambar 3.3	Karakterisasi EDX, XRD, dan SEM Elektroda Ti/PbO ₂ Tersintesis.....	28
Gambar 3.4	Tipe Voltammogram Siklik	29
Gambar 3.5	Konfigurasi Sel Elektrokimia	32
Gambar 3.6	Penurunan Warna dan COD dari RB 19 Terhadap Fungsi Waktu Secara Elektrolisis.....	33
Gambar 3.7	Kromatogram HPLC pada Penurunan Rb 19 Terhadap Fungsi Waktu Secara Elektrolisis	34
Gambar 3.8	Skema Reaktor Elektrokatalitik	35
Gambar 3.9	Spektrum UV-Vis dari Polutan Air Limbah Selama Proses Elektrolisis sebagai Fungsi Waktu Tingga.....	36
Gambar 3.10	Desain Reaktor Elektrokimia	39
Gambar 3.11	Struktur Antibiotik Rifampicin.....	41
Gambar 3.14	Reaktor Hibrid Fenton Elektrokimia (HFE) Kapasitas 50 L dengan 12 Pasangan Elektroda (Jaring Silinder Ti/RuIrO ₂ -Batang Grafit)	44
Gambar 3.15	Trend Penurunan Warna dan COD terhadap Waktu Proses dengan Pengoperasian Sistem Sirkulasi pada Tegangan 6 Volt, Kandungan Garam 4 g/L, Konsentrasi Ferro 30 mg/L, pH 4, dan Kecepatan Pengaduk 90 rpm.....	45

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Hasil Analisis COD terhadap Air Limbah Sebelum dan Sesudah Degradasi sebagai Fungsi Waktu dan pH.....	36
Tabel 3.2	Hasil Analisis Kandungan Air Limbah Awal Sebelum dan Setelah Dielektrolisis untuk Parameter Sesuai Peraturan.....	37
Table 3.3	Pemakaian Listrik Selama Proses Elektrolisis Berdasar Tegangan Terpakai dan Komponen Terpasang	46

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIODATA RINGKAS



Aris Mukimin, lahir di Semarang, pada tanggal 29 September 1976 adalah anak keenam dari Bapak Sukir dan Ibu Jumi. Menikah dengan Muyassaroh, ST., S.Pd dan dikaruniai tiga orang anak, yaitu Husain Abdunnaafi', Muhammad Nabil Maula, dan Elka 'Ibadurrahman.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 43/M Tahun 2024 tanggal 13 Juni 2024 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama BRIN.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Nomor 138/I/HK/2025, tanggal 2 Juni 2025 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar di SD Negeri Wonolopo 02 Mijen Kota Semarang, tahun 1987, Sekolah Menengah Pertama di SMP Muhammadiyah 8 Mijen Kota Semarang, tahun 1990, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 13 Kota Semarang, tahun 1993. Memperoleh gelar Sarjana Sains dari Universitas Diponegoro tahun 1998, gelar Magister Ilmu Lingkungan dari Universitas Diponegoro tahun 2006, dan gelar Doktor bidang Ilmu Kimia dari Universitas Gadjah Mada tahun 2013.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain Pelatihan Teknis Analisis *Gas Liquid Chromatography* (GLC), *Gas Chromatography Mass Spectrometry* (GCMS) dan *High Performance Liquid Chromatography* (HPLC) di Bandung tahun 2001, *Short Term*

Fellowship Program for Technical Cooperation in International Textile Quality Standard and Textile Testing Quality Assurance di Korea tahun 2013 dan Pendidikan dan Pelatihan Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Lanjut di Bogor tahun 2017.

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Pertama golongan III/b tahun 2008, Peneliti Ahli Muda golongan III/c tahun 2013, Peneliti Ahli Madya golongan IV/a tahun 2018, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/d bidang teknik lingkungan tahun 2024.

Menghasilkan 51 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri (4 buah) maupun bersama penulis lain (47 buah) dalam bentuk buku, jurnal, prosiding dan paten. Sebanyak 27 KTI ditulis dalam bahasa Inggris, dan 24 dalam bahasa Indonesia.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Badan Litbang Kementerian Perindustrian, penguji disertasi (S-3) pada Pascasarjana Universitas Diponegoro (UNDIP), dosen praktisi pada Departemen Kimia Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro, serta pembimbing tesis (S-2) pada Universitas Diponegoro.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu anggota Himpenindo (2013–2021), anggota International Water Association (2018–2020), pengurus Himpunan Kimia Indonesia (HKI) Jawa Tengah bidang kerja sama industri (2018–2024), anggota Perhimpunan Periset Indonesia (2022–2025), dan anggota Pusat Riset Elektrokimia BRIN-UNDIP (2024–2025).

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (2013) dari Presiden RI, Inovasi 108 Indonesia Prospektif-2016 (2016), Inovasi 110 Indonesia Prospektif-2018 (2018), Juara 1 Riset Unggulan Tahunan Kementerian Perindustrian RI (2018), Artikel Berkualitas Tinggi (2020) dan Satyalancana Karya Satya XX Tahun (2023) dari Presiden RI.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assaalamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada 16 Juli 2025 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“APLIKASI TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA UNTUK PENINGKATAN KUALITAS PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI”

Pada orasi ini, akan disampaikan *state of the art* tentang teknologi elektrokimia dengan elektroda terlisis (*sacrifice*) untuk mengolah air limbah industri berbasis logam, pewarnaan, dan elektroplating perhiasan dari skala laboratorium, prototipe hingga skala penuh (*full scale*), teknologi elektrokimia dengan elektroda stabil (Dimensionally Stable Anode/DSA) untuk mengolah air limbah industri tekstil, batik dan farmasi dengan polutan persisten yang bersifat toksik/beracun, seperti zat warna dan antibiotik serta aplikasinya pada skala laboratorium,

Buku ini tidak diperjualbelikan.

prototipe, dan skala penuh. Temuan-temuan tersebut dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai teknologi pengolahan air limbah berbasis elektrokimia khususnya dalam hal mekanisme degradasi polutan, desain reaktor, kondisi operasi, dan sistem pengoperasiannya sehingga dapat bermanfaat bagi industri, wirausaha kecil-menengah dan masyarakat dalam upaya mencegah pencemaran.

Orasi ini diharapkan dapat mendukung implementasi kebijakan pemerintah berupa peraturan baku mutu dan standar pengolahan air limbah industri dalam upaya pelestarian lingkungan hidup.

I. PENDAHULUAN

Industri merupakan kegiatan ekonomi yang mengolah bahan baku menjadi suatu produk melalui proses produksi. Perkembangan industri cenderung makin kompleks baik jumlah maupun variasinya dan terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan perubahan gaya hidup, serta banyak menggunakan bahan kimia (Azanaw et al., 2022). Keberadaan industri diakui memberikan manfaat yang besar bagi manusia, tetapi juga menghadirkan beberapa permasalahan lingkungan karena buangan air limbahnya. Kandungan polutan air limbah industri dapat menyebabkan penurunan konsentrasi oksigen dan menghalangi absorpsi cahaya matahari (Samsami et al., 2020), penurunan estetika kualitas air (Mudhoo et al., 2020), gangguan terhadap kesehatan manusia (Rashid et al., 2021), dan gangguan kehidupan biota perairan (Sharma et al., 2023),

Komposisi buangan air limbah industri paling dominan merupakan polutan dengan karakter padatan tinggi (Mukimin et al., 2016), minyak mineral/hewani/nabati (Soenardi & Mukimin, 2014), dan logam berat (Nilawati et al., 2023). Khusus untuk industri tekstil didominasi oleh ammonium, *chemical oxygen demand* (COD), warna, surfaktan, phenol, dan aditif lain (Al-Tohamy et al., 2022; Kishor et al., 2021; Mukimin et al., 2022). Sementara itu, air limbah industri farmasi dominan mengandung antibiotik yang sulit diurai oleh mikroba termasuk terbuang dalam sekresi manusia dan hewan berdasarkan hasil uji sampel sedimen, air permukaan, dan air tanah (Magureanu et al., 2011). Penemuan polutan antibiotik pada air permukaan mengindikasikan bahwa polutan tersebut bersifat rekalsitran

terhadap oksidasi di pengolahan air limbah. Berdasarkan hal ini, diperlukan usaha pengolahan dengan teknologi yang mampu mengurai hingga ke senyawa sederhana sebelum dibuang ke lingkungan.

Teknologi pengolahan air limbah industri terbagi dalam tiga metode, yaitu fisika, kimia, dan biologi. Metode fisika bekerja berdasarkan perbedaan sifat fisik antara polutan dan pelarut (air) sehingga tepat untuk mengolah padatan tak larut. Metode kimia bekerja melalui penambahan bahan yang disebut koagulan yang efektif mendestabilisasi polutan suspensi. Polutan yang tak larut sempurna ini akan terkoagulasi? membentuk partikel halus dan segera akan mengendap ketika ditambahkan flokulan. Metode biologi bekerja dengan melibatkan mikroorganisme yang akan menguraikan senyawa polutan. Proses degradasinya dapat melalui penambahan oksigen yang disebut aerob atau tanpa oksigen disebut anaerob.

Selain ketiga metode tersebut, pengolahan air limbah juga dilakukan dengan metode oksidasi lanjut. Metode ini bekerja melalui pembentukan zat oksidator yang akan menguraikan senyawa polutan. Mekanisme pembentukan oksidator dapat berlangsung melalui fotokatalisis (Ambaye & Hagos, 2020), ozonasi (Gmurek et al., 2019), dan reagen Fenton (Ramos et al., 2021). Pada oksidasi fotokatalisis, selain degradasi polutan oleh oksidator yang terbentuk juga berlangsung melalui peran orbital kosong di permukaan material katalis (TiO_2) yang menarik elektron senyawa polutan.

Ada empat permasalahan utama pengolahan air limbah dengan metode fisika, kimia dan biologi, yaitu 1) menghasilkan limbah baru berupa padatan yang bersumber dari proses fisika, kimia dan biologi yang berpotensi masuk dalam kategori B3 (bahan berbahaya dan beracun) sehingga diperlukan penanganan

lebih lanjut, 2) menggunakan bahan kimia yang banyak, 3) membutuhkan waktu proses yang lama sehingga diperlukan peralatan yang besar dan lahan yang luas dan 4) khusus untuk polutan jenis zat warna dan antibiotik efisiensi pengolahannya menunjukkan hasil yang rendah. Sementara itu, metode oksidasi lanjut keberhasilan proses dan efisiensinya sangat tergantung pada morfologi dan sifat kristal katalis TiO_2 (fotokatalisis), kelarutannya rendah di fasa air sehingga waktu kontak dengan polutan sangat pendek (ozonasi) dan dosis bahan kimia yang digunakan cukup besar (reagen Fenton). Mengingat berbagai permasalahan tersebut di atas, diperlukan teknologi elektrokimia untuk peningkatan kualitas pengolahan air limbah industri di Indonesia.

Teknologi elektrokimia dengan jenis elektroda terlisir telah berhasil menggantikan metode kimia koagulasi di pengolahan air limbah industri logam. Destabilisasi polutan tersuspensi efektif dilakukan oleh flock M(OH)_x hasil oksidasi anoda logam (M) dan reduksi H_2O di katoda. Gas hidrogen dan oksigen sebagai hasil reaksi samping elektroda telah mendorong M(OH)_x ke permukaan (flotasi). Fenomena pembentukan flock dan flotasi memberikan kelebihan teknologi elektrokimia pada kecepatan reaksi dan simultansi proses koagulasi dengan flotasi. Sementara itu, teknologi elektrokimia dengan jenis elektroda stabil telah berhasil mengolah polutan organik terlarut, seperti zat warna dan antibiotik. Elektroda stabil telah mampu mendegradasi polutan secara oksidasi langsung dan tak langsung. Namun demikian, karena karakter elektroda harus memiliki sifat elektroaktif, stabil secara kimia dan fisika serta konduktif sehingga memerlukan bahan baku dan metode pembuatan yang tidak murah. Desain reaktor, konfigurasi sel, kondisi operasi, dan sistem proses sangat menentukan keberhasilan pengolahan sehingga diperlukan pengembangan teknologi elektrokimia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Dua hal tersebut yang menyebabkan teknologi elektrokimia hingga saat ini belum banyak diaplikasikan oleh industri. Naskah orasi ini akan membahas aplikasi teknologi elektrokimia dengan jenis elektroda terlarut/tidak stabil untuk mengolah air limbah industri logam, pewarnaan dan elektroplating perhiasan. Pembuatan elektroda stabil, desain reaktor, serta optimalisasi kondisi operasi teknologi elektrokimia oksidasi lanjut untuk mengolah zat warna dan polutan lain di industri tekstil, batik dan zat antibiotik di industri farmasi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

II. PERKEMBANGAN TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI

Teknologi pengolahan air limbah industri merupakan suatu upaya teknis penghilangan, penyisihan, dan penguraian polutan dari air sebagai pelarutnya (Said, 2017). Solusi teknis ini dikenal sejak lama dan terus mengalami penyempurnaan seiring dengan perkembangan pengetahuan dan peningkatan kesadaran di bidang lingkungan. Ada beberapa metode pengolahan air limbah yang telah umum dikenal, yaitu metode fisika, kimia, biologi, dan oksidasi lanjut.

A. Metode Fisika, Kimia, dan Biologi

Instalasi pengolahan air limbah pertama kali dibangun di London tahun 1865, yaitu ketika metode gravitasi digunakan untuk mengendapkan polutan sebelum air limbah masuk ke Sungai Thames. Efektivitas pengolahan gravitasi yang rendah kemudian memunculkan cara baru yaitu metode pengolahan dengan bantuan mikroorganisme (lumpur aktif) pada tahun 1914 (Lofrano & Brown, 2010). Metode pengolahan mengalami perkembangan yang cukup pesat setelah pengesahan undang-undang pengendalian polusi air tahun 1948 oleh pemerintah Amerika Serikat dan efektif diterapkan pada tahun 1972 di bawah *Environmental Protection Agency* (EPA) sebagai badan pengawas. Sementara itu, pemerintah Indonesia menetapkan peraturan lingkungan berupa Undang-Undang Lingkungan pada tahun 1982 (No. 4). Undang-undang ini memuat kewajiban atas pemilik kegiatan yang menimbulkan dampak lingkungan untuk melakukan pengolahan. Berdasarkan hal ini, instalasi

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pengolahan air limbah industri di Indonesia diprediksi mulai ada dan berkembang di tahun 1982.

Instalasi pengolahan air limbah yang digunakan berdasarkan metode fisika, kimia, dan biologi. Metode fisika bekerja melalui prinsip filtrasi dan pengendapan (Mukimin, et al., 2017). Makin besar perbedaan sifat fisika antara air dan polutan maka metode ini makin efektif bekerja. Pada beberapa instalasi pengolahan, metode ini digunakan sebagai penyempurnaan proses (Ansari et al., 2023; Collivignarelli et al., 2019; Teo et al., 2022). Selain itu, adsorpsi juga menjadi bagian dari metode fisika walaupun ada peran muatan yang erat dengan sifat kimia. Metode adsorpsi mempunyai kelemahan, yaitu berumur pakai pendek dan menimbulkan limbah adsorben (Dutta et al., 2021; Prasetyo et al., 2022).

Koagulasi menjadi istilah yang sering dipakai untuk mewakili metode kimia. Bahan koagulan pada kondisi pH tertentu akan membentuk kation hidroksida yang mudah mengagregat suspensi polutan. Aluminium sulfat, fero sulfat, dan PAC (poli aluminium klorida) merupakan jenis koagulan yang umum dipakai (Karam et al., 2021; Mukimin et al., 2017). Koagulan lain, seperti kulit buah kapsul kapas dan polianilin juga mulai diterapkan (Arulmathi et al., 2019). Agregat antara koagulan dengan suspensi polutan masih berukuran kecil sehingga sulit terendapkan. Flokulan kemudian ditambahkan sebagai bahan kedua dalam metode kimia untuk memperbesar agregat halus menjadi flok sehingga mudah terpisah dengan pengendapan (Samsami et al., 2020). Di samping efisiensi penurunan COD yang rendah (10–48 %) untuk polutan zat warna dan antibiotik, teknik ini menghasilkan lumpur yang harus dikelola lebih lanjut (GilPavas et al., 2017).

Metode biologi dalam mengolah air limbah terbagi menjadi dua kelompok, yaitu aerobik dan anaerobik. Teknologi biologi aerob mensyaratkan kandungan oksigen dengan konsentrasi tertentu sebagai syarat respirasi mikroorganisme. Rasio konsentrasi polutan terhadap mikroorganisme menjadi faktor penting keberhasilan proses, selain waktu tinggal. Beberapa jenis pengolahan biologi aerobik yang dikenal, yaitu lumpur aktif (Malik et al., 2022; Setianingsih et al., 2024), bioreaktor bergerak atau *moving bed biofilm reactor* (MBBR) (Yang et al., 2021) dan biofilter. Metode ini efektif menurunkan polutan organik dari kelompok karbohidrat seperti gula dan tepung. Kelemahan utama metode biologi aerobik, yaitu produksi lumpur dengan volume besar dan memerlukan proses lanjutan berupa unit sedimentasi. Selain itu, biaya operasinya mahal karena membutuhkan energi listrik yang besar untuk mensuplai oksigen.

Pengolahan air limbah biologi dapat dilakukan tanpa melibatkan oksigen yang dikenal dengan istilah metode anaerobik (Juliasari et al., 2016). Teknologi ini dapat mengolah air limbah dengan kandungan COD tinggi dari jenis organik minyak, protein dan lemak (Vistanty et al., 2020) dan pewarnaan (Moertinah et al., 2009). Selain sebagai metode pengolahan polutan, proses anaerobik dapat berperan sebagai penghasil energi, seperti biogas (Harihastuti et al., 2016) dan listrik (Mukimin, 2020b; Mukimin & Vistanty, 2023). Biologi anaerobik mempunyai kelebihan dibanding dengan aerobik dalam hal produksi volume lumpur dan biaya operasi. Beberapa model dan sistem operasi anaerobik yang banyak dikembangkan adalah *up flow anaerobic* (UFA) (Mukimin, 2020), *up flow anaerobic sludge blanked* (UASB) (Khan et al., 2020), dan *expended granular sludge bed* (EGSB) (Vistanty et al., 2020). Semua model ini dapat diterapkan sebagai sistem tunggal atau dengan integrasi proses

Buku ini tidak diperjualbelikan.

lain. Produksi lumpur yang tinggi pada proses kimia menjadikan metode integrasi biologi (anaerob-aerob) lebih diminati akhir-akhir ini, namun tetap mempunyai kelemahan pada capaian efisiensi penghilangan warna yang rendah. Efisiensi rendah ini terutama terjadi pada air limbah tekstil yang berasal dari proses *printing* dimana kandungan warna dan COD *non-biodegradable* tinggi.

Teknologi integrasi anaerob-aerobik yang diterapkan di industri tekstil masih menambahkan proses kimia sebagai tahapan pengolahan akhir. *Decolouring Agent* (DCA) menjadi pilihan utama karena terbukti efektif menurunkan polutan warna dan meningkatkan efisiensi penurunan COD. *Decolouring Agent* (DCA) adalah polimer kationik berbahan dasar resin *formaldehyde dicyandiamide* yang memiliki efisiensi penyerapan tinggi, pengendapan yang cepat, menetralkan muatan listrik, membentuk flok koagulan yang baik, dapat mengkoagulasi polutan warna yang larut dalam air, seperti zat warna: *direct*, reaktif, dispersif dan asam (Mukimin et al., 2024). Namun demikian, metode DCA memiliki beberapa kelemahan, seperti harga yang mahal, tidak tersedia di dalam negeri dan menghasilkan lumpur B3 sehingga diperlukan penanganan lebih lanjut dan pembiayaan yang tidak murah.

B. Metode Proses Oksidasi Lanjut

Kelemahan metode fisika, kimia, dan biologi khususnya dalam hal kinerja degradasi polutan persisten, seperti zat warna dan antibiotik membuka peluang untuk dihadapkannya teknologi baru. Teknologi pengolahan dengan metode proses oksidasi lanjut menjadi salah satu yang kemudian banyak diteliti. Teknologi ini pertama kali dimunculkan pada tahun 1980 yang diperuntukkan pada pengolahan air minum sebagai pengoksidasi

bio-rekalsitrasi dan inaktivasi mikroorganisme patogen. Metode proses oksidasi lanjut bekerja melalui proses oksidasi polutan air limbah. Proses oksidasi dapat dibentuk melalui fotokatalisis, yaitu kontak sinar UV pada permukaan TiO_2 sehingga terbentuk orbital kosong dan atau terbentuknya oksidator OH radikal dari molekul air (Ambaye & Hagos, 2020). Fotokatalisis oksidasi menarik untuk digunakan karena temperatur operasinya rendah, tidak larut dalam air, berprinsip fotoaktivitas dan *inert* terhadap lingkungan (Sharma et al., 2023). Namun demikian, terdapat beberapa kelemahan, yaitu 1) keberhasilan proses dan efisiensi degradasinya sangat tergantung pada morfologi dan sifat kristal katalis TiO_2 , 2) sumber energi sinar harus efektif kontak dengan material katalis (Al-Mamun et al., 2019; Oladipo & Mustafa, 2023), dan 3) diperlukan doping logam untuk meningkatkan aktivasi TiO_2 .

Proses oksidasi lanjut polutan juga dapat dibentuk dari proses ozonasi (Balasubramanyan, 2014; Gmurek et al., 2019), yaitu oksidasi molekul oksigen menjadi ozon dalam ruang plasma (Djayanti et al., 2023). Molekul ozon kemudian mengoksidasi polutan organik menjadi senyawa sederhana. Oksidasi ozonasi, kemampuan oksidasinya ditentukan oleh kemudahan dan waktu kontak antara O_3 dengan polutan. Kelarutan O_3 yang kecil di fasa air menyebabkan lama kontak dengan polutan sangat pendek sehingga efisiensinya rendah. Beberapa cara telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi ozonasi seperti: memperkecil ukuran molekul ozon (teknik venturi), menambahkan katalis homogen (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+}), atau katalis heterogen (metal oxide TiO_2 , MnO_2 , Fe_2O_3) sehingga keberhasilannya masih ditentukan oleh proses adsorpsi ozon dan polutan di permukaan katalis (Bilińska & Gmurek, 2021).

Selain metode fotokatalisis dan ozonasi, metode proses oksidasi lanjut juga dapat dibentuk melalui reagen Fenton (Ramos et al., 2021), yaitu reaksi peroksida (H_2O_2) dengan ferro untuk menghasilkan OH radikal yang akan mengoksidasi polutan. Fenton sebagai penemu pertama metode proses oksidasi lanjut ini, terjadi pada tahun 1894. Namun demikian, penerapannya sebagai metode pengolah polutan organik baru dilakukan pada akhir tahun 1960an. Metode Fenton digunakan terutama untuk mengolah air limbah dengan oksidasi radikal dan flokulasi (Bilińska & Gmurek, 2021). Metode ini kemampuannya ditentukan oleh kuantitas bahan kimia H_2O_2 (Ramos et al., 2021). Fenton mempunyai banyak keuntungan, namun kelemahannya cukup signifikan, seperti syarat berlangsungnya proses pada kondisi sangat asam, biaya konsumsi reagenya besar, dan produksi lumpur besi yang cukup banyak sehingga membatasi penerapan lebih lanjut.

C. Metode Proses Oksidasi Lanjut Berbasis Elektrokimia

Teknologi elektrokimia selain dapat menggantikan metode kimia, juga dapat membentuk proses oksidasi lanjut. Teknologi elektrokoagulasi dapat membentuk koagulan melalui oksidasi elektroda oleh energi listrik (Holt et al., 2005). Kation logam elektroda secara cepat bereaksi dengan anion hidroksida yang terbentuk melalui reduksi molekul air pada permukaan katoda. Logam hidroksida selanjutnya mengikat polutan suspensi sebagaimana proses koagulasi secara kimia (Mukimin, 2008).

Metode proses oksidasi lanjut secara elektrokimia familiar disebut dengan istilah *electrochemical advanced oxidation processes* (EOAPs). Metode ini disusun dari elektroda yang bersifat stabil sehingga tidak mengalami oksidasi ketika terhubung ke *rectifier* yang memberikan energi listrik arus

Buku ini tidak diperjualbelikan.

searah (Mukimin, 2020a). Elektroda dengan potensial tertentu akan mengoksidasi spesies terlarut, seperti anion, non-ionik, dan zat polutan. Oksidasi zat polutan oleh elektroda berlangsung dengan syarat energi termodinamika tertentu, yaitu tingkat energi orbital kosong elektroda harus lebih rendah dari energi elektron zat polutan dan dikenal dengan istilah oksidasi langsung (Bard & Faulkner, 2001). Syarat energi termodinamik yang demikian ini menjadikan proses oksidasi langsung sulit terbentuk.

Oksidasi polutan pada metode elektrokimia umumnya melalui mekanisme tak langsung (*indirect oxidation*). Spesies anion seperti Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , dan PO_4^{3-} dapat teroksidasi membentuk spesies reaktif seperti $\text{Cl}^\cdot$, $\text{Cl}_2^{\cdot-}$, $\text{SO}_4^{\cdot-}$, $\text{CO}_3^{\cdot-}$, dan $\text{PO}_4^{\cdot-}$ (Wang & Wang, 2020). Spesies non-ionik, seperti H_2O dapat dioksidasi membentuk radikal hidroksida ($\cdot\text{OH}$) yang mempunyai potensial redok tinggi (2,8 V). Spesies-spesies reaktif ini akan mudah mengoksidasi polutan menjadi senyawa sederhana hingga H_2O dan CO_2 (Mukimin, 2024).

Efektivitas degradasi polutan organik terlarut dengan teknologi elektrokimia dapat ditingkatkan melalui penambahan katalis homogen (Mukimin et al., 2020; Mukimin et al., 2024). Fe(II) merupakan katalis homogen yang banyak digunakan dalam peningkatan kinerja elektrokimia. Kation ini mudah mengoksidasi hidrogen peroksida (H_2O_2) dalam suasana asam (pH:4) membentuk radikal hidroksida ($\cdot\text{OH}$) yang sangat kuat mengoksidasi polutan. Kelebihan teknologi elektrokimia pada proses di atas karena H_2O_2 yang dibutuhkan dapat dibentuk sendiri melalui reduksi oksigen terlarut pada permukaan katoda.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

III. TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA UNTUK PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI

Elektrokimia merupakan cabang ilmu kimia yang fokus pada interelasi antara elektrik dan reaksi kimia. Bagian terbesar dari bidang ilmu ini mempelajari sebuah perubahan kimia akibat aliran arus listrik dan produksi energi listrik oleh reaksi kimia (Bard & Faulkner, 2001). Salah satu lingkup penerapan elektrokimia berupa teknologi pengolahan air (Mukimin et al., 2021) atau air limbah (Mukimin et al., 2014). Teknologi ini tersusun dari elektroda yang berkutub positif disebut anoda dan berkutub negatif disebut katoda. Kedua material ini juga disebut elektronik konduktor yang dipasangkan dalam suatu media ionik konduktor.

Selain elektroda, teknologi elektrokimia pada pengolahan air limbah mempunyai unsur kunci, yaitu energi listrik sebagai *driving force* (Mukimin, 2008). Jenis arus searah (DC) menjadi syarat berlangsungnya reaksi elektrokimia sehingga menjadi bagian penting dalam penyusunan peralatan. Unit penyedia arus ini biasa disebut *reticfier* yang mampu mengubah arus bolak balik dari sumber primer (PLN) menjadi arus searah atau berasal dari energi matahari menggunakan solar *photovoltaic* (PV) (Purwanto & Huda, 2005). Fluktuasi arus *output reticfier* menjadi bagian yang akan memengaruhi performen kinerja proses elektrokimia dan keawetan peralatan yang digunakan.

A. Teknologi Elektrokimia dengan Elektroda Terlisis.

Teknologi elektrokimia untuk mengolah polutan air telah ada sejak tahun 1889 oleh Vik dkk. dengan membuat instalasi

pengolahan untuk limbah rumah tangga. Tahun 1909 di USA, J.T. Harries telah mematenkan pengolahan air limbah dengan sistem elektrolisis menggunakan anoda aluminium dan besi. Pada tahun 1995 telah diperkenalkan *electronic coagulator* yang berfungsi sebagai unit penghasil koagulan untuk mengolah polutan dalam bentuk partikel tersuspensi. Berdasarkan proses dan sistem pengolahan yang berlangsung maka teknologi ini dikenal dengan istilah elektrokoagulasi (Holt et al., 2005).

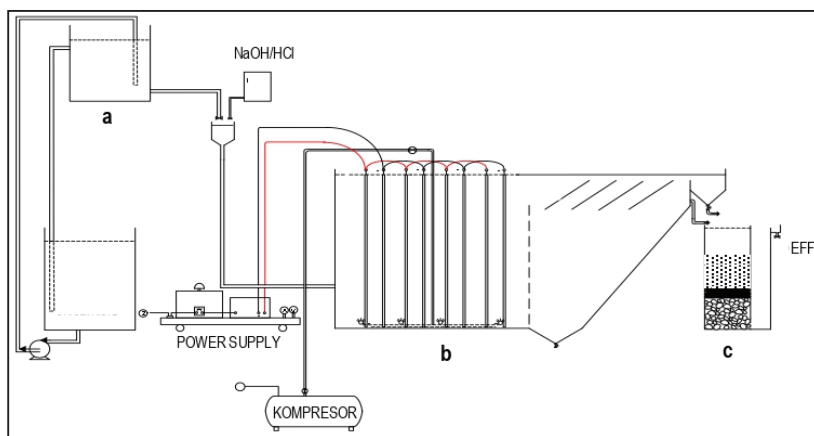
Teknologi elektrokoagulasi yang diterapkan pada air limbah industri berbasis logam menunjukkan kinerja yang lebih baik dibanding dengan proses koagulasi kimia biasa (Mukimin, 2006). Kandungan COD yang bersumber dari oli/pelumas/minyak, surfaktan, emulkat, cat, dan logam-logam oksidator baik yang teremulsi, tersuspensi, terkolid, dan terlarut kurang efektif diolah dengan proses kimia biasa (koagulasi). Hal ini terindikasi dari kebutuhan bahan koagulan-flokulan yang besar. Selain itu, dihasilkan produk samping berupa lumpur yang akan meningkatkan biaya pengolahan. Sementara itu, teknologi elektrokoagulasi telah mampu mereduksi biaya pengolahan. Penghematan itu bersumber dari konsumsi bahan kimia dan biaya pengelolaan lumpur. Penggantian bahan kimia dengan material elektroda telah mengurangi biaya sebesar 18,46 %, sedangkan pengurangan biaya pengelolaan lumpur mencapai 96,5 %. Penurunan yang sangat tinggi pada biaya pengelolaan lumpur dikarenakan teknologi elektrokoagulasi menghasilkan volume lumpur yang jauh lebih kecil dibanding dengan pengolahan kimia biasa/koagulasi.

Teknologi elektrokoagulasi disusun dari elektroda tak stabil/terlisis atau mudah teroksidasi dengan desain sebagaimana Gambar 3.1. Logam aluminium dan besi dipilih sebagai material elektroda yang difungsikan sebagai anoda atau katoda. Ketika

kedua elektroda diberikan energi listrik maka berlangsung reaksi kimia dengan mekanisme:



Kation logam yang terbentuk (persamaan 1) segera bereaksi dengan ion hidroksida (persamaan 2) membentuk logam hidroksida yang dapat berfungsi sebagai koagulan.



Keterangan: tanki umpan (a), reaktor elektro-flotasi (b) dan filter (c)

Sumber: Mukimin (2006)

Gambar 3.1 Alat Proses Elektrokoagulasi Flotasi untuk Pengolahan Air Limbah Sistem Kontinu yang Terdiri Dari 3 Bagian

Reaksi elektrokimia tersebut selain menghasilkan kation logam dan anion hidroksida, juga menghasilkan gelembung gas, baik dari permukaan anoda maupun katoda. Berdasarkan persamaan reaksi 2 dan 3 maka gelembung gas yang keluar dari permukaan elektroda tersebut adalah gas oksigen dan hidrogen. Adanya gelembung gas ini menyebabkan koagulan yang terbentuk terdorong kepermukaan sehingga dikenal dengan istilah elektrokoagulasi-flotasi (Mukimin, 2008).

Teknologi elektrokoagulasi-flotasi mempunyai beberapa keuntungan yang tidak dimiliki oleh teknologi lain, seperti efektif menurunkan kandungan suspensi, tidak memerlukan bahan kimia, kebutuhan lahan yang tidak luas, mudah dioperasikan, dan potensial untuk dilakukan proses secara otomatisasi (Mukimin, 2020a). Kebutuhan lahan yang tidak luas sangat cocok untuk industri menengah dan kecil yang umumnya tidak mempunyai lahan. Industri besar pun seiring dengan perkembangan populasi dan tata ruang daerah menghadapi kesulitan terhadap ketersediaan lahan sehingga teknologi elektrokoagulasi-flotasi menjadi alternatif yang bisa diterapkan. Variabel pengolahan yang tidak banyak, dimana hanya tergantung pada tegangan dan waktu proses sehingga operasionalnya mudah disesuaikan dengan kondisi air limbah. Besaran parameter operasi yang tetap dengan rentan kuantitatif terukur menjadikan pula teknologi ini mudah untuk diautomatisasi sehingga mengurangi kebutuhan tenaga operator.

Teknologi elektrokoagulasi-flotasi dapat digunakan untuk mengolah air limbah tekstil pewarnaan (Mukimin et al., 2009). Plat logam besi (Fe) digunakan sebagai anoda berpasangan dengan plat aluminium sebagai katoda. Sel elektrokimia ini diletakkan dalam wadah dan dihubungkan dengan tangki sebagai pengumpan dan pengumpul melalui pompa sehingga

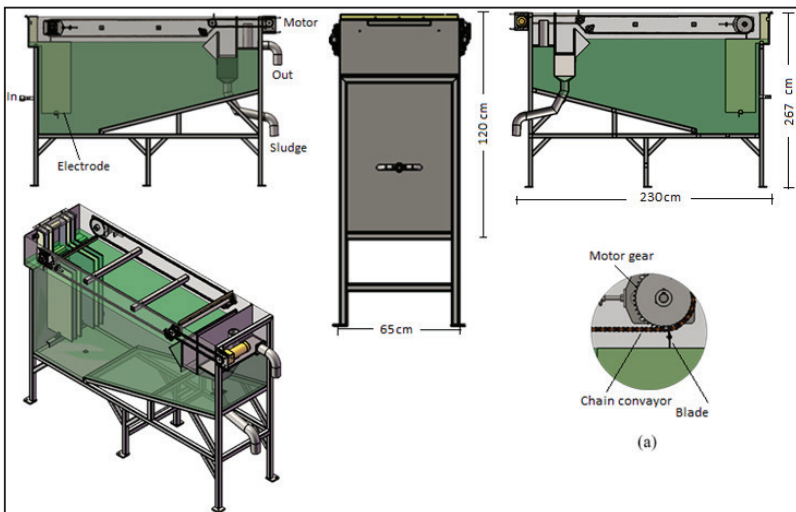
berlangsung proses sirkulasi. Optimalisasi proses pengolahan dilakukan dengan menambahkan unit filtrasi sebagai tahapan lanjutan setelah elektrokoagulasi.

Air limbah dari industri tekstil pewarnaan dengan jenis reaktif (*Blue RSP*) dan dispersif (*Blue BR* dan *Ruben 2R*) mampu diolah dengan proses elektrokoagulasi. Efektivitas pengolahan ditentukan oleh rapat arus, keasaman (pH) dan laju alir sirkulasi. Kenaikan rapat arus akan memperbesar penurunan intensitas warna. Tingkat keasaman terhadap penurunan konsentrasi warna menunjukkan kurva V dimana diperoleh rentang pH optimum 8–10. Variabel laju alir sangat menentukan optimalisasi proses khususnya pada transfer perubahan fasa dan degradasi polutan. Makin tinggi laju alir makin meningkat penurunan intensitas warna karena kesetimbangan perubahan fasa dan interaksi polutan dengan koagulan (Mukimin et al., 2009).

Teknologi elektrokoagulasi-flotasi (ECF) dapat difungsikan sebagai pengolahan lanjutan proses biologi (Vistanty et al., 2015). *Up flow anaerobic sludge blanked* (UASB) dipilih sebagai proses pendahuluan untuk mengolah air limbah industri karton box. Hasil proses biologi ini selanjutnya dimasukkan dalam unit elektrokoagulasi-flotasi sebagai tahapan akhir sebelum dibuang ke lingkungan. Optimalisasi proses ECF dikaji pada berbagai variabel pH dan waktu elektrolisis. Proses ECF mampu menurunkan COD air limbah terolah UASB sekitar 70–81%. Kondisi optimum penurunan COD tercapai pada pH netral untuk anoda Al dan basa untuk anoda Fe. Penambahan waktu elektrolisis sangat memengaruhi efektivitas penurunan COD untuk anoda Fe, sedangkan anoda Al tidak demikian. Jumlah lumpur yang dihasilkan oleh proses ECF lebih sedikit dibandingkan proses kimia biasa. Biaya kebutuhan energi berkisar antara 4,5–18 kWh/m³. Integrasi UASB dan ECF

berpotensi untuk diaplikasikan sebagai sistem pengolahan air limbah industri karton box yang efektif.

Teknologi elektrokoagulasi-flotasi menunjukkan kinerja yang baik sebagai pengolahan pendahuluan pada industri elektroplating perhiasan (Pratiwi et al., 2021). Air limbah industri perhiasan mempunyai karakteristik cemaran yang meliputi logam berat, kimia organik, *suspended solid*, dan anion. Secara kuantitas volume polutan tidaklah tergolong besar namun secara sifat berkecenderungan toksik bagi manusia dan biota perairan. Pengolahan terintegrasi elektrokoagulasi, fisika, dan biologi merupakan pilihan yang sesuai dengan karakter tersebut dan adaptif terhadap keterbatasan lahan serta mudah dalam pengoperasian. Unit elektrokoagulasi (Gambar 3.2) dan tangki filter dipilih untuk pengolahan dengan proses kimia dan fisika, sedangkan fitoekstraksi mewakili proses biologi.



Keterangan: berbahan dasar stainless, berkapasitas 2 m³, dan dilengkapi skimmer pada bagian atas (a)

Sumber: Pratiwi et al. (2021)

Gambar 3.2 Desain Unit Elektrokoagulasi-Flotasi

Air limbah yang bersumber dari proses pencetakan, pelapisan Cr, pemotongan batu kristal, pencucian Au, pencucian Ag, dan pemurnian Ag/Au dialirkan ke bak ekualisasi, dipompa ke unit elektrokoagulasi sesudah dinetralkan, disaring dengan silika-karbon filter, dan dintegrasikan dengan fitoekstraksi sehingga memberikan nilai tambah di estetika lingkungan. Unit pengolahan air limbah ini mampu menurunkan TSS, COD, Cu, CN dan minyak & lemak. Penurunan konsentrasi COD terbesar terjadi di unit elektrokoagulasi dengan rata-rata 69 % kemudian fitoekstraksi 39 % dan filter 33 %.

B. Teknologi Elektrokimia dengan Elektroda Stabil

Elektroda logam aluminium dan besi yang digunakan pada teknologi elektrokimia koagulasi mempunyai sifat teroksidasi. Walaupun murah dan mudah diperoleh, elektroda ini tidak mampu mengolah polutan organik terlarut dan senantiasa menghasilkan produk samping berupa lumpur. Berdasarkan keterbatasan tersebut maka dibuat elektroda dengan sifat stabil yang sering disebut *dimensionally stable anode* (DSA). Karakter utama elektroda jenis ini meliputi tiga hal, yaitu stabil secara kimia, dan fisik, konduktor, dan elektroaktif (Ghalwa & Abdel-Latif, 2005).

Elektroda stabil pertama kali dikenal berasal dari material logam mulia dari jenis platina (Pt) dan emas (Au). Material ini sangat mahal sehingga tidak menguntungkan untuk dilakukan pada pengembangan teknologi khususnya di bidang pengolahan limbah. Keterbatasan ini memicu penelitian sehingga diperoleh material oksida logam yang bersifat stabil, elektroaktif, dan konduktor. PbO_2 merupakan salah satu contoh oksida logam yang memiliki ketiga sifat di atas. Elektroda ini mudah dibuat dengan melapiskan pada substrat *inert*, seperti titanium. Teknik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

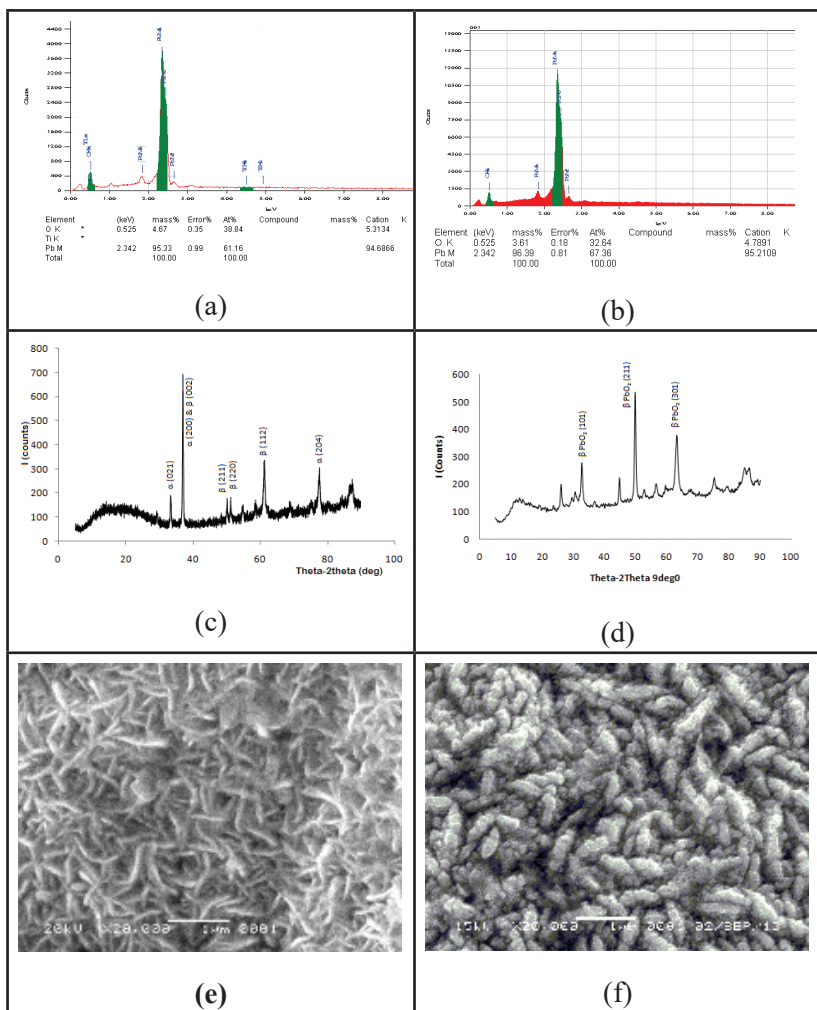
pelapisan PbO_2 pada permukaan logam *inert* menjadikan faktor positif dalam aplikasi elektrokimia, khususnya dalam pengolahan air limbah karena dapat memperluas permukaan oksida logam (Mukimin et al., 2010).

Elektroda Ti/PbO_2 dapat dibuat dalam suasana asam (Mukimin et al., 2010) dan basa (Mukimin et al., 2013). Pembuatan elektroda Ti/PbO_2 suasana asam dilakukan dari larutan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, NaF dan HNO_3 yang didepositkan pada plat titanium. Sementara itu, pembuatan elektroda Ti/PbO_2 suasana basa dari larutan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, NaF dan NaOH . Pembentukan material terdeposit mengalami kenaikan yang sangat tinggi pada tahap awal kemudian menurun secara perlahan-lahan selama proses elektrodposisi. Kecenderungan kecepatan pembentukan elektrodposit yang tinggi dipengaruhi oleh faktor kinetik, sedangkan penurunannya karena faktor difusi.

Karakterisasi material dengan *energy dispersive X-ray* (EDX) dan *X-ray diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa material tersebut tersusun dari unsur Pb dan O dengan pola difraksi yang sama dengan PbO_2 standar. Analisis EDX seperti Gambar 3.3 menunjukkan elemen penyusun material tersintesis yaitu Pb dan O. Berdasarkan analisis kuantitatif dengan *atomic absorption spectrofotometry* (AAS) relatifitas kedua unsur tersebut mempunyai komposisi Pb:O adalah 1:2. Pada karakterisasi XRD menunjukkan bahwa material PbO_2 tersusun dari campuran kristal yang berbentuk ortorombik (α) dan tetragonal (β). Bentuk kristal ortorombik dan tetragonal teridentifikasi jelas pada sudut difraksi dan indeks miller sebagaimana Gambar 3.3. Morfologi permukaan tersusun dari material-material yang berukuran nano dengan bentuk batang yang menyerupai akar atau serat (suasana basa) dan butiran-butiran kecil (suasana asam) (Mukimin et al., 2015).

Ti/PbO₂ dibuat dengan tujuan secara umum untuk digunakan sebagai elektroda yang terhubung dengan kutub positif atau sebagai anoda dalam sel elektrolisis. Terkait hal tersebut maka Ti/PbO₂ tersintesis diharapkan mempunyai sifat stabil secara fisik dan kimia serta mempunyai kemampuan kinerja elektrokatalitik yang tinggi. Kemampuan elektrokatalitik yang tinggi dari suatu elektroda diketahui dari respon arus yang dihasilkan sebagai fungsi energi potensial.

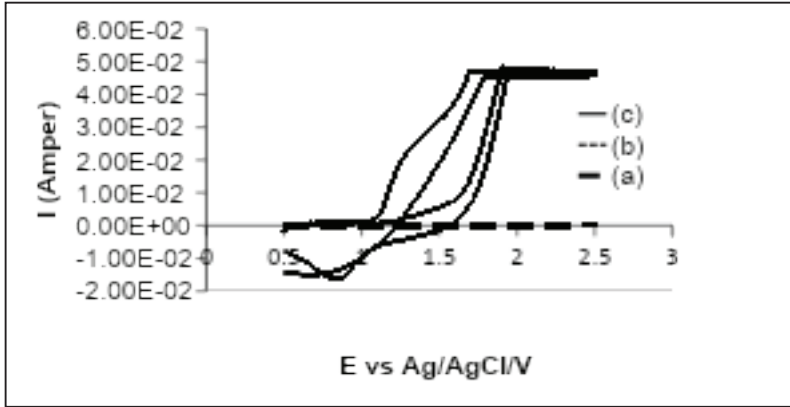
Kemampuan elektrokatalitik yang besar dari PbO₂ (Gambar 3.4) disebabkan oleh permukaan oksida yang mengalami hidroksilasi. Elektroda Ti yang tidak mengandung oksida sulit menyelenggarakan reaksi oksidasi sehingga respon arus yang dihasilkan kecil. Sifat elektroaktif yang tinggi pada elektroda Ti/PbO₂ tersintesis basa dipengaruhi oleh morfologi permukaan material yang butiran pada skala mikro dan serat pada skala nano (Mukimin et al., 2011). Selain itu, kemampuan elektroaktif yang tinggi dari PbO₂ tersintesis juga disebabkan oleh bentuk kristal, dimana bentuk tetragonal lebih bersifat elektroaktif dibanding dengan bentuk ortorombik.



Keterangan: suasana basa (a, c, e) dan asam (b, d, f)

Sumber: Mukimin et al., (2015); Mukimin et al. (2012)

Gambar 3.3 Karakterisasi EDX, XRD, dan SEM Elektroda Ti/PbO₂ Tersintesis



Keterangan: hasil reaksi oksidasi Cl^- pada elektroda Ti (a), Ti/PbO_2 yang tersintesis secara asam (b), dan secara basa (c).

Sumber: Mukimin et al. (2012)

Gambar 3.4 Tipe Voltammogram Siklik

Elektroda Ti/PbO_2 dalam perkembangannya mempunyai kelemahan terkait potensi resiko lingkungan. Ketika elektroda ini digunakan maka berpeluang terjadinya lisis, baik oleh pengaruh tegangan berlebih maupun kerapuhan morfologi permukaan. Dalam perkembangan selanjutnya dikenal oksida logam lain, seperti RuO_2 yang dilapiskan di permukaan jaring titanium. Elektroda ini mempunyai kemampuan kinerja yang lebih baik dibanding PbO_2 . Efektivitas RuO_2 akan makin besar dengan penambahan logam doping, seperti Ir, Ti, Zr, dan Ni. Doping metal ini akan menyebabkan penghematan energi yang besar, efisiensi arus yang baik, dan dapat memperpanjang masa pakai elektroda (Mukimin et al., 2017).

Seiring kesadaran lingkungan yang makin meningkat maka sintesis material elektroda berbahan aman makin diminati.

Elektroda berbasis karbon merupakan contoh elektroda yang sangat ramah lingkungan. Elektroda ini dapat disintesis dari karbon sumber minyak bumi atau limbah biomasa (Mukimin, et al, 2015). Tempurung kelapa yang mempunyai kandungan karbon tinggi dapat digunakan sebagai bahan pembuatan elektroda karbon. Sifat elektroaktif material ini dapat ditingkatkan melalui aktivasi fisika-kimia dan sintering sehingga terjadi peningkatan kandungan karbon, perubahan struktur dari amorf menjadi semi-kristal, pelebaran mikroporositas, pembentukan ikatan karbon jenuh, dan pengembangan luas permukaan.

Arang tempurung kelapa sebagai prekursor pembuatan elektroda karbon kinerjanya dapat ditingkatkan dengan pemberian doping PbO_2 dan boron (Mukimin & Vistanty, 2016). Doping elektroda karbon dengan PbO_2 dilakukan dengan proses deposit anoda (elektrodeposisi) menggunakan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, HNO_3 , dan NaF . Pengerjaan dilakukan pada potensial rendah selama beberapa jam dengan menggunakan catu daya DC. Adapun pendopingan elektroda karbon dengan boron melalui penambahan H_3BO_4 ke dalam campuran prekursor poli vinil alkohol (PVA), karbon dan air suling sebelum proses pencetakan.

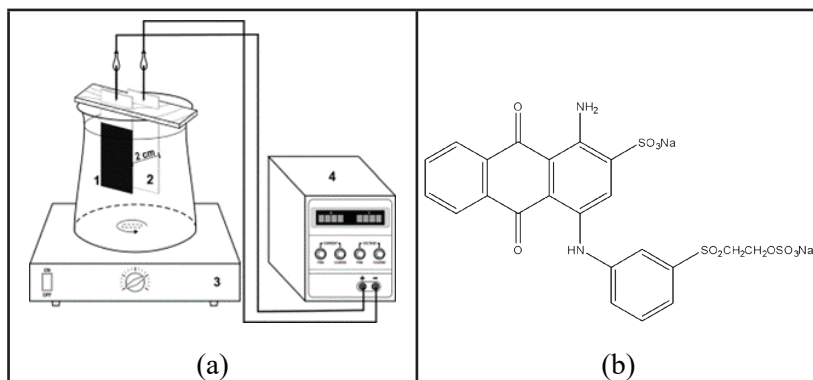
Elektroda karbon berpori dapat dibuat dari arang tempurung kelapa melalui modifikasi metode sintering-aktivasi secara simultan menggunakan FeCl_3 dan ZnCl_2 pada suhu tinggi secara non atmosferik (Mukimin et al., 2019). Karbon hasil modifikasi kemudian dicetak dengan poli vinil alkohol sebagai zat pengikat pada temperatur medium dan tekanan tinggi serta diinstallkan dalam sel bioelektrosintesis sebagai katoda. Data pengukuran XRD, *brunnaeur emmet teller* (BET), dan *scanning electron microscopy* (SEM) telah menunjukkan bahwa karbon telah berubah dari amorf menjadi kristalin dengan luas permukaan meningkat 11 kali serta berpori.

Limbah biomassa perkebunan juga berhasil dibuat menjadi elektroda karbon mikro grafit (Yanti et al., 2024). Proses pembuatannya melibatkan transformasi arang tempurung kelapa menjadi karbon aktif dan selanjutnya menghasilkan grafit. Metode grafitisasi termal dengan FeCl_3 katalis pada suhu tinggi selama satu jam dalam kondisi tanpa oksigen, struktur mikro grafit terbentuk pada kerangka karbon aktif tempurung kelapa. Analisis XRD, FTIR, SEM, dan BET mengkonfirmasi keberhasilan pembentukan karbon mikro grafit. Komposit polianilin telah meningkatkan sifat elektroaktif material. Komposit grafit/polianilin yang disintesis dengan polimerisasi in situ (CSGAC/PANI-2) menunjukkan hasil yang optimal dengan karakteristik kristalin sehingga meningkatkan konduktivitas material. Konfirmasi gugus fungsi dengan FTIR juga menunjukkan adanya interaksi elektron di ikatan π - π .

Aplikasi elektroda stabil untuk pengolahan air limbah telah meliputi berbagai polutan seperti *Remazol Brilliant Blue R 19* (Mukimin et al., 2012), zat warna reaktif (Marlena et al., 2012), zat warna tekstil (Mukimin et al., 2015), batik *printing* (Mukimin et al., 2017), batik tulis (Mukimin et al., 2018), nitrit dan sulfida (Mukimin & Purwanto, 2018), amoniak (Mukimin, et al., 2023), residu reagen laboratorium (Mukimin et al., 2018), antibiotik (Mukimin & Vistanty, 2019), dan tekstil terpadu (Mukimin et al., 2024). Polutan-polutan tersebut terlarut, baik dalam air limbah sintesis maupun buangan proses industri. Lingkup aplikasi yang dilakukan meliputi skala laboratorium, prototipe dan skala penuh.

Elektrodegradasi zat warna *Remazon Brilliant Blue R 19* (RB 19) menunjukkan kinerja yang baik (Mukimin et al., 2012). Pengolahan polutan ini dilakukan menggunakan elektroda Ti/PbO_2 tersintesis kondisi basa dalam skala laboratorium (Gambar 3.5a). Walaupun zat warna RB 19 berstruktur tiga aromatik

(Gambar 3.5b) namun mudah diuraikan secara elektrokimia menggunakan elektroda stabil.

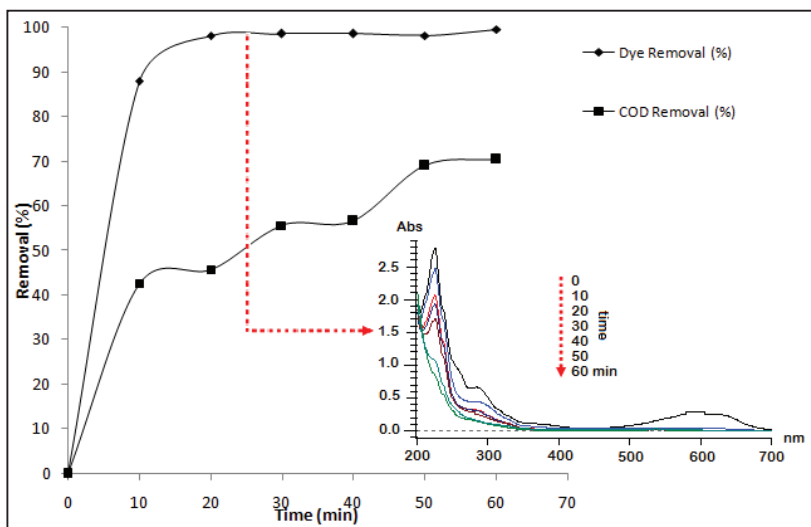


Keterangan: anoda Ti/PbO₂ (a) dan struktur senyawa *Remazol Brilliant Blue R 19* (b)

Sumber: Mukimin et.al. (2012)

Gambar 3.5 Konfigurasi Sel Elektrokimia

RB 19 mengalami degradasi yang cepat pada λ_{592} dalam pasangan sel elektroda stabil sehingga menunjukkan pemutusan yang mudah pada gugus 1,4-diNHArt dari senyawa antrakuinon (Gambar 3.6). Pemutusan dimungkinkan karena oksidator yang dihasilkan oleh sel elektrokimia. Penurunan puncak absorpsi pada gelombang UV meyakinkan bahwa degradasi juga berlangsung pada struktur antrakuinon. Oksidator yang terbentuk pada sel elektrokimia akan berfungsi sebagai pengoksidasi yang dapat merusak RB 19. Penurunan yang cenderung lambat dibanding daerah tampak mengindikasikan bahwa oksidasi antrakuinon berlangsung lebih sulit dibanding dengan pada pemutusan gugus 1,4-diNHArt.



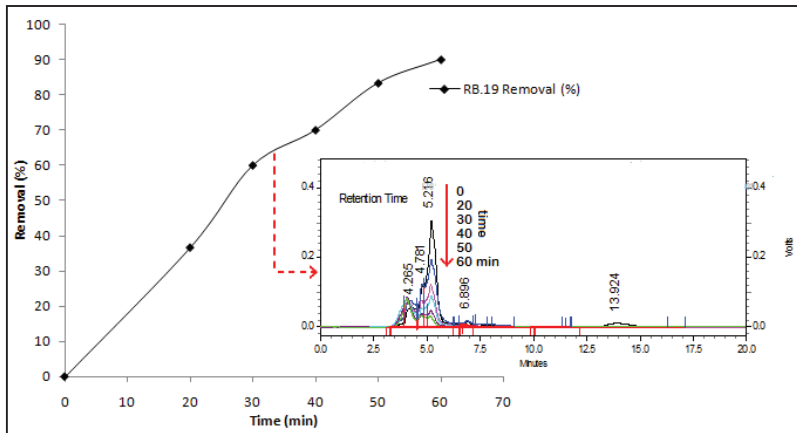
Sumber: Mukimin et al. (2012)

Gambar 3.6 Penurunan Warna dan COD dari RB 19 Terhadap Fungsi Waktu Secara Elektrolisis

Konfirmasi lebih lanjut tentang pemutusan ikatan dalam struktur molekul RB 19 diketahui dari analisis HPLC. Identifikasi senyawa RB 19 sebagai model polutan ditunjukkan oleh kromatogram dengan puncak maksimum dengan luas lebih besar dibanding dengan puncak-puncak lainnya sebagaimana Gambar 3.7. Penurunan puncak kromatogram menunjukkan bahwa terjadi pemutusan ikatan pada molekul RB 19 selama proses elektrolisis. Pemutusan ikatan tersebut berlangsung hingga membentuk senyawa sederhana (CO_2 dan H_2O). Hal ini didasarkan pada hasil analisis HPLC setelah proses elektrodegradasi berlangsung, dimana puncak kromatogram yang baru tidak terbentuk. Sebaliknya, jumlah puncak kromatogram mengalami penurunan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

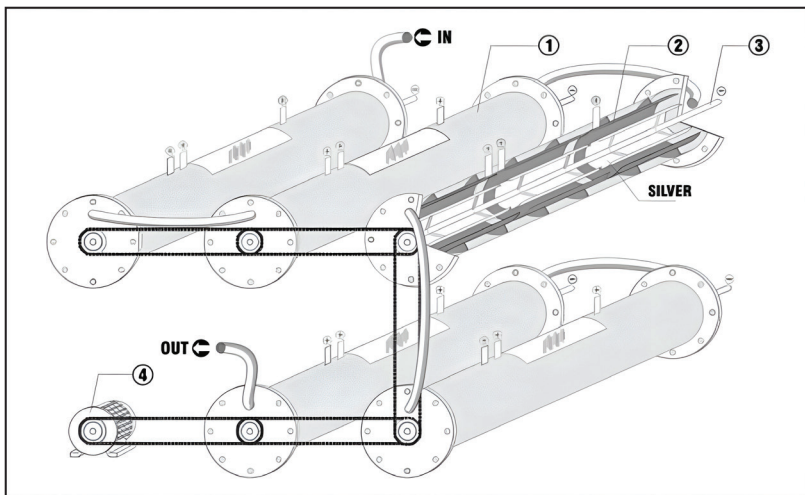
setelah proses elektrodegradasi dari 5 puncak menjadi 3 puncak (Mukimin *et al.*, 2012).



Sumber: Mukimin *et al.* (2012)

Gambar 3.7 Kromatogram HPLC pada Penurunan Rb 19 Terhadap Fungsi Waktu Secara Elektrolisis

Elektroda stabil silinder Ti/PbO_2 tersintesis asam telah dibuat dalam skala prototipe dengan volume reaktor 100 L (Gambar 3.8) (Mukimin *et al.*, 2015). Elektroda Ti/PbO_2 tersebut dipasangkan dengan katoda stainless yang berada di pusat tabung elektrokatalitik dan dihubungkan dengan motor penggerak sehingga juga bisa berfungsi sebagai pengaduk. Reaktor selanjutnya diaplikasikan untuk mengolah air limbah tekstil dengan proses utamanya *dyeing*. Visualisasi air limbah ini sering tampak berwarna merah, violet, ungu, coklat, dan hitam. Kandungan polutan yang relatif dominan meliputi COD, TSS, dan amoniak. Indikasi proses degradasi secara jelas diketahui dari perubahan visualisasi warna sebelum dan setelah pengolahan.



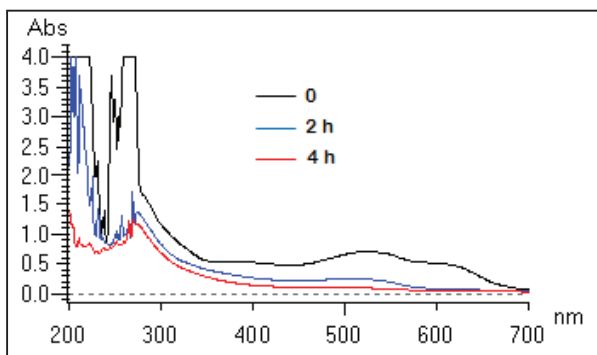
Keterangan: (1) tabung elektrokatalitik, (2) Anoda silinder Ti/PbO₂, (3) Katoda stainless steel, (4) Elektrik motor dengan kapasitas total 100 L

Sumber: Mukimin et al. (2015)

Gambar 3.8 Skema Reaktor Elektrokatalitik

Perubahan visual warna makin besar dari setiap penambahan waktu elektrolisis. Penurunan absorbansi yang lebih cepat terjadi di panjang gelombang tampak dari pada panjang gelombang UV (Gambar 3.9). Pada daerah tampak penurunan dapat mencapai persentase yang besar walaupun proses elektrolisis baru berlangsung 2 jam. Penurunan yang lebih lambat di daerah UV menunjukkan bahwa pemutusan ikatan oleh reagen oksidator yang dihasilkan oleh reaktor kurang cukup kuat. Hal ini dikarenakan pada panjang gelombang tersebut jenis ikatan di struktur molekul polutan mempunyai energi besar seperti ikatan pi (π) dan sigma (σ) sehingga sulit diputus (Mukimin et al., 2015). Walaupun demikian degradasi di panjang gelombang tersebut tetap berlangsung.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Mukimin et al. (2015)

Gambar 3.9 Spektrum UV-Vis dari Polutan Air Limbah Selama Proses Elektrolisis sebagai Fungsi Waktu Tinggal

Data penguat indikasi keberlangsungan degradasi air limbah dibuktikan juga dari pengukuran kandungan kuantitatif. Nilai COD digunakan sebagai indikator penurunan kuantitatif dengan variasi waktu elektrolisis dan pH air limbah (Tabel 3.1). Efektifitas degradasi sangat dipengaruhi oleh waktu dan pH. Degradasi yang cenderung lebih besar pada pH asam dimungkinkan karena pelemahan donor elektron pada struktur warna oleh H^+ sehingga menginduksi elektron pasangan bebas dalam struktur warna (Mukimin et al., 2015).

Tabel 3.1 Hasil Analisis COD terhadap Air Limbah Sebelum dan Sesudah Degradasi sebagai Fungsi Waktu dan pH

Parameter analisis	pH	Waktu elektrolisis (jam)			
		0	2	4	6
COD (mg/L)	6	336	227	144	100
	9	336	450	219	149

Sumber: Mukimin et al. (2015)

Data penguat degradasi kuantitatif lebih lanjut dilakukan dengan mengukur kandungan polutan dari parameter analisis yang ditetapkan dalam baku mutu industri tekstil oleh pemerintah Indonesia sebagaimana Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Hasil Analisis Kandungan Air Limbah Awal Sebelum dan Setelah Dielektrolisis untuk Parameter Sesuai Peraturan

Parameter	Hasil Pengukuran Contoh					
	Awal	2 jam	4 jam	Awal	2 jam	4 jam
BOD (mg/L)	44,54	5,376	1,920	72,96	13,44	4,608
COD (mg/L)	470	223,5	142,2	577	301	196
TSS (mg/L)	416	110	38	116	90	42
NH ₃ (mg/L)	1,15	0,340	0,299	12,1	5,800	4,075
H ₂ S (mg/L)	0,757	<0,002	<0,002	0,273	0,195	0,050
Phenol (mg/L)	0,113	0,092	0,087	0,167	0,082	0,051
Minyak (mg/L)	1	< 0,05	<0,05	1	<0,05	<0,05
Krom (mg/L)	< 0,03	< 0,03	<0,03	< 0,03	<0,03	<0,03
pH	11,77	6,20	6,80	12	6,6	6,87
Suhu (°C)	40	37,5	37,5	40	37,5	38,5

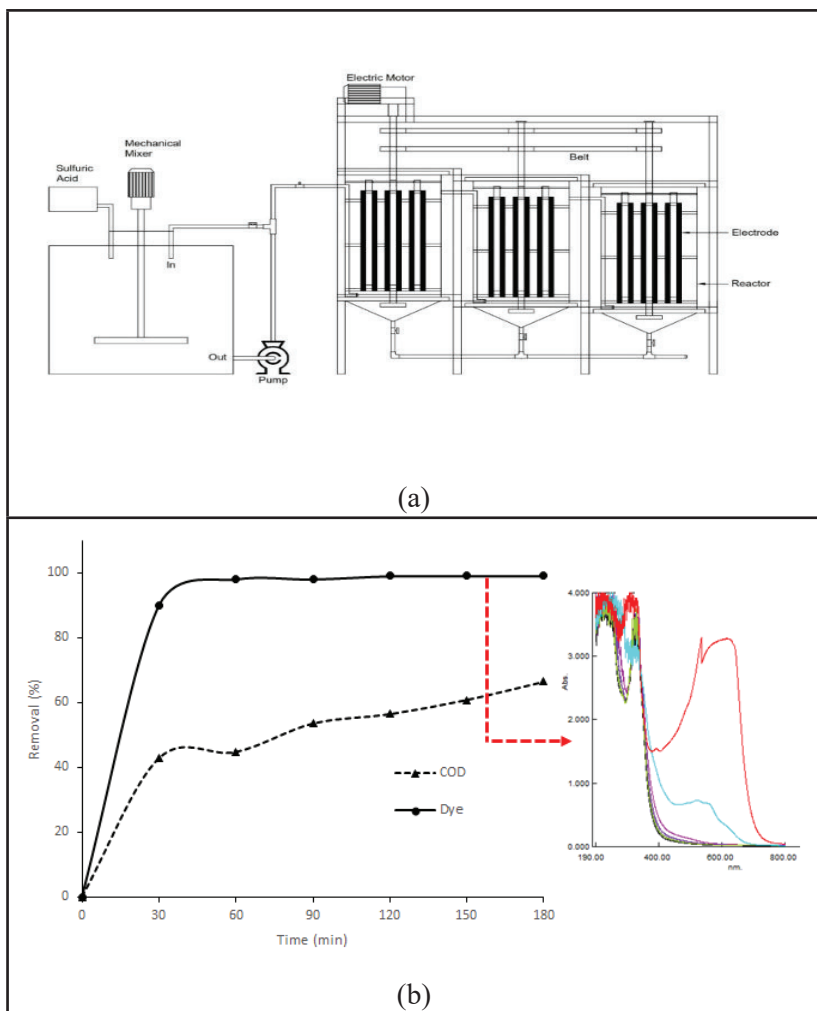
Sumber: Mukimin et al. (2015)

Semua parameter yang dianalisis terhadap air limbah sebelum dan setelah diolah menunjukkan perubahan kandungan kuantitatifnya. Hasil penting lain dari kinerja reaktor ini adalah produk samping dalam bentuk lumpur yang biasanya muncul dari unit pengolahan konvensional tidak dihasilkan selama proses degradasi (Mukimin et al., 2015).

Elektroda stabil Ti/RuIrO_2 telah diaplikasikan sebagai anoda dalam reaktor elektrokimia yang tersusun dalam 6 unit tabung ($1,2 \text{ m}^3$) sebagaimana Gambar 3.10a. Elektroda tersebut dipasangkan dengan katoda pipa stainless, berjarak 3 cm dalam posisi vertikal terhadap tabung reaktor. Rasio luas permukaan anoda terhadap volume reaktor sebesar $6,28 \text{ m}^2\text{m}^{-3}$. Reaktor kemudian diaplikasikan untuk mengolah air limbah batik *printing* yang berkarakter sangat berwarna dengan puncak serapan UV-Vis sebagaimana Gambar 3.10b (Mukimin et al., 2017).

Kinerja reaktor dalam proses degradasi air limbah terindikasi oleh perubahan visual warna selama proses berlangsung. Penurunan di spektrum puncak warna telah berjalan secara cepat dan mencapai garis dasar pada waktu 120 menit. Penurunan absorbansi ini mengindikasikan bawa tahap awal pengolahan telah berlangsung melalui oksidasi struktur molekul warna yang akan terus berlanjut hingga terbentuk senyawa organik sederhana. Oksidasi senyawa kompleks ini membentuk senyawa intermedia melalui pemutusan gugus fungsi kromofor menjadi asam karbositat alifatik dan karbon dioksida (Panizza & Cerisola, 2007).

Proses oksidasi air limbah secara elektrokimia juga dapat terukur melalui penurunan COD. Penurunan COD selama proses elektrolisis dimana reduksi COD terbesar sekitar 66.4 % pada waktu proses 180 menit. Menurut Mukimin et al. (2015) dan Mukimin et al. (2012) telah menjelaskan bahwa $\text{Cl}_2/\text{HClO}/\text{ClO}^-$ sebagai oksidator telah efektif mendegradasi zat warna organik (*dyes*) menjadi H_2O dan CO_2 . Oksidator ini dihasilkan oleh reaksi elektrokimia pada permukaan anoda dengan mekanisme sebagaimana persamaan 4-6.



Keterangan: dengan anoda Ti/RuIrO_2 (a) dan pola penurunan warna dan COD air limbah batik terhadap waktu proses (b)

Sumber: Mukimin et al. (2017)

Gambar 3.10 Desain Reaktor Elektrokimia

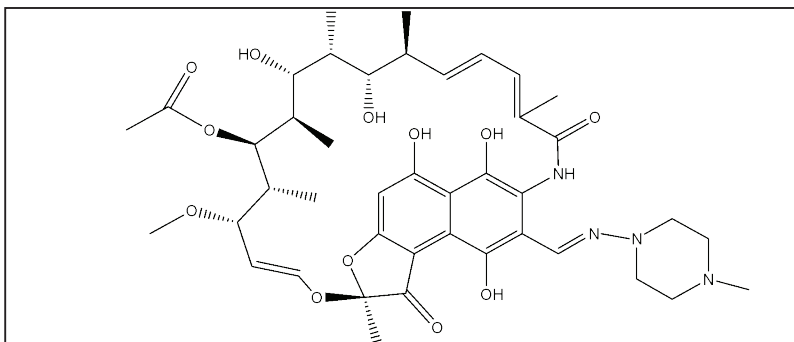


Sementara itu, menurut Bezerra Rocha et al. (2012) menjelaskan bahwa oksidasi senyawa organik berlangsung melalui pembentukan radikal hidroksi ($\cdot\text{OH}$). Mekanisme oksidasi ini sebagaimana persamaan reaksi berikut:



Radikal hidroksi ($\cdot\text{OH}$) yang terbentuk sebagaimana persamaan 7 mudah mengoksidasi zat warna organik menjadi senyawa sederhana (CO_2 dan H_2O) sebagaimana persamaan 9.

Elektroda stabil Ti/PtIr berpasangan dengan silinder kain karbon telah diaplikasikan untuk mengolah polutan jenis antibiotik (Mukimin et al., 2019). Air limbah farmasi banyak mengandung senyawa antibiotik, seperti rifampicin, clindamycin dan beberapa senyawa lain yang termasuk dalam kategori antibiotik (Zhao et al., 2019). Senyawa ini mempunyai berat molekul yang besar (800–1000 g/mol) dengan struktur yang kompleks karena tersusun dari rantai lurus dan aromatik. Rifampicin merupakan salah satu jenis antibiotik yang banyak diproduksi oleh industri di Indonesia karena banyak digunakan oleh masyarakat luas. Antibiotik ini mempunyai berat molekul 822,9 g/mol dengan rumus molekul $\text{C}_{43}\text{H}_{58}\text{N}_4\text{O}_{12}$ (Gambar 3.11).



Sumber: Campbell et al. (2001) dalam Mukimin et al. (2020)

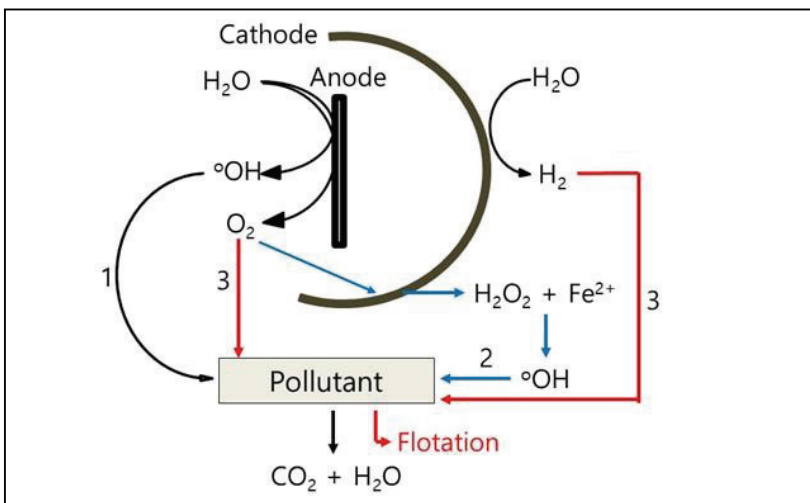
Gambar 3.11 Struktur Antibiotik Rifampicin

Antibiotik rifampicin dengan struktur yang kompleks itu mampu didegradasi oleh sel elektrokimia menggunakan elektroda stabil (Mukimin et al., 2020). Performa degradasi rifampicin telah diinvestigasi melalui analisis COD, spektra UV-VIS dan metode kromatografi model LC-QTOP. Penambahan Fe_2SO_4 dan pengaturan pH asam telah meningkatkan kinerja penurunan COD. Pada kondisi ini dimungkinkan berlangsung tiga mekanisme penurunan COD, yaitu oksidasi lanjut elektrokimia (EAOP), Fenton elektrokimia (EFRP) dan flotasi elektrokimia (EFP). Mekanisme degradasi polutan ini jika dibuat dalam skema proses maka sebagaimana Gambar 3.12.

Penghilangan COD mengalami penurunan bila penambahan bahan hanya terdiri dari dua jenis (garam dan H_2SO_4) atau satu jenis (H_2SO_4 atau garam). Pola penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya produksi OH radikal yang berasal dari mekanisme EFRP. Mousset et al. (2019) menyebutkan bahwa mekanisme oksidasi melalui Fenton elektrokimia sangat efektif dalam mendegradasi polutan karena terbentuk di fasa ruah/air. Kontribusi degradasi dengan mekanisme EFRP makin dominan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pada konsentrasi polutan rendah, sebaliknya pada konsentrasi tinggi maka mekanisme EAOP akan lebih besar. Nilai COD tersisa yang masih tinggi (567 mg/L) pada kondisi operasi yang hanya menambahkan garam disebabkan oleh mekanisme degradasi yang bersumber dari EAOP, sementara EFP cenderung kecil dan EFRP tidak terbentuk. Penghilangan COD melalui EAOP hanya efektif pada konsentrasi tinggi.



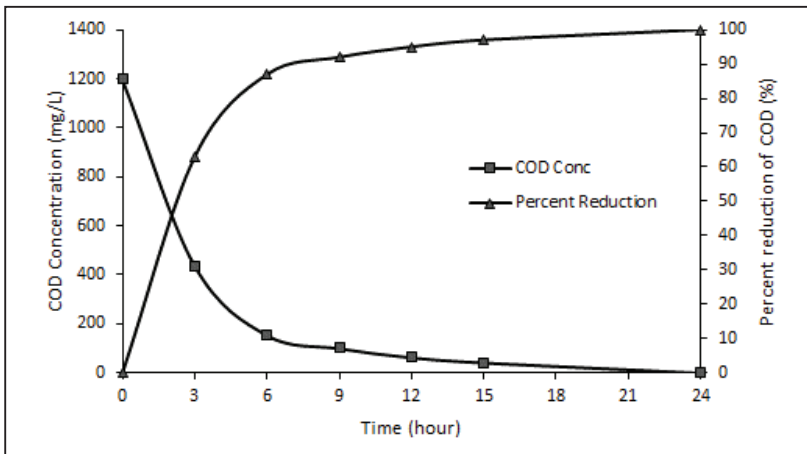
Keterangan: (1) EAOP, (2) EFRP dan (3) EFP

Sumber: Mukimin et al. (2020)

Gambar 3.12 Skema Degradasi Polutan Antibiotik Melalui Tiga Mekanisme

Pada fase awal (sampai 6 jam) tingkat penurunan COD sangat besar (Gambar 3.13). Penurunan yang tinggi ini dimungkinkan oleh multi proses yang berlangsung, baik secara fisika maupun kimia. Proses fisika diwakili oleh pembentukan gas hidrogen dan oksigen di elektroda (anoda-katoda) yang membentuk flotasi

dengan membawa polutan tersuspensi ke permukaan fasa liquid. Proses kimia berlangsung melalui reaksi oksidasi-reduksi, baik langsung maupun tidak langsung berupa pembentukan oksidator seperti hidroksi radikal ($\cdot\text{OH}$), ClO^- , HClO dan Cl_2 . Penambahan Fe(II) menjadikan pembentukan oksidator OH radikal lebih besar (Mousset et al., 2019; Mukimin & Vistanty, 2019). Pembentukan oksidator kuat ($\cdot\text{OH}$) tidak hanya di permukaan anoda, tetapi juga di fasa liquid sehingga kinerja degradasi polutan makin besar.

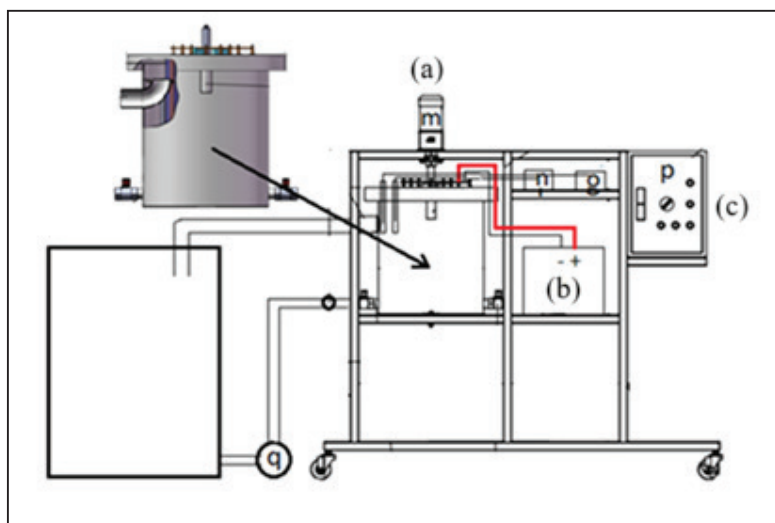


Keterangan: Mukimin et al. (2020)

Gambar 3.13 Trend Penurunan COD Air Limbah Antibiotik Rifampicin oleh Reaktor HAOP

Elektroda stabil Ti/RuO_2 telah diterapkan dalam reaktor elektrokimia berbentuk tabung dengan kapasitas 50 L. Elektroda tersebut berbentuk jaring silinder dengan panjang 40 cm dan berdiameter 5 cm yang dipasangkan dengan batang karbon. Operasional reaktor ini dilengkapi dengan unit umpan air limbah,

pompa, *reticfier*, pengaduk, pH meter, dan *ion selective meter* (amoniak) sebagaimana Gambar 3.14 (Mukimin et al., 2023). Reaktor telah berhasil untuk mengolah air limbah tekstil terpadu setelah melewati proses anaerob-aerob. Pada pengolahan sistem sirkulasi diperoleh pola penurunan konsentrasi warna dan COD terhadap volume air limbah terolah sebagaimana Gambar 3.15. Meskipun kenaikan volume air limbah akan menurunkan persen penurunan warna, tetapi koefisien gradiennya sangat kecil sehingga akan menguntungkan jika ditinjau dari volume limbah terolah.

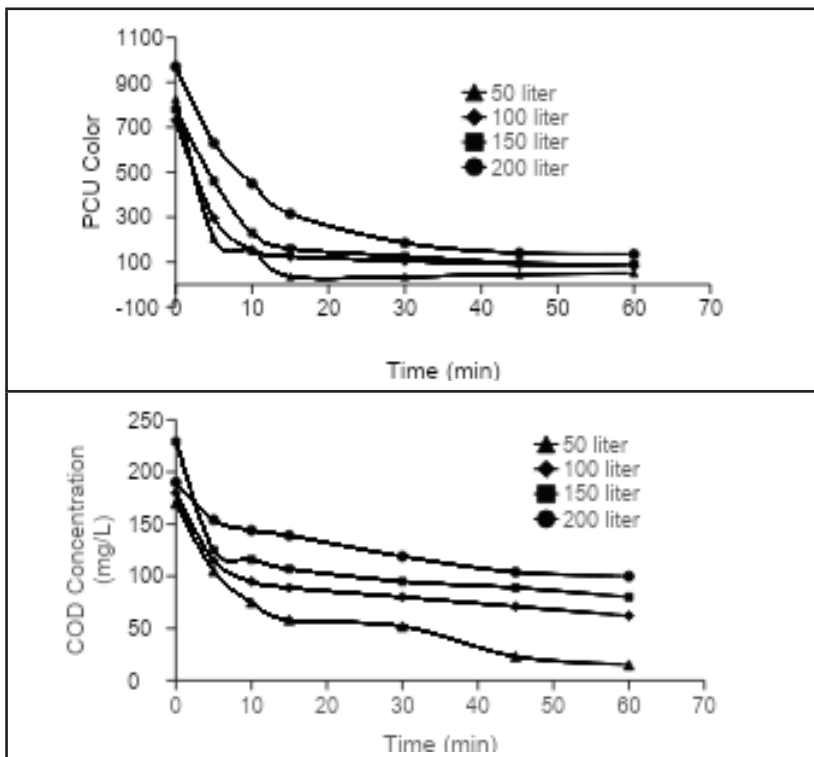


Keterangan: dilengkapi motor pengaduk (a), *reticfier* (b) dan panel kontrol (c)

Sumber: Mukimin, et al. (2023)

Gambar 3.14 Reaktor Hibrid Fenton Elektrokimia (HFE) Kapasitas 50 L dengan 12 Pasangan Elektroda (Jaring Silinder Ti/RuIrO₂-Batang Grafit)

Penurunan konsentrasi warna yang besar pada sistem sirkulasi disebabkan oleh waktu proses yang akan lebih lama dibanding sistem *batch*. Sementara itu, waktu reaksi sangat berpengaruh besar terhadap hasil pengolahan/reaksi (Gamarra-Güere et al., 2022; Ismail et al., 2021; Okur et al., 2022). Hal yang sama juga pada penurunan COD terhadap volume air limbah terolah. Untuk volume air limbah 150 liter atau 3 kali dari volume reaktor masih dapat menurunkan COD sebesar 65%.



Sumber: Mukimin et al. (2024)

Gambar 3.15 Trend Penurunan Warna dan COD terhadap Waktu Proses dengan Pengoperasian Sistem Sirkulasi pada Tegangan 6 Volt, Kandungan Garam 4 g/L, Konsentrasi Ferro 30 mg/L, pH 4, dan Kecepatan Pengaduk 90 rpm

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Biaya operasional suatu teknologi menjadi aspek yang sangat dipertimbangkan di wilayah aplikasi. Teknologi elektrokimia dengan fitur reaktor sebagaimana Gambar 3.14 mempunyai biaya operasional listrik sebagaimana Tabel 3.3. Tiga peralatan sebagai pengkonsumsi listrik meliputi *reticfier*, pompa, dan pengaduk.

Table 3.3 Pemakaian Listrik Selama Proses Elektrolisis Berdasar Tegangan Terpakai dan Komponen Terpasang

Komponen	Arus (A)	Voltase (V)	Power (watt)	Energy (kwh)			
				15 min	30 min	45 min	60 min
<i>Reticfier</i>	5	39	195	0,049	0,098	0,146	0,195
	6	65	390	0,097	0,195	0,293	0,390
	7	75	525	0,131	0,262	0,394	0,525
Pompa	1,3	220	286	0,071	0,143	0,215	0,286
Pengaduk	0,56	220	123	0,031	0,062	0,092	0,123

Sumber: Mukimin et al. (2024)

Berdasarkan data COD sebagai parameter penentu terhadap pemenuhan baku mutu maka besarnya konsumsi listrik terhitung 3 kwh/m³ air limbah. Biaya Konsumsi listrik lebih kecil akan diperoleh jika reaktor dijalankan dengan sistem sirkulasi, yaitu 1,1 kwh/m³ air limbah (Mukimin et al., 2024).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

IV. TANTANGAN DAN PELUANG TEKNOLOGI ELEKTROKIMIA

Inovasi pengolahan air limbah berbasis elektrokimia cenderung terus meningkat. Sintesis material elektroda tetap menjadi fokus pengembangan disamping konfigurasi sel penyusun teknologi. Material berbasis oksida logam menjadi varian yang terus dikembangkan melalui teknis doping, rekayasa struktur, dan formula campuran. Biomassa karbon menjadi material elektroda lain yang terus dimodifikasi karena ketersediaan di alam dan fleksibilitas fabrikasi di tingkat mikro atau makromolekuler. Teknologi lingkungan yang menggunakan metode elektrokimia potensial untuk menurunkan pencemaran yang bersumber dari berbagai polutan termasuk yang saat ini sulit diatasi, seperti zat warna dan antibiotik (Mukimin et al., 2020). Kebijakan pemerintah yang menetapkan parameter dan kualitas baku mutu air limbah industri yang terus bertambah dan makin ketat menjadi tantangan dan peluang bagi penerapan teknologi pengolahan berbasis elektrokimia. Teknologi dengan kemampuan penurunan polutan yang makin efektif dan efisien menjadi harapan bagi pelaku industri dan semua pihak terkait guna mewujudkan kelestarian lingkungan yang berkelanjutan.

A. Tantangan Teknologi Elektrokimia dalam Menjawab Kebijakan Pemerintah

Pemerintah Indonesia telah menetapkan perlindungan lingkungan oleh kegiatan industri melalui peraturan-peraturannya. Kebijakan pemerintah ini telah tertuang dalam Undang-Undang No. 4 Tahun 1982 tentang “Ketentuan-ketentuan Pokok Pengelolaan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Lingkungan” yang kemudian disempurnakan menjadi UU No. 23 Tahun 1997 tentang “Pengelolaan Lingkungan Hidup” dan disempurnakan kembali menjadi UU No. 23 Tahun 2009 tentang “Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup”. Undang-undang ini telah diturunkan dalam peraturan pemerintah yang salah satunya berupa standar kualitas air limbah industri yang diizinkan dibuang ke lingkungan. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014 tentang “Baku Mutu Air Limbah” telah menetapkan standar baku mutu air limbah industri yang masih berlaku walau telah diterbitkan PP No. 22 Tahun 2021 tentang “Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup”. Keseriusan pemerintah dalam meningkatkan perlindungan lingkungan khususnya dari akibat kegiatan industri tekstil maka Permen LH tersebut dilakukan revisi menjadi Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan P.16 Tahun 2019 tentang “Perubahan Kedua atas Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah” (Mukimin et al., 2024). Perubahan ini menetapkan penambahan parameter warna dan syarat COD yang lebih rendah. Syarat maksimal untuk parameter warna sebesar 200 PtCo, sedangkan untuk parameter COD tidak boleh lebih dari 150 mg/L untuk debit $\leq 100 \text{ m}^3/\text{hari}$, 125 mg/L untuk debit buangan 100-1000 m^3/hari dan 115 mg/L untuk debit $> 1000 \text{ m}^3/\text{hari}$.

Peraturan-peraturan ini semua menyangkut tentang upaya pengelolaan lingkungan yang salah satunya dengan pengolahan polutan sehingga tidak menimbulkan pencemaran lingkungan perairan. Beban pencemaran ditetapkan melalui pengukuran indikator lingkungan, seperti COD yang merepresentasikan kandungan polutan organik. Zat warna dan antibiotik merupakan dua contoh sumber COD yang hingga saat ini sulit diolah

sehingga masih menjadi titik lemah teknologi terpasang di industri (Mukimin et al., 2024).

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagai perwakilan pemerintah telah aktif memprakarsai rancangan peraturan tentang baku mutu air limbah industri dan standar teknologi pengolahan. Pemilihan standar teknologi ditentukan berdasarkan pada kinerja pengolahan dan ketersediaan. Sementara itu, teknologi pengolahan air limbah industri berbasis elektrokimia menunjukkan kemampuan yang menjanjikan dalam mengolah polutan zat warna dan antibiotik (Mukimin et al., 2020). Kemampuan kinerja teknologi elektrokimia ini bisa menjadi acuan dalam rancangan peraturan tentang standar teknologi pengolahan zat warna dan antibiotik.

Material elektroda baik yang bersifat tak stabil maupun stabil menjadi unsur penting keberhasilan teknologi elektrokimia (Ghalwa & Abdel-Latif, 2005; Mukimin, 2024). Walaupun karakter dan peran kerja elektroda telah didalami seiring dengan jejak riset yang dilakukan, faktor elektroda tetap menjadi tantangan khususnya dalam skala aplikasi. Selain itu, konfigurasi sel, model reaktor, dan sistem operasi masih diperlukan pengembangan sehingga adaptif terhadap permasalahan riil industri. Kondisi operasi yang meliputi dosis elektrolit, tegangan listrik, waktu reaksi, dan pH senantiasa diperlukan sinkronisasi dengan karakter air limbah. Penambahan katalis homogen yang mendorong terbentuknya spesies reaktif terbukti berperan signifikan dalam efisiensi degradasi polutan dan menjadi tantangan pada penerapan.

B. Peluang Teknologi Elektrokimia dalam Pengolahan Air Limbah Industri di Indonesia

Zat warna menjadi bahan utama proses produksi untuk beberapa industri, seperti tekstil, farmasi, dan makanan-minuman (Yanti et al., 2024). Khusus industri tekstil penyumbang air limbah zat warna berasal dari sektor *midstream* dengan proses *dyeing*, *printing* dan *finishing* yang jumlahnya sekitar 1.540 (industri besar dan sedang/IBS) dan 130.000 (industri mikro dan kecil/IMK). Sementara itu, Kementerian Kesehatan (2021) menyampaikan jumlah industri pembuatan obat-obatan sebanyak 241, industri bahan baku obat-obatan 17, industri obat-obatan tradisional 132, dan industri ekstrak produk alami 18. Jumlah industri makanan dan minuman di Indonesia sangatlah banyak dan terus mengalami pertumbuhan sebesar 4,47 % di tahun 2023.

Dua puluh persen zat warna yang digunakan dalam proses produksi akan terlepas ke dalam air limbah (Mukimin et al., 2012). Saat ini mayoritas industri di Indonesia dalam mengatasi polutan zat warna dengan menggunakan *decolouring agent* (DCA) sebagai penyempurna kinerja IPAL dengan sistem fisika-kimia-biologi. Pilihan ini memiliki beberapa kelemahan, meliputi harga DCA yang sangat mahal, tidak tersedia di dalam negeri, dan menimbulkan produk samping berupa lumpur. Hasil observasi di industri DAS Citarum diperoleh data biaya konsumsi DCA sebesar Rp10.000 s/d Rp22.000/m³ air limbah. Volume impor DCA Indonesia pada tahun 2019 mencapai 24 ton/bulan. Indonesia termasuk negara pengimpor DCA terbesar dunia dengan total *shipment* 593 di tahun 2021. Lumpur hasil pengolahan dengan DCA termasuk dalam kategori bahan berbahaya dan beracun (B3) sebagaimana termuat dalam PP 22 tahun 2021. Sifat berbahaya lumpur tersebut mewajibkan pengelolaanya harus mengikuti peraturan yang tidak mudah

Buku ini tidak diperjualbelikan.

atau diserahkan ke pihak yang berijin sehingga menambah biaya pengolahan dan pengelolaan.

Teknologi elektrokimia dengan elektroda stabil yang telah diteliti sejak tahun 2009 menunjukkan kinerja prospektif dalam mengolah zat warna dan senyawa antibiotik. Teknologi ini mampu menurunkan konsentrasi warna dan COD secara cepat untuk limbah sintesis *Remazol Brilliant Blue R19* (Mukimin *et al.*, 2012). Pada air limbah tekstil *dyeing* efisiensi penurunan warna yang besar walau dengan waktu proses yang lebih lama (Mukimin *et al.*, 2015). Efisiensi penurunan warna dan COD juga tinggi untuk limbah batik *printing* (Mukimin *et al.*, 2017). Efisiensi penurunan COD juga tinggi untuk air limbah antibiotik (Mukimin *et al.*, 2020). Penurunan konsentrasi warna juga sangat cepat untuk air limbah tekstil setelah proses anaerob-aerob (Mukimin *et al.*, 2024).

V. KESIMPULAN

Ketersediaan teknologi pengolahan air limbah industri yang efektif menjadi faktor penting dalam upaya pentaatan peraturan yang berlaku dan pencegahan pencemaran lingkungan perairan. Pengolahan dengan metode fisika, kimia dan biologi telah berhasil menurunkan pencemaran, namun masih menjadi beban bagi industri karena berkarakter boros bahan kimia, waktu proses lama, lahan yang luas dan masih menghasilkan produk samping berupa lumpur yang membutuhkan penanganan lebih lanjut sehingga menurunkan daya kompetitif perusahaan dan menjadi kendala keberlanjutan.

Teknologi baru yang efisien sumber daya, ramah lingkungan, dan biaya operasi rendah merupakan solusi teknis yang ditunggu industri. Teknologi elektrokimia dengan karakter tersebut telah diteliti dan diaplikasikan sebagai pilihan yang dapat diberikan. Teknologi ini digerakkan oleh energi listrik untuk menjalankan reaksi elektroda dan mampu mengolah berbagai polutan hingga yang bersifat persisten seperti zat warna dan antibiotik.

Teknologi elektrokimia dengan jenis elektroda terlisir sangat efektif menggantikan metode kimia koagulasi. Penurunan polutan yang sangat signifikan untuk air limbah industri berbasis logam dan industri pelapisan perhiasan menjadi bukti yang menjanjikan. Model reaktor yang memadukan proses elektrokoagulasi dengan flotasi mampu melangsungkan destabilisasi polutan tersuspensi dan pemisahannya dalam satu unit. Tegangan listrik DC elektroda dan waktu proses elektrolisis merupakan parameter kunci operasi yang akan menentukan keberhasilan pengolahan. Volume produk samping (lumpur) yang lebih sedikit merupakan

keunggulan lain teknologi elektrokimia dibanding metode kimia koagulasi. Aplikasi teknologi elektrokoagulasi dapat berdiri sendiri maupun terintegrasi dengan teknologi lain sehingga dapat mencapai kualitas yang diinginkan untuk air limbah dengan karakter lebih kompleks.

Teknologi elektrokimia dengan jenis elektroda stabil sangat efektif menurunkan konsentrasi polutan organik terlarut, seperti zat warna sintesis *Remazol Brilliant Blue R 19*, air limbah industri tekstil, air limbah batik *printing*, dan air limbah farmasi (antibiotik). Teknologi elektrokimia ini juga potensial menggantikan metode DCA sebagai unit pengolah akhir setelah proses anaerobik-aerobik di IPAL industri tekstil. Elektroda stabil sebagai komponen inti teknologi elektrokimia dapat dibuat dari Ti/PbO_2 , Ti/RuO_2 , Ti/PtIr , Ti/RuIrO_2 , dan karbon grafit dengan bentuk silinder, plat atau batang. Kualitas hasil pengolahan mampu memenuhi baku mutu air limbah industri tekstil, batik dan farmasi. Reaktor model tabung dengan konfigurasi anoda silinder dan dioperasikan dengan sistem sirkulasi merupakan desain dan cara kerja yang akan meningkatkan hasil pengolahan.

VI. PENUTUP

Teknologi elektrokimia dapat mengolah polutan air limbah industri secara efisien. Model reaktor elektrokoagulasi-flotasi dapat diterapkan untuk pengolahan air limbah industri berbasis logam dan elektroplating perhiasan. Teknologi elektrokimia oksidasi lanjut dapat dibuat dari elektroda stabil Ti/PbO_2 , Ti/RuO_2 , Ti/PtIr , Ti/RuIrO_2 , dan grafit dengan model reaktor tabung. Elektroda stabil ini dapat diterapkan untuk mengolah zat warna *Remazol Brilliant Blue R 19*, air limbah industri tekstil, air limbah IKM batik, dan polutan antibiotik di air limbah industri farmasi.

Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan sebagai pihak pembina dan pengawas industri dapat menyarankan teknologi elektrokimia untuk pengolahan air limbah. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang memuat baku mutu dan standar teknologi pengolahan air limbah industri dapat disusun berdasarkan pertimbangan kinerja teknologi elektrokimia. Sementara itu, industri yang masih terkendala dalam pengolahan air limbahnya dapat menggunakan teknologi elektrokimia. khususnya yang berbahan baku zat warna atau antibiotik

Buku ini tidak diperjualbelikan.

VII. UCAPAN TERIMAKASIH

Pada akhir naskah orasi pengukuhan Profesor Riset ini, izinkan saya mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada semua pihak yang telah membantu dan mendukung karier fungsional saya sebagai peneliti.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia, Bapak Prabowo Subianto dan Presiden Republik Indonesia ke-7 Ir. H. Joko Widodo atas amanat dan penugasan saya sebagai peneliti ahli utama di BRIN. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala BRIN, Dr. Laksana Tri Handoko atas penetapan saya sebagai peneliti ahli utama, kepada wakil kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, ST., M.Sc., DESD., IPU., ASEAN. Eng. Ucapan terima kasih dan penghargaan juga saya sampaikan kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN: Prof. Dr. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D., Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset BRIN: Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc. Tim penelaah naskah orasi: Prof. Dr. Nuril Hidayati TH., Prof. Dr. Ir. Wahyu Widiyono, M.Si., Prof. Dr. Ir. Purwanto, Dipl.EP., DEA. Yang telah memberikan saran dan masukan sehingga naskah orasi ini layak disampaikan pada sidang terbuka pengukuhan ini. Kepada Sekretaris Utama BRIN Nur Tri Aries Suestiningtyas, SIP., M.A., Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si. serta panitia pelaksana pengukuhan Profesor Riset. Pada kesempatan ini saya menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih atas bantuan yang diberikan sampai dengan pengukuhan saya sebagai Profesor Riset pada hari ini.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Pada kesempatan ini, saya juga mengucapkan terima kasih kepada Kepala Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan Dr. Andes Hamuraby Rozak, M.Sc., Kepala Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih Dr. Ario Betha Juanssilfero, M.Sc., pembimbing selama studi S-3 Prof. Dr. rer. Nat. Karna Wijaya, M.Eng., pembimbing studi S-2 Prof. Dr. Ir. Purwato, DipI.EP., DEA., dan pembimbing studi S-1 Dra. Arnely, M.S. Patner penelitian Hanny Vistanty, S.T., M.T. dan Nur Zen, S.T., M.T. Kelompok Riset Pengelolaan Limbah Industri Kecil Menengah, Ketua Majelis Tafsir Al Qur'an Al Ustadz Nur Kholid Saifullah, Lc, M.Hum., yang telah mengarahkan saya dalam petunjuk Allah.

Terima kasih saya ucapkan kepada kedua orang tua, almarhumah Ibu Jumi dan almarhum Bapak Sukir yang telah mendidik dan membesarkan saya dengan segala jerih payah yang dilalui. Kepada mertua, almarhumah Ludiyah dan almarhum Alfandi yang telah mendukung saya selama studi S-3. Terima kasih teruntuk istri saya Muyassaroh, S.T., S.Pd dan anak-anak saya Husain Abdunnaafi', Muhammad Nabil Maula dan Elka 'Ibadurrahman atas dukungan, bantuan dan motivasi selama ini dalam keadaan suka dan duka.

Akhir kata, terima kasih saya sampaikan kepada seluruh undangan yang hadir sehingga acara ini dapat terselenggara dengan baik dan mendengarkan orasi ini dengan penuh kesabaran sampai akhir. Dengan mengucapkan alhamdulillah, saya mengakhiri orasi ilmiah ini dan mohon maaf atas kekurangan dan kekilafan dalam menyampaikan orasi ilmiah ini *wabillahi taufiq wal hidaayah, wassalammualaikum warahmatullahi wa barakaatuh.*

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Mamun, M. R., Kader, S., Islam, M. S., & Khan, M. Z. H. (2019). Photocatalytic activity improvement and application of UV-TiO₂ photocatalysis in textile wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103248–103263. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103248>
- Al-Tohamy, R., Ali, S. S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y. A. G., Elsamahy, T., Jiao, H., Fu, Y., & Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160–113176. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Ambaye, T. G., & Hagos, K. (2020). Photocatalytic and biological oxidation treatment of real textile wastewater. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 5(3), 28–38. <https://doi.org/10.1007/s41204-020-00094-w>
- Ansari, H., Oladipo, A. A., & Gazi, M. (2023). Alginate-based porous polyHIPE for removal of single and multi-dye mixtures: Competitive isotherm and molecular docking studies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 246, 125736–125751. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125736>
- Arulmathi, P., Jeyaprabha, C., Sivasankar, P., & Rajkumar, V. (2019). Treatment of Textile Wastewater by Coagulation–Flocculation Process Using Gossypium herbaceum and Polyaniline Coagulants. *Clean - Soil, Air, Water*, 47(7), 1800464–1800473. <https://doi.org/10.1002/clen.201800464>

- Azanaw, A., Birlie, B., Teshome, B., & Jemberie, M. (2022). Textile effluent treatment methods and eco-friendly resolution of textile wastewater. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100230–100242. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2022.100230>
- Balasubramanyan, S. (2014). *Ozonation of Textile Dyeing Wastewater-A Review Hydrocavitation for textile dye degradation View project AOP for Textile wastewater treatment View project Ozonation of Textile Dyeing Wastewater-A Review. Researchgate 2014–15*, 46–50. <https://www.researchgate.net/publication/281776011>
- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical methods: fundamentals and applications* (D. Harris, Ed.; second). John Wiley & Sons, Inc.
- Bezerra Rocha, J. H., Barbosa Ferreira, M., Suely Fernandes, N., & Martínez-Huitle, C. A. (2012). Electrochemical Decolourization Process of Textile Dye in the Presence of NaCl at BDD and Ti/Pt Electrode. *ECS Transactions*, 43(1), 127–134. <https://doi.org/10.1149/1.4704949>
- Bilińska, L., & Gmurek, M. (2021). Novel trends in AOPs for textile wastewater treatment. Enhanced dye by-products removal by catalytic and synergistic actions. *Water Resources and Industry* 26, 100160-100185. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100160>
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., & Damiani, S. (2019). Treatments for color removal from wastewater: State of the art. *Journal of Environmental Management*, 236, 727–745. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.094>
- Djayanti, S., Rame, **Mukimin, A.**, Nilawati, & Pratista, D. R. (2023). Quick sterilization of Spirulina powder through dry ozonization for pharmaceutical preparations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 1–5. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012090>

- Dutta, D., Arya, S., & Kumar, S. (2021). Industrial wastewater treatment: Current trends, bottlenecks, and best practices. *Chemosphere*, 285, 131245-131258. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131245>
- Gamarra-Güere, C. D., Dionisio, D., Santos, G. O. S., Vasconcelos Lanza, M. R., & de Jesus Motheo, A. (2022). Application of Fenton, photo-Fenton and electro-Fenton processes for the methylparaben degradation: A comparative study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1). 106992-1107003. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106992>
- Ghalwa, N. M. A., & Abdel-Latif, M. S. (2005). Iranian Chemical Society Electrochemical Degradation of Acid Green Dye in Aqueous Wastewater Dyestuff Solutions Using a Lead Oxide Coated Titanium Electrode. In *Journal of the Iranian Chemical Society* 2(3), 238-243. <https://link.springer.com./article/10.1007/BF03245928>
- GilPavas, E., Dobrosz-Gómez, I., & Gómez-García, M. Á. (2017). Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. *Journal of Environmental Management*, 191, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.015>
- Gmurek, M., Gomes, J. F., Martins, R. C., & Quinta-Ferreira, R. M. (2019). Comparison of radical-driven technologies applied for paraben mixture degradation: mechanism, biodegradability, toxicity and cost assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(36), 37174–37192. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06703-9>
- Harihastuti, N., Moenir, M., Juliasari, I. R., Marlana, B., & **Mukimin, A.** (2016). Prototipe Alat Produksi Biogas dari Limbah Industri CPO sebagai Sumber Energi Terbarukan Melalui Modifikasi Reaktor Model FDHRAR (Fixed Dome High Rate Anaerobic Reactor). *Workshop Hasil Litbang Unggulan Kementerian Perindustrian*, 74–84.

- Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59(3), 355–367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.023>
- Ismail, S. A., Ang, W. L., & Mohammad, A. W. (2021). Electro-Fenton technology for wastewater treatment: A bibliometric analysis of current research trends, future perspectives and energy consumption analysis. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101952–101974. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.101952>
- Juliasari, I. R., Moenir, M., & **Mukimin, A.** (2016). Peningkatan Produksi Biogas dari Limbah Kelapa Sawit sebagai Energi Terbarukan melalui Modifikasi Reaktor Anaerob. *Ketahanan Energi Dan Peningkatan Kualitas Lingkungan*, 1006–1015.
- Karam, A., Bakhroum, E. S., & Zaher, K. (2021). Coagulation/flocculation process for textile mill effluent treatment: experimental and numerical perspectives. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(5), 983–995. <https://doi.org/10.1080/19397038.2020.1842547>
- Khan, F., Waddadar, M., & Ahmed, T. (2020). Textile wastewater treatment by anaerobic sludge blanket reactor. *Bangladesh Journal of Scientific and Industrial Research*, 55(3), 165–172. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v55i3.49389>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G. D., Saratale, R. G., Ferreira, L. F. R., Bilal, M., Chandra, R., & Bharagava, R. N. (2021). Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 105012–105029. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Lofrano, G., & Brown, J. (2010). Wastewater management through the ages: A history of mankind. In *Science of the Total Environment* 408(22), 5254–5264. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.062>

- Magureanu, M., Piroi, D., Mandache, N. B., David, V., Medvedovici, A., Bradu, C., & Parvulescu, V.I. (2011). Degradation of antibiotics in water by non-thermal plasma treatment. *Water Research*, 45(11), 3407–3416. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.057>
- Malik, R. A., Vistanty, H., & Suhardi, S. H. (2022). Performance of anaerobic co-digestion with honey processing wastewater as co-substrate for treating synthetic wastewater containing commercial anthraquinone dye Remazol blue RSP: Effect of C:N ratio and HRT. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101157-101169. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101157>
- Marlena, B., **Mukimin, A.**, & Susan, E. (2012). Dekolorisasi Pewarna Reaktif pada Air Limbah Industri Tekstil secara Elektrokimia. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 2(2), 98–105.
- Moertinah, S., **Mukimin, A.**, & Saifuddin. (2009). Pengelolaan dan Teknologi Pengolahan Air Limbah Industri Kecil Menengah Tenun Pewarnaan dengan Proses Biologis Up Anaerobic Filter-Aerobik. *Kimia Bervisi SETS: Science, Environment, Technology and Society*, 285–294.
- Mousset, E., Pechaud, Y., Oturan, N., & Oturan, M. A. (2019). Charge transfer/mass transport competition in advanced hybrid electrocatalytic wastewater treatment: Development of a new current efficiency relation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 240, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.08.055>
- Mudhoo, A., Ramasamy, D. L., Bhatnagar, A., Usman, M., & Sillanpää, M. (2020). An analysis of the versatility and effectiveness of composts for sequestering heavy metal ions, dyes and xenobiotics from soils and aqueous milieus. In *Ecotoxicology and Environmental Safety* 197, 110587-110614. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110587>

- Mukimin, A.** (2006). *The Wastewater Treatment of Metal Industry Using Electrocoagulation-Flotation Technology*. Universitas Diponegoro. eprint.undip.ac.id/15382/1/Aris_Mukimin.pdf
- Mukimin, A.** (2008). Prediksi Model Penurunan COD Fungsi Arus pada Pengolahan Air Limbah Industri dengan Teknologi Elektrokoagulasi-Flotasi. *Widyariset*, 11(1), 215–220.
- Mukimin, A.** (2020a). *Teknologi Elektrokatalitik. Dalam Simbolon, A.M., & Ristanto, E. (Ed.), ANDI Penerbit.*
- Mukimin, A.** (2020b). The Energy Production and Efficiency Treatment of ML-MFC Using High Organic Content Wastewater. *E3S Web of Conferences*, 202. 10005–10014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020210005>
- Mukimin, A.** (2024). *Teknologi Elektrokimia untuk Pengolahan Air dan Air Limbah Industri*. ANDI Penerbit.
- Mukimin, A., Djayanti, S., Setianingsih, N. I., & Ihsan, S.** (2022). Electrocatalytic Reaction as Efficient Removal Method for Ammonia Pollutant in Textile Wastewater. *Research Square-2022*, 1–15. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2244621/v1>
- Mukimin, A., Ihsan, S., & Whismanto, A.** (2023). *Sistem Pengolahan Polutan Amoniak Menggunakan Reaktor Elektro-Oksidasi Sirkulasi*. Patent P00202306891. Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
- Mukimin, A., Kurnia, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A.** (2009). Degradasi Warna pada Air Limbah Tekstil Pewarnaan dengan Teknologi Elektrokimia Guna Pemanfaatan Kembali sebagai Air Proses. *Bulletin Penelitian Dan Pengembangan Industri*, 3(1), 270–277.
- Mukimin, A., & Purwanto, A.** (2018). Removal Efficiency of Nitrite and Sulfide Pollutants by Electrochemical Process by Using Ti / RuIrO₂ Anode. *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(2), 286–293. <https://doi.org/10.22146/ijc.26609>

- Mukimin, A., Purwanto, A., Syahroni, C., Moenir, M., & Budiarto, A.** (2017). Integrasi teknologi koagulasi-flokulasi dengan filter silika-karbon aktif up flow sebagai unit pengolahan air limbah industri karpet. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 8(1), 13–22. <https://doi.org/doi.org/10.21771/jrtpi.2017.v8.no1.p13-22>
- Mukimin, A., & Vistanty, H.** (2016). Influence of physico-chemical treatment of coconut shell-based carbon electrode on the inceneration of antraquinone dye. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 8(3), 693–699.
- Mukimin, A., & Vistanty, H.** (2019). *Hybrid advanced oxidation process (HAOP) as an effective pharmaceutical wastewater treatment. E2S Web of Conferences* 125,3007-3011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201>
- Mukimin, A., & Vistanty, H.** (2023). Low carbon development based on microbial fuel cells as electrical generation and wastewater treatment unit. *Renewable Energy Focus*, 44, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2022.12.005>
- Mukimin, A., Vistanty, H., & Crisnaningtyas, F.** (2015). Physico-Chemical Treatment Enhancing electroactivity Properties of Coconut shell-Based Carbon Electrode. *International Journal of Applied Chemistry*, 11(5), 553–565.
- Mukimin, A., Vistanty, H., Harihastuti, N., Setianingsih, N. I., Djayanti, S., & Nilawati.** (2023). *Reaktor Tipe Hibrid Fenton-Elektrokimia sebagai Pengolahan Air Limbah pada Industri Tekstil*. Patent P00202308274. Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
- Mukimin, A., Vistanty, H., Harihastuti, N., Setianingsih, N. I., Djayanti, S., Nilawati, & Astuti, Y.** (2024). Hybrid Fenton-electrochemical reactor and system as post-treatment of textile wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 59, 105028–105040. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105028>

- Mukimin, A., Vistanty, H., Juliasari, I. R., Fatkhurrahman, J. A., & Budiarto, A. (2016).** Aplikasi Limbah Padat Batu Alam sebagai Substitusi Fine Agregat Paving Blok, Batako dan Bahan Baku Produksi Semen. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 7(1), 1–12. <https://doi.org/doi.org/10.21771/jrtpi.2016.v7.no1.p1-12>
- Mukimin, A., Vistanty, H., Marlana, B., & Budiarto, A. (2014).** Metode Elektrokimia sebagai Teknologi Alternatif Pengolahan Air Limbah yang Lebih Ramah Lingkungan. *Litbangyasa Untuk Mendukung Realisasi Industri Hijau*, 256–263.
- Mukimin, A., Vistanty, H., & Zen, N. (2015).** Oxidation of textile wastewater using cylinder Ti/ β -PbO₂ electrode in electrocatalytic tube reactor. *Chemical Engineering Journal*, 259, 430–437. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.08.020>
- Mukimin, A., Vistanty, H., & Zen, N. (2020).** Hybrid advanced oxidation process (HAOP) as highly efficient and powerful treatment for complete demineralization of antibiotics. *Separation and Purification Technology*, 241, 116728–116733. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116728>
- Mukimin, A., Vistanty, H., Zen, N., Purwanto, A., & Wicaksono, K. A. (2018).** Performance of bioequalization-electrocatalytic integrated method for pollutants removal of hand-drawn batik wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 21, 77–83. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.12.004>
- Mukimin, A., Wicaksono, K. A., Zen, N., Purwanto, A., & Vistanty, H. (2018).** Implementation of electrocatalytic reactor as oxidation unit for residual reagent wastewater of testing laboratory. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 9(2), 11–20. <https://doi.org/10.21771/jrtpi.2018.v9.no.2.p11-20>

- Mukimin, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A. (2010).** Electro-Degradation Of Reactive Blue Dyes Using Cylinder Modified Electrode: Ti/B-Pbo 2 As Dimensionally Stable Anode. *Indonesian Journal of Chemistry*, 10(3), 285-289. <https://jurnal.ugm.ac.id/ijc/article/view/21431/14136>.
- Mukimin, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A. (2011).** Synthesis and characterization of modified Ti/[alpha]-Pb[O.sub.2] nanoporous electrode as an active material on positive electrode. *International Journal of Applied Chemistry*, 7(3), 245–258.
- Mukimin, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A. (2012).** Oxidation of remazol brilliant blue r (RB.19) with in situ electro-generated active chlorine using Ti/PbO₂ electrode. *Separation and Purification Technology*, 95, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.04.015>
- Mukimin, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A. (2013).** Electrodeposition of PbO₂ on Ti substrate in alkaline solution: Influence of fluoride Ions Addition. *Asian Journal of Chemistry*, 25(7). 3961–3965.
- Mukimin, A., Wijaya, K., & Yuliasuti, R. (2012).** *Reaktor Tabung Elektrokatalitik dan Sistem Pengolahan Air Limbah Industri Pewarnaan Yang menggunakan reaktor Tersebut*. Patent IDP 000041503. Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
- Mukimin, A., Yuliasni, R., Zen, N., Wicaksono, K. A., Fatkhurahman, J. A., Vistanty, H., & Malik, R. A. (2019).** Synthesis of graphite porous electrode based on coconut shell as a potential cathode in bioelectrosynthesis cell. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(2), 413–421. <https://doi.org/10.22146/ijc.37550>
- Mukimin, A., Zen, N., Purwanto, A., Wicaksono, K. A., Vistanty, H., & Alfauzi, A. S. (2017).** Application of a full-scale electrocatalytic reactor as real batik printing wastewater treatment by indirect oxidation process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 5222–5232. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.09.053>

- Mukimin, A., Zen, N., & Vistanty, H.** (2019). *Teknologi Elektrokatalitik Hybrid Advanced Oxidation Process (HAOP) dan Sistem Pengolahan Air Limbah Farmasi dengan Teknologi tersebut*. Patent P00201902428. Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
- Mukimin, A., Zen, N., Vistanty, H., & Nilawati.** (2021). Removal of bromide from raw water in drinking industry by electrochemical method with horizontal rotating anode reactor. *Desalination and Water Treatment*, 223, 200–207. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27131>
- Nilawati, **Mukimin, A., & Djayanti, S.** (2023). The Effect of Geomembrane Plastic Usage on Microplastic and Heavy Metal Contamination in Salt Field. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 12054–12060. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1201/1/012054>
- Okur, M. C., Akyol, A., Nayir, T. Y., Kara, S., Ozturk, D., & Civas, A. (2022). Performance of Ti/RuO₂-IrO₂ electrodes and comparison with BDD electrodes in the treatment of textile wastewater by electro-oxidation process. *Chemical Engineering Research and Design*, 183, 398–410. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.05.016>
- Oladipo, A. A., & Mustafa, F. S. (2023). Bismuth-based nanostructured photocatalysts for the remediation of antibiotics and organic dyes. In *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 14, 291–321. <https://doi.org/10.3762/BJNANO.14.26>
- Panizza, M., & Cerisola, G. (2007). Electrocatalytic materials for the electrochemical oxidation of synthetic dyes. *Applied Catalysis B: Environmental*, 75(1–2), 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.04.001>
- Prasetyo, H., Norrdin, M. N. A. M., Othman, M. H. D., Jaafar, J., Yoshioka, T., Li, Z., & Rahman, M. A. (2022). Technologies for treating wastewater from textile industry: A review. *Materials Today: Proceedings*, 65, 3066–3072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.214>

- Pratiwi, N. I., **Mukimin, A.**, Zen, N., & Septarina, I. (2021). Integration of electrocoagulation, adsorption and wetland technology for jewelry industry wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 279, 119690–119698. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119690>
- Purwanto, P., & Huda, S. (2005). *Teknologi Industri Elektroplating*. Badan Penerbit Universitas Diponegoro. <https://www.researchgate.net/publication/362988571>
- Ramos, M. D. N., Santana, C. S., Velloso, C. C. V., Silva, A. H. M., Megalhaes, F., & Aguiar, A. (2021). A review on the treatment of textile industry effluent through Fenton process. *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 366–386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.029>
- Rashid, T., Sher, F., Hazafa, A., Hashmi, R. Q., Zafar, A., Rasheed, T., & Hussain, S. (2021). Design and feasibility study of novel paraboloid graphite based microbial fuel cell for bioelectrogenesis and pharmaceutical wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1). 104502–104507. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104502>
- Said, N. (2017). *Teknologi Pengolahan Air Limbah: Teori dan Aplikasi*. Erlangga.
- Samsami, S., Mohamadi, M., Sarrafzadeh, M. H., Rene, E. R., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- Setianingsih, N. I., Hadiyanto, Budihardjo, M. A., Yuliasni, R., Vistanty, H., **Mukimin, A.**, & Sudarno. (2024). Characteristics and performance of aerobic granular sludge technology in the treatment of real batik textile wastewater. *International Journal of Environmental Science and Technology* 22(5), 2917–2930. <https://doi.org/10.1007/s13762-024-05832-0>

- Sharma, M., Tyagi, V. V., Chopra, K., Kothari, R., Singh, H. M., & Pandey, A. K. (2023). Advancement in solar energy-based technologies for sustainable treatment of textile wastewater: Reuse, recovery and current perspectives. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104241–104261. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104241>
- Soenardi, S. H., & **Mukimin, A.** (2014). Pengembangan Metode Analisis Parameter Minyak dan Lemak pada Contoh Uji Air. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 5(1), 1–6. <https://doi.org/doi.op/10.21771/jrtppi.2014.v5.no1.p1-6>
- Teo, S. H., Ng, C. H., Islam, A., Abdulkareem-Alsultan, G., Joseph, C. G., Janaun, J., Taufiq-Yap, Y. H., Khandaker, S., Islam, G. J., Znad, H., & Awual, M. R. (2022). Sustainable toxic dyes removal with advanced materials for clean water production: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 332, 120039–120049. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130039>
- Vistanty, H., Awaludin Malik, R., & **Mukimin, A.** (2020). Performance of a Full-Scale Anaerobic Digestion on Bakery Wastewater Treatment : Effect of Modified Distribution System. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 11(1), 12–18. <https://doi.org/10.21771/jrtppi.2020.v11.no.1.p12-18>
- Vistanty, H., **Mukimin, A.**, & Handayani, N. I. (2015). Pengolahan Air Limbah Industri Karton Box dengan Metode Integrasi Upflow Anaerobic Sludge Bed Reactor (UASB) dan Elektrokoagulasi-flotasi. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 6(1), 1–8.
- Wang, J., & Wang, S. (2020). Reactive species in advanced oxidation processes: Formation, identification and reaction mechanism. In *Chemical Engineering Journal*, 401, 126158–126177. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126158>

- Yang, X., López-Grimau, V., Vilaseca, M., Crespi, M., Ribera-Pi, J., Calderer, M., & Martínez-Lladó, X. (2021). Reuse of textile wastewater treated by moving bed biofilm reactor coupled with membrane bioreactor. *Coloration Technology*, 137(5), 484–492. <https://doi.org/10.1111/cote.12543>
- Yanti, I. F., Wibawa, P. J., & **Mukimin, A.** (2024). Fabrication of Coconut Shell-Derived Graphitic Activated Carbon for Carbon-based Electrode Materials. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 27(9), 456–463. [https://doi.org/10.14710/jksa.27.9.456–463](https://doi.org/10.14710/jksa.27.9.456-463)
- Zhao, R., Zhang, X., Chen, F., Man, X., & Jiang, W. (2019). Study on electrochemical degradation of nicosulfuron by IrO₂-based DSA electrodes: Performance, kinetics, and degradation mechanism. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(3). 343–359. <https://doi.org/10.3390/ijerph16030343>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku Nasional

1. **Mukimin A**, Teknologi Elektrokimia untuk Pengolahan Air dan Air Limbah Industri, ANDI Penerbit; 2024. 1–160.
2. **Mukimin A**, Teknologi elektrokatalitik. Dalam Simbolon, AM editor. Sustainable Industry: Teknologi pencegahan pencemaran industri, ANDI Penerbit, 2021. 99–121.

Jurnal Internasional

3. Setianingsih, N.I., Hadiyanto, Budihardjo, M.A., Yuliasni, R., Vistanty, H., **Mukimin, A.**, & Sudarno, (2025). Characteristics and performance of aerobic granular sludge technology in the treatment of real batik textile wastewater, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22, 2917–2930
4. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., Harihastuti, N., Setianingsih, N.I., Djayanti, S., Nilawati, & Astuti, Y., (2024). Hybrid Fenton-electrochemical reactor and system as post-treatment of textile wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, 59, 105028
5. **Mukimin, A.** & Vistanty, H., (2023). Low carbon development based on microbial fuel cells as electrical generation and wastewater treatment unit, *Renewable Energy Focus*, 44, 132–138
6. Pratiwi, N.K., **Mukimin, A.**, Zen, N., & Septarina, I., (2021). Integration of electrocoagulation, adsorption and wetland technology for jewelry industry wastewater treatment, *Separation and Purification Technology*, 279, 119690

7. **Mukimin, A.,** Zen, N., Vistanty, H., & Nilawati, (2021). Removal of bromide from raw water in drinking industry by electrochemical method with horizontal rotating anode reactor. *Desalination And Water Treatment*, 223, 200–207
8. **Mukimin, A.,** Vistanty, H., & Zen, N., (2020). Hybrid advanced oxidation process (HAOP) as highly efficient and powerful treatment for complete demineralization of antibiotics, *Separation and Purification Technology*, 241, 116728
9. **Mukimin, A.,** Yuliasni, R., Zen, N., Wicaksono, K.A., Fatkhurahman, J.A., & Vistanty, H., (2019). Synthesis of Graphite Porous Electrode Based on Coconut Shell as a Potential Cathode in Bioelectrosynthesis Cell, *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(2), 413–421
10. **Mukimin, A.,** Vistanty, V., Zen, N., Purwanto, A., & Wicaksono, A.M., (2018). Performance of bioequalization-electrocatalytic integrated method for pollutants removal of hand-drawn batik wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, 21, 77–83
11. **Mukimin, A., & Purwanto, A.,** (2018). Removal Efficiency of Nitrite and Sulfide Pollutants by Electrochemical Process by Using Ti/RuIrO₂ Anode, *Indonesian Journal of Chemistry*, 18(2), 286–293
12. **Mukimin, A.,** Vistanty, H., Zen, N., Purwanto, A., Wicaksono, A.R., & Alfauzi, A.S., (2017). Application of a full-scale electrocatalytic reactor as real batik printing wastewater treatment by indirect oxidation process, *Journal of environmental chemical engineering*, 5 (5), 5222–5232.
13. **Mukimin, A., & Vistanty, H.,** (2016). Influence of physico-chemical treatment of coconut shell-based carbon electrode on the inceneration of antarquinone dye, *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*. 8(3), 693–699

14. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., & Cristaningtyas, F., (2015). Physico-chemical treatment enhancing electroactivity properties of coconut shell-based carbon electrode, *International Journal of Applied Chemistry*, 11(5), 553–565
15. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., & Zen, N., (2015). Oxidation of textile wastewater using cylinder Ti/ β -PbO₂ electrode in electrocatalytic tube reactor, *Chemical Engineering Journal*, 259, 430–437
16. **Mukimin, A.**, Wijaya, K., & Kuncaka, A., (2013). Synthesis and Characterization of Modified Ti/ α -PbO₂ Nanoporous Electrode as an Active Material on Positive Electrode, *Asian Journal of Chemistry*, 25(7), 3961
17. **Mukimin, A.**, Wijaya, K., & Kuncaka, A., (2012). Oxidation of remazol brilliant blue r (RB. 19) with in situ electro-generated active chlorine using Ti/PbO₂ electrode, *Separation and purification technology*, 95, 1–9
18. **Mukimin, A.**, Wijaya, K., & Kuncaka, A., (2011). Synthesis and characterization of modified Ti/ α -PbO₂ nanoporous electrode as an active material on positive electrode, *International Journal of Applied Chemistry*, 7(3), 245–258.
19. **Mukimin, A.**, Wijaya, K., & Kuncaka, A., (2010). Electro-degradation of reactive blue dyes using cylinder modified electrode: Ti/ β -PbO₂ as dimensionally stable anode, *Indonesian Journal of Chemistry*, 10(3), 285–289

Jurnal Nasional

20. Yanti, I.F., Wibawa, P.J., & **Mukimin, A.**, (2024). Fabrication of coconut shell-derived graphited activated carbon for carbon based materials, *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(9), 456–463.
21. **Mukimin, A.**, Zen, N., Vistanty, H., & Purwanto, A., (2020). High Electric Production by Membraneless Microbial Fuel Cell

- with Up Flow Operation using Acetate Wastewater, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri* 11(2), 19–27
22. Vistanty, H., Malik, R.A., & **Mukimin, A.**, (2020). Performance of a full-scale anaerobic digestion on bakery wastewater treatment: Effect of modified distribution system, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 11(1), 12–18
 23. **Mukimin, A.**, Wicaksono, K.A., Zen, N., Purwanto, A., & Vistanty, H., (2018). Implementation Of Electrocatalytic Reactor as Oxidation Unit for Residual Reagent Wastewater Of Testing Laboratory, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 9(2), 11–20
 24. **Mukimin, A.**, Purwanto, A., Syahrone, C., Moenir, M., & Budiarto, A., (2017). Integrasi teknologi koagulasi-flokulasi dengan filter silika-karbon aktif up flow sebagai unit pengolah air limbah industri karpet, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 8(1), 13–22
 25. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., Juliasari, I.R., Fatkhurrahman, J.A., & Budiarto, A., (2016). Aplikasi Limbah Padat Batu Alam sebagai Substitusi Fine Agregat Paving Blok, Batako dan Bahan Baku Produksi Semen, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 7(1), 1–12
 26. Vistanty, H., **Mukimin, A.**, & Handayani, N.I., (2015). Pengolahan air limbah industri karton box dengan metode integrasi upflow anaerobic sludge bed reactor (UASB) dan elektrokoagulasi-flotasi, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 6(1), 1–8
 27. Sunardi, S.H., & **Mukimin. A.**, (2014). Pengembangan metode analisis parameter minyak dan lemak pada contoh uji air, *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, 5(1), 1–6
 28. Marlana, B., **Mukimin, A.**, & Susan, E., (2012). Dekolorisasi pewarna reaktif pada air limbah industri tekstil secara elektrokimia,

Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri, 2(2), 98–104

29. **Mukimin, A.**, Kurnia, A., Wijaya, K., & Kuncaka, Agus., (2009). Degradasi Warna Pada Air Limbah Tekstil Pewarnaan Dengan Teknologi Elektrokimia Guna Pemanfaatan Kembali Sebagai Air Proses, *Bulletin Penelitian dan Pengembangan Industri*, 3(1), 270–277
30. **Mukimin, A.**, (2008). Prediksi Model Penurunan COD Fungsi Arus Pada Pengolahan Air Limbah Industri Dengan Teknologi Elektrokoagulasi-Flotasi, *Widyariset*, 11(1), 215–220

Prosiding Internasional

31. Nilawati, **Mukimin, A.**, & Djayanti, S., (2023). The Effect of Geomembrane Plastic Usage on Microplastic and Heavy Metal Contamination in Salt Field, Dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 012054
32. Djayanti, S., **Mukimin, A.**, & Pratista, D.R., (2023). Quick sterilization of Spirulina powder through dry ozonization for pharmaceutical preparations, Dalam *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1201(1), 012090
33. Malik, R.A., Vistanty, H., **Mukimin, A.**, & Zen, N., (2020). Rapid start-up of expanded granular sludge bed (EGSB) reactor using granulated anaerobic bacteria in pharmaceutical wastewater treatment: pilot scale, Dalam *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 980(1), 012078
34. **Mukimin, A.**, (2020). The Energy Production and Efficiency Treatment of ML-MFC Using High Organic Content Wastewater, Dalam *E3S Web of Conferences*, 202, 10006
35. **Mukimin, A.**, & Vistanty, H., (2019). Hybrid advanced oxidation process (HAOP) as an effective pharmaceutical wastewater treatment, Dalam *E3S Web of Conferences*, 125, 03007

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Prosiding Nasional

36. Juliasari, I.R., Moenir, M., & **Mukimin, A.**, (2016). Peningkatan produksi biogas dari limbah kelapa sawit sebagai energi terbarukan melalui modifikasi reaktor anaerobic, Dalam *Seminar Nasional Energi: Ketahanan Energi dan Peningkatan Kualitas Lingkungan*, ISBN 978-602-71169-3-1, 53–62
37. Narihastuti, N., Moenir, M., Juliasari, I.R., Marlana, B., & **Mukimin, A.**, (2016). Prototipe alat produksi biogas dari limbah industri CPO sebagai sumber energi terbarukan melalui modifikasi reaktor model FDHRAR (Fix Dome High Rate Anaerobic Reactor), Dalam *Workshop Hasil Linbang Unggulan Kementerian Perindustrian*, ISSN: 2303-2299-9-772303-229402, 62–74
38. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., Marlana, B., & Budiarto, A., (2014). Metode elektrokimia sebagai teknologi alternative pengolah air limbah yang lebih ramah lingkungan, Dalam *Seminar Nasional Teknologi Hijau I*, 1(1), 256–263
39. Moertinah, S., **Mukimin, A.**, & Saifuddin, (2009). Pengelolaan dan Teknologi Pengolahan Air Limbah Industri Kecil Menengah Tenun Pewarnaan dengan Proses Biologis Up Anaerobic Filter-Aerobik, Dalam *Seminar Nasional Kimia Bervisi SETS*, 1(1), 285–294

Paten

40. **Mukimin, A.**, Rochman, F.F., Ningsih, K., Nasuka, Yanti, I.F., (2025). *Reaktor Electro-Fenton untuk Pengolahan Air Limbah Batik* (No. Permohonan P00202503887). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
41. Wibawa, P.J., Yanti, I.F., **Mukimin, A.**, & Wahyudi, T., (2024). *Pembuatan Elektroda Komposit Grafit Karbon Aktif Tempurung Kelapa /Polianilin (CSGAC/PANIN) untuk Mendegradasi Zat*

Warna Tartrazine (No. Permohonan S00202408651). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.

42. Wibawa, P.J., Yanti, I.F., **Mukimin, A.**, & Wahyudi, T., (2024). *Pembuatan Komposit Grafit Karbon Aktif Tempurung Kelapa / Polianilin (CSGAC/PANIN) sebagai Bahan Dasar Elektroda Pendegradasi Zat Warna Tartrazine* (No. Permohonan S00202408650). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
43. Vistanty, H., Setianingsih, N.I., **Mukimin, A.**, Sumiyati, S., & Andarani, P., (2023), *Sistem Anaerobik Co-Digestion Untuk Pengolahan Air Limbah Farmasi Dan Air Limbah Madu Dengan Reaktor Expanded Granular Sludge Bed (EGSB) Tersirkulasi* (No. Permohonan P00202315019). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
44. **Mukimin, A.**, Wahyudi, T., Yanti, I.F., & Wibawa, P.J., (2023). *Elektroda Karbon Berbasis Arang Tempurung Kelapa sebagai Material Inti Reaktor Elektrolisis dan Proses Pembuatannya* (No. Permohonan P00202314368). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
45. Setianingsih, N.I., Yuliasni, R., Vistanty, H., **Mukimin, A.**, Hadiyanto, Budihardjo, M.A., & Sudarno, (2023). *Metode dan Alat Granulasi Lumpur Aktif untuk Pengolahan Organik serta Produk yang Dihasilkan* (No. Permohonan P00202311512). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
46. **Mukimin, A.**, Vistanty, H., Harihastuti, N., Setianingsih, N.I., Djayanti, S., & Nilawati, (2023). *Reaktor Tipe Hibrid Fenton-Elektrokimia sebagai Pengolah Air Limbah Industri Tekstil* (No. Permohonan P00202308274). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
47. **Mukimin, A.**, Ihsan, S., & Whismanto, A., (2023). *Sistem Pengolahan Amoniak Menggunakan Reaktor Elektro-oksidasi Sirkulasi* (No Permohonan P00202306891). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.

48. Vistanty, H., **Mukimin, A.**, Malik, R.A., Sartamtomo, (2022). *Reaktor Expanded Granular Sludge Bed dengan Distribusi Termomodifikasi dan Komposisi Sludge Granul Anaerobik Spesifiknya* (No. Permohonan P00202215510). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
49. **Mukimin, A.**, Zen, N., Vistanty, H., & Nilawati, (2020). *Teknologi Horizontal Rotating Electrocatalytic (HRDE) dan Sistem Penghilangan Bromida pada Air Baku Industri AMDK* (No. Permohonan P00202007118). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
50. **Mukimin, A.**, Zen, N., & Vistanty, H., (2019). *Teknologi Elektrokatalitik Hybrid Advanced Oxidation Process (HAOP) dan Sistem Pengolahan Air Limbah Farmasi dengan Teknologi Tersebut* (No. Permohonan P00201902428). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.
51. **Mukimin, A.**, Wijaya, K., & Yuliasuti, R., (2016). *Reaktor Tabung Elektrokatalitik dan Sistem Pengolahan Air Limbah Industri Pewarnaan Yang Menggunakan Reaktor Tersebut* (ID Patent P00,201,200,625). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama : Dr. Aris Mukimin, S.Si., M.Si.
Tempat, Tanggal Lahir : Semarang, 29 September 1976
Anak ke : 6 dari 6 Bersaudara
Jenis Kelamin : Laki-laki
Nama Ayah Kandung : Sukir
Nama Ibu Kandung : Jumi
Nama Istri : Muyassaroh, ST., S.Pd
Jumlah Anak : 3
Nama Anak : 1. Husain Abdunnaafi'
2. Muhammad Nabil Maula
3. Elka 'Ibadurrahman
Nama Instansi : Pusat Riset Lingkungan dan Teknologi Bersih, Organisasi Riset Hayati dan Lingkungan, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Ilmu : Ilmu Lingkungan
Bidang : Teknik Lingkungan
Kepakaran : Teknologi Elektrokimia
Judul Orasi : Aplikasi Teknologi Elektrokimia Untuk Peningkatan Kualitas Pengolahan Air Limbah Industri
Bidang Kepakaran : Teknik Lingkungan
No. SK Pangkat Terakhir : Keputusan Presiden Nomor 00193/KEP/AA/15001/24 tanggal 3 Mei 2024, TMT Juni 2024
No. SK Peneliti Ahli Utama : Keputusan Presiden Nomor 43/M Tahun 2024 tanggal 13 Juni 2024

Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1.	SD	Wonolopo 2	Semarang	1987
2.	SMP	Muhammadiyah 8	Semarang	1990
3.	SMA	13 Semarang	Semarang	1993
4.	S1	Diponegoro	Semarang	1998
5.	S2	Diponegoro	Semarang	2006
6.	S3	Gadjah Mada	Yogyakarta	2013

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Bimbingan Teknis Pemantauan Kualitas Air	Serpong	2000
2.	Bimbingan Teknis Penggunaan Kromatografi Gas Spektrometri Massa	Serpong	2000
3.	Atomic Absorption Spectrometer User Training	Jakarta	2000
4.	Pelatihan Uji Karakteristik Limbah B3 dengan metode TCLP	Bandung	2001
5.	Pelatihan Teknis Analisis GLC, GCMS dan HPLC	Bandung	2001
6.	Pelatihan Metode Analisis Instrumental FTIR dan UV/VIS	Bandung	2001
7.	Pelatihan Keselamatan Kerja Laboratorium	Semarang	2001
8.	Pengenalan / Pengantar ISO 17025/SNI 19-17025 : 2000	Semarang	2001
9.	Training of Uncertainty of Measurement for Testing Laboratory	Semarang	2002

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
10.	Pendidikan dan Pelatihan Prajabatan Golongan III	Semarang	2003
11.	Diklat Teknis Methodologi Penulisan Karya Tulis Ilmiah di Lingkungan BPPI	Bogor	2004
12.	Training Statistik Untuk Mengolah Data Laboratorium Pengujian	Semarang	2004
13.	Training Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun	Jakarta	2005
14.	Program Pelatihan dan Bimbingan Pejabat Fungsional Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri Semarang	Semarang	2006
15.	Pendidikan dan Pelatihan Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Pertama	Bogor	2007
16.	Workshop Komersialisasi Hasil Litbang Unggulan Balai Besar dan Baristand Industri	Bogor	2009
17.	The Regional Workshop of DAAD-EXCEED Project in South East Asia on “Monitoring and Analysis of Water Quality for Sustainable Water Management	Yogyakarta	2011
18.	Workshop Hasil Litbang Unggulan Balai Besar dan Baristand Industri	Bogor	2012
19.	Workshop Pelatihan Teknometer Kajian Tingkat Kesiapterapan Teknologi Hasil Litbang Industri	Bogor	2013

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
20.	Short Term Fellowship Program for Technical Cooperation in International Textile Quality Standard and Textile Testing Quality Assurance	Korea	2013
21	Pendidikan dan Pelatihan Diklat Fungsional Peneliti Tingkat Lanjut	Bogor	2017

D. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Pertama	07 Nopember 2008
2.	Peneliti Ahli Muda	01 Nopember 2013
3.	Peneliti Ahli Madya	11 Desember 2018
4.	Peneliti Ahli Utama	25 Juni 2024

E. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Diskusi terbatas dalam rangka hari bumi dengan tema “Multi dimensi penanganan banjir dan rob Kota Semarang”	Peserta	MIL UNDIP (Semarang)	2006
2.	Bedah buku “Resolusi konflik lingkungan	Peserta	MIL UNDIP (Semarang)	2006
3.	Seminar hasil riset staf dan mahasiswa S3 FMIPA	Pemakalah	FMIPA UGM (Yogyakarta)	2009

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
4.	Seminar nasional hasil penelitian MIPA	Pemakalah	FMIPA UGM (Yogyakarta)	2011
5.	Seminar pengembangan SDM bidang energi bersih menuju ketahanan energi nasional	Peserta	Pusat Studi Energi UGM	2011
6.	The regional workshop of DAAD EXCEED project in South East Asia	Peserta	Kimia FMIPA UGM (Yogyakarta)	2011
7.	Semnas industri teknologi hijau 1	Pemakalah	BBTPPI (Semarang)	2014
8.	Pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir	Peserta	BATAN (Yogyakarta)	2014
9.	12th IUPAC international conference on novel materials and their synthesis (NMS-XII)	Pemakalah	Departemen Kimia, Fudan University (China)	2016
10.	Seminar optimalisasi penanggulangan limbah melalui inovasi dan teknologi	Pemateri utama	BEM UBS (Surakarta)	2018
11.	4th International conference on energy, environment, epidemiology and information system	Presenter	Pascasarjana UNDIP (Semarang)	2019

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
12.	Workshop “Study and development of recommendation on industrial wastewater treatment technologies for industrial enterprises	Presenter	Departement International Cooperation Ministry of Science and High Education of the Russian Federation (Vietnam)	2019
12.	International conference on science and technology for sustainable industry	Invited speaker	Baristand (Banjarbaru)	2020
13.	5th International conference on energy, environment, epidemiology and information system	Presenter	Pascasarjana UNDIP (Semarang)	2020
14.	Webinar atasi limbah kimia, mikrobiologi, dan padat beserta solusinya	Pemateri utama	Akademi Farmasi Surabaya	2021
15.	Seminar nasional DCF: Green chemistry	Pemateri utama	Kimia UNDIP (Semarang)	2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

F. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
1.	Jurnal riset teknologi pencegahan pencemaran industri	BBTPPI Semarang	Ketua Redaksi	2016
2.	Jurnal dinamika penelitian industri	Baristand Palembang	Mitrabestari	2016
3.	Jurnal riset teknologi industri	Baristand Samarinda	Mitrabestari	2017
4.	Jurnal litbang industri	Baristand Padang	Mitrabetari	2018
5.	Jurnal baristand industri ambon	Baristand Ambon	Mitrabestari	2018
6.	Jurnal selulosa	BBPK Bandung	Mitrabestari	2018
7.	Journal hazard materials	ELSEVIER	Reviewer	2018
8.	Journal of environmental chemical engineering	ELSEVIER	Reviewer	2018
9.	Applied Catalysis B	ELSEVIER	Reviewer	2018
10.	Jurnal teknologi proses dan inovasi industri	Baristand Surabaya	Mitrabestari	2019
11.	Biopropal	Baristand Pontianak	Mitrabestari	2019
12.	Jurnal arena tekstil	BBT Bandung	Mitrabestari	2020

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/Tugas	Tahun
13.	International journal of environmental analytical chemistry	Tylor and Frances	Reviewer	2020
14.	Chemospere	ELSEVIER	Reviewer	2020
15.	Journal water process engineering	ELSEVIER	Reviewer	2023
16.	Journal of applied electrochemistry	Springer Nature	Reviewer	2023
17.	Journal of cleaner production	ELSEVIER	Reviewer	2023
18.	BMC Chemistry	Springer Nature	Reviewer	2023
19.	Electrocatalysis	Springer Nature	Reviewer	2023
20.	Biomass conversion and biorefinery	Springer Nature	Reviewer	2024
21.	Desalination and water treatment	ELSEVIER	Reviewer	2024
22.	Discover applied science	Springer Nature	Reviewer	2024

G. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	4
2.	Bersama Penulis Lainnya	47
	Total	51

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	24
2.	Bahasa Inggris	27
	Total	51

H. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Hanny Vistanty, ST, MT..	BBTPPI Semarang	Membimbing kegiatan penelitian DIPA	2019
2.	Hanny Vistanty, ST, MT.	BBTPPI Semarang	Membimbing penyusunan KTI	2020
3.	Ningsih Ika Pratiwi, ST	BBTPPI Semarang	Membimbing penyusunan KTI	2021
4.	Nanik Indah Setianingsih, STP, M.Ling	PRLTB BRIN	Membimbing penyusunan KTI	2023

Mahasiswa dan Dosen Praktisi

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Ali Muddathir Ali Ahmed	Pascasarjana UNDIP	Penguji disertasi	2018
2.	Drs. Suhartana, M.Si	Pascasarjana UNDIP	Penguji disertasi	2023
3.	Dosen praktisi	Kimia FSM UNDIP	Mengajar	2023
4.	Irma Fifa Yanti, S.Si.	FSM UNDIP	Pembimbing tesis	2024
5.	Kamtiyah Ningsih, ST	Pascasarjana UNDIP	Pembimbing tesis	2024

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpenindo	2013–2021
2.	Anggota	International Water Association	2018–2022
3.	Ketua Seksi Kerja Sama Industri	HKI Jateng	2020–2024
4.	Anggota	Perhimpunan Periset Indonesia	2022–2024
5.	Anggota	PKR Elektrokimia BRIN-UNDIP	2024–2025

J. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden RI	2013
2.	108 Karya inovasi Indonesia	BIC	2016
3.	110 Karya inovasi Indonesia	BIC	2018
4.	Juara 1 riset unggulan	Kementerian Perindustrian RI	2018
5.	Artikel ilmiah berkualitas tinggi	Ristek-BRIN	2020
6.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden RI	2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Orasi ini menyampaikan tentang teknologi elektrokimia dengan elektroda terlis. Teknologi ini bermanfaat untuk mengolah air limbah industri berbasis logam serta pewarnaan dan elektroplating perhiasan. Selain itu, teknologi elektrokimia dengan elektroda stabil juga dapat digunakan untuk mengolah air limbah industri tekstil, batik dan farmasi dengan polutan persisten yang bersifat toksik seperti zat warna dan antibiotik. Pemanfaatan teknologi tersebut sudah dapat diaplikasikan pada skala laboratorium, prototipe, dan skala penuh.

Temuan-temuan tadi dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai teknologi pengolahan air limbah berbasis elektrokimia khususnya dalam hal mekanisme degradasi, desain reaktor, kondisi operasi dan sistem pengoperasiannya sehingga dapat bermanfaat bagi industri, wirausaha kecil dan menengah dan masyarakat dalam upaya mencegah pencemaran. Orasi ini diharapkan dapat mendukung implementasi kebijakan pemerintah berupa peraturan baku mutu dan standar pengolahan air limbah industri dalam upaya pelestarian lingkungan hidup.

