POLICY BRIEF

ARIS MUKIMIN
Badan Riset dan Inovasi Nasional

REAKTOR HIBRID ELECTRO FENTON SEBAGAI TEKNOLOGI PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL DAN BATIK UNTUK MENDUKUNG KEBERLANJUTAN LINGKUNGAN DAN KONSERVASI SUMBER DAYA ALAM

Ringkasan Eksekutif

Air limbah industri tekstil dan IKM batik masih menjadi permasalahan utama yang menyebabkan pencemaran pada badan air sehingga membahayakan lingkungan dan kesehatan manusia jika tidak dilakukan pengolahan. Teknologi pengolahan yang saat ini diterapkan oleh industri tekstil mendasarkan pada proses integrasi anaerob dan aerob, proses yang sama bagi ikm batik hanya dilakukan dengan model komunal. Kelemahan utama teknologi ini selain menghasilkan produk samping berupa sludge yang banyak juga tidak efektif menurunkan warna hingga 200 PtCo (Permen LHK No 12 tahun 2025) sehingga mayoritas industri tekstil telah menambahkan proses kimia menggunakan *decoloring agent* (DCA) yang mahal (Rp 10620/m^3). Sementara itu, IPAL komunal untuk IKM batik yang masih sedikit dibanding jumlah IKM yang ada, mayoritas tidak beroperasi dengan baik dan sulit memenuhi baku mutu untuk seluruh parameter. Untuk itu, diperlukan opsi teknologi lain untuk mendukung pengolahan air limbah industri tekstil dan IKM batik. Reaktor hibrid electro Fenton (HEF) adalah teknologi pengolahan air limbah yang bekerja berdasarkan proses oksidasi lanjut (*advanced oxidation process*). Teknologi ini telah berhasil didesain, difabrikasi dan diujicobakan di IPAL industri tekstil sebagai post treatment dalam skala *pilot plant*. Reaktor HEF juga telah diaplikasikan untuk air limbah IKM batik sebagai unit pengolahan tunggal. Reaktor HEF telah tervalidasi sebagai post treatment IPAL industri tekstil dengan kualitas warna, COD dan amoniak terolah masing-masing 185 PtCo, 95 mg/L dan 5,6 mg/L untuk waktu proses 15 menit. Pada aplikasi IKM batik telah mampu mencapai kualitas air limbah terolah memenuhi baku mutu (BOD: 3,46 mg/L, COD: 37,5 mg/L, TSS: 27 mg/L, amoniak: 0,09 mg/L, sulfida: 0,159 mg/L dan warna: 130 PtCo) untuk waktu proses 3 jam. Kinerja reaktor HEF yang tinggi, potensial diintegrasikan dengan teknik filtrasi sehingga hasil pengolahan dapat digunakan kembali (*reuse*) sebagai air proses, sebagai bentuk penerapan ekonomi sirkular dan konservasi sumber daya air. Berdasarkan hasil penelitian ini, Pemprov Jawa Tengah dapat mendorong penerapan reaktor HEF pada industri tekstil dan proyek percontohan pengolahan air limbah IKM batik yang banyak terdapat di Pekalongan, Sukoharjo, Sragen dan kabupaten-kota lainnya. Pemprov Jateng juga dapat membuat program pemberdayaan IKM batik untuk mengolah air limbahnya secara mandiri dengan tersedianya teknologi HEF sebagai bentuk partisipasi masyarakat dalam mendukung keberlanjutannya.

PENDAHULUAN

Keberadaan industri tekstil di Jawah Tengah sangat besar, hampir di seluruh wilayah provinsi ini terdapat pabrik tekstil dari skala menengah hingga besar. Kabupaten Batang, Kota Pekalongan, Kabupaten Pekalongan, Kabupaten Pemalang, Kabupaten Sukoharjo, Kabupaten Karanganyar dan Kabupaten Sragen tercatat memiliki puluhan industri tekstil dengan proses produksi yang beragam. Provinsi Jawa Tengah juga memiliki IKM batik yang sangat banyak jumlahnya. Sejak mendapatkan pengakuan dari UNESCO pada tahun 2009, industri batik telah berkembang pesat dan diperkirakan akan terus meningkat sebesar 8% setiap tahunnya (Suhartini et al., 2019). Kota Pekalongan merupakan salah satu kota sentra batik di Indonesia selain Kabupaten Sragen dan Kabupaten Sukoharjo. Berdasarkan data yang diperoleh dari DLH Kota Pekalongan tahun 2023, jumlah industri kecil menengah batik di Kota Pekalongan tercatat sebanyak ±2.177 unit.

Industri tekstil dan batik memerlukan sumber daya air yang tidak sedikit sebagai bahan baku proses produksi. Kuantitas konsumsi air bersih untuk industri tekstil sebesar 1,7 liter per meter kain, sedangkan

industri/IKM batik sebesar 2,7 liter per meter kain. Konsumsi bahan baku air yang besar ini, selain menurunkan ketahanan sumber daya air juga mendatangkan problem lingkungan. Air limbah sebagai hasil samping produksi tekstil dan batik mengandung bahan pencemar yang berbahaya bagi lingkungan dan kesehatan manusia. Data DLH Kota Pekalongan menyebutkan bahwa dari 729 IKM batik di Kecamatan Pekolongan Selatan telah menghasilkan debit air limbah sebesar ±1.000 m^3/hari. Mayoritas pengrajin IKM batik belum melakukan pengolahan air limbah secara optimal (Triwiswara, 2019). Pemerintah Kota Pekalongan telah berupaya melakukan pengendalian terhadap buangan air limbah IKM batik yang berlokasi di Kecamatan Pekalongan Selatan dengan menyediakan IPAL Komunal Jenggot. Kapasitas IPAL Komunal tersebut didesain untuk mengolah air limbah dengan debit 400 m^3/hari. Namun, seiring waktu kapasitas olah IPAL Komunal tersebut telah mengalami penurunan menjadi 150 m^3/hari sehingga sisa dari buangan air limbah dari rumah-rumah pengrajin batik langsung dibuang ke badan air permukaan Kali Setu.

Berbeda dengan IKM batik, industri tekstil umumnya telah menerapkan instalasi pengolahan air limbah (IPAL) secara mandiri. Teknologi yang digunakan merupakan integrasi proses kimia dan biologi. Bahan kimia yang sering digunakan meliputi tawas, ferosulfat, dan *polyaluminium chloride* (PAC) (Karam et al., 2021). Sementara itu, proses biologi yang banyak dipilih seperti lumpur aktif (Malik et al., 2022), *moving bioreactor* (MBR) (Yang et al., 2020, 2021), dan biofilter (Howlader et al., 2022). Namun demikian, integrasi teknologi tersebut menghasilkan produk samping berupa lumpur (sludge) yang sangat besar dan belum efektif menurunkan kandungan warna dan amoniak. Sementara itu pemerintah melalui Kementerian Lingkungabn Hidup dan Kehutanan telah menetapkan peraturan baru nomer 12 tahun 2025 tentang baku mutu air limbah industri tekstil dan batik yang mensyaratkan batas maksimal konsentrasi warna 200 PtCo.

Penelitian teknologi pengolahan warna pada air limbah tekstil dan batik telah dilakukan dalam satu decade. Pada fase awal penelitian diperoleh bahwa metode *electrochemical advanced oxidation process* (EAOP) menunjukkan kinerja yang tinggi dalam mengolah air limbah tekstil. Hasil riset pada tahun 2012 menunjukkan efisiensi penurunan warna hingga 98% dan COD 65% dengan waktu proses 1 jam (Mukimin et al., 2012). Namun demikian, kinerja oksidasi masih belum optimal pada limbah riil, dimana waktu proses yang dibutuhkan masih relatif lama (2-4 jam) dan penurunan COD sekitar 60%. Hal ini disebabkan oleh reaksi oksidasi yang terbatas dan hanya berlangsung di permukaan elektroda. Studi selanjutnya menyebutkan bahwa oksidasi polutan di fasa cair berpotensi untuk meningkatkan efisiensi penyisihan COD hingga 87% (Mukimin et al., 2020).

Reaktor hibrid elektro Fenton (HEF) merupakan pengembangan terbaru yang potensial untuk diaplikasikan sebagai *post-treatment* pada IPAL industri tekstil. Teknologi ini efektif dalam menurunkan konsentrasi warna, COD, dan amoniak (Mukimin et al., 2020). Teknologi ini dibuat dalam bentuk sel reaktor yang menggunakan elektroda oksida logam Ti/RuO_2 dan karbon, yang jauh lebih murah dibandingkan dengan elektroda Ti/PtIr (Mukimin et al., 2020). Untuk meningkatkan feasibilitas proses ini, optimasi proses operasi, seperti kondisi keasaman, dosis penambahan bahan kimia (fero), serta sirkulasi efluen diaplikasikan untuk meningkatkan kinerja proses. Untuk menyederhanakan aplikasi proses pada skala yang lebih besar, teknologi ini dibuat dalam model yang kompak serta dilengkapi dengan kontrol proses untuk meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, kemudahan operasional dan penyesuaian terhadap IPAL eksisting.

Reaktor HEF memiliki kelebihan dibanding dengan metode DCA atau koagulasi kimia baik dari sisi efisiensi penyisihan maupun dari aspek ekonomi. Efisiensi penyisian konsentrasi warna dengan reaktor HEF mencapai 96 % dalam waktu 15 menit tanpa menghasilkan produk samping berupa lumpur (Mukimin et al., 2024). Walaupun untuk optimalisasi kinerja HEF memerlukan bahan kimia seperti garam, ferro dan asam tetapi masih lebih murah dibanding dengan harga DCA. Berdasarkan hasil perhitungan biaya operasional maka teknologi HEF memerlukan biaya Rp 6102/m^3 dibanding DCA Rp 10620/m^3. Pengoperasian reaktor HEF tidak memerlukan unit proses lanjutan, sementara metode DCA memerlukan unit sedimentasi dan mesin *belt press* atau *drying bed* (Mukimin, et al., 2025). Adanya tambahan unit lanjutan berimplikasi pada kebutuhan lahan yang semakin luas dan energi listrik yang tidak sedikit.

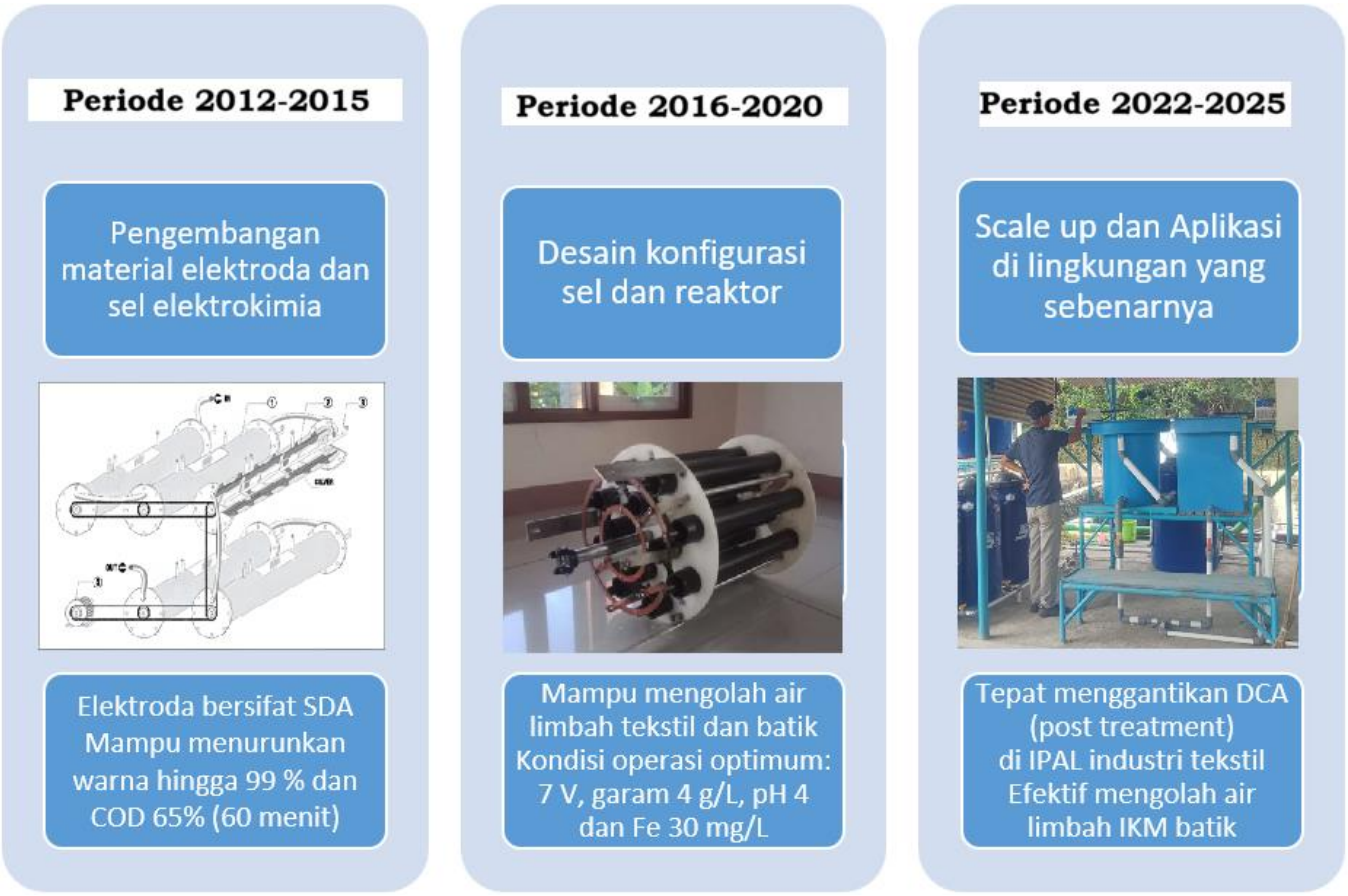
Hasil penelitian ini dikembangkan dalam bentuk penerapan kebijakan, agar manfaatnya tidak hanya terbatas pada peneliti, perekayasa dan akademisi saja. Melalui kebijakan yang diprogramkan, pemerintah daerah dapat memiliki opsi alternatif untuk membangun IPAL industri tekstil maupun IKM batik dengan biaya yang lebih murah dan hasil yang lebih baik. Penerapan IPAL industri tekstil dengan teknologi hibrid electro Fenton ini diharapkan dapat menjadi solusi agar pencemaran air akibat limbah tekstil dan batik dapat terkendali.

DESKRIPSI MASALAH

IPAL industri tekstil saat ini masih mengalami kesulitan memenuhi baku mutu terbaru (Permen LHK No.12/2025) yang mensyaratkan parameter COD, amoniak, dan warna yang lebih ketat. Berdasarkan hasil

pengambilan sampel dari salah satu industri tekstil di Solo, efluen IPAL masih mengandung 650-900 PCU warna, 140-160 mg/L COD dan 26-27 mg/L amoniak (Mukimin et al., 2024). Untuk memenuhi baku mutu, saat ini industri menggunakan *post-treatment* berupa penambahan bahan kimia *Decolorizing Agent* (DCA), dengan biaya yang berkisar antara Rp. 10.000 hingga Rp. 22.000 per m^3 air limbah. Hal ini menjadi salah satu beban berat bagi industri tekstil. Sementara itu, air limbah IKM batik dengan proses printing mempunyai kandungan polutan yang lebih tinggi. Hasil analisis kandungan air limbah di influent IPAL jenggot yang menampung 729 IKM mempunyai kandungan warna dan COD sebesar 2545 PtCo dan 415 mg/L. Hal ini tentu jauh di atas dari syarat maksimum yang diperbolehkan, yaitu 200 PtCo untuk parameter warna dan 150 mg/L untuk parameter COD (Mukimin, et al., 2025).

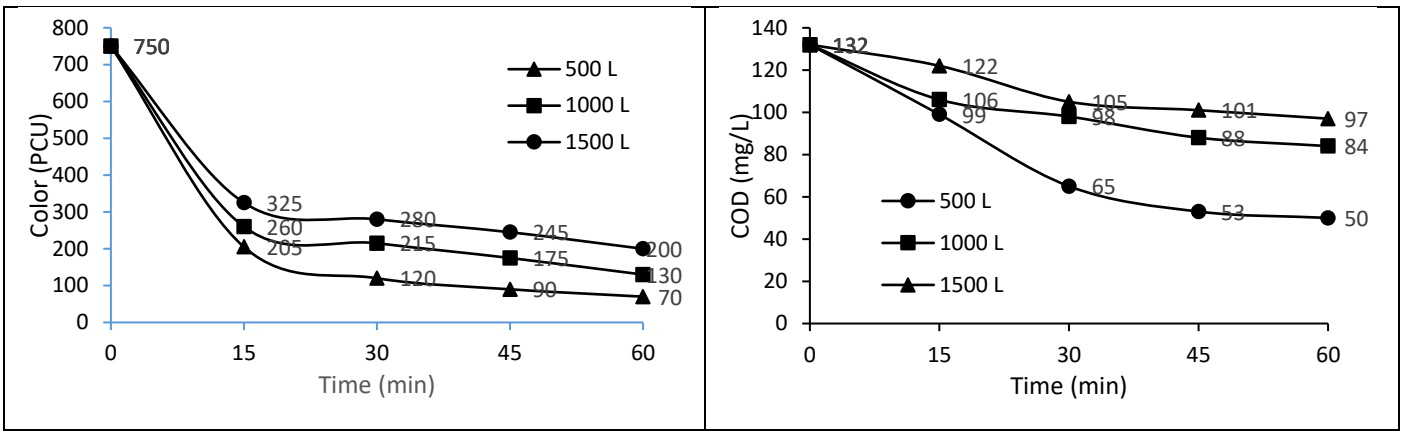
Untuk itu, telah dilakukan riset teknologi pengolahan air limbah dengan metode oksidasi lanjut berbasis elektrokimia sejak tahun 2012 hingga 2025. Road map penelitian ini dituangkan dalam gambar diagram sebagai berikut:



Gambar road map penelitian teknologi *advanced oxidation process* (AOP) berbasis elektrokimia

Reaktor hibrid electro Fenton (HEF) sebagai varian AOP berbasis elektrokimia yang terbaru dihasilkan sangat menjanjikan sebagai opsi menggantikan DCA. Pada skala prototipe (volume 50 liter), reaktor HEF telah diujicobakan sebagai *post-treatment* pada salah satu industri tekstil. Teknologi ini menunjukkan kinerja yang tinggi dalam menurunkan konsentrasi warna, COD, dan amoniak dari efluen proses biologi anaerob-aerob. Dalam waktu 15 menit, proses ini mampu mencapai penurunan warna sebesar 82,4–96,1%, yang lebih tinggi dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya (Liu et al., 2021). Untuk parameter COD, teknologi ini mampu menyisihkan 29%-67% setelah 30 menit, lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya (Ramirez-Pereda et al., 2020).

Reaktor HEF semakin optimal dengan model operasi sirkulasi. Pada scale up reaktor (150 liter) dengan tanki sirkulasi 500, 1000 dan 1500L diperoleh efisiensi pengolahan yang mencapai 4 kali. Data kualitas hasil pengolahan terhadap waktu untuk variasi volume air limbah sebagaimana gambar berikut:



Gambar tren penurunan konsentrasi warna dan COD hasil pengolahan dengan reaktor HEF

Peningkatan volume air limbah menghasilkan korelasi non-linear terhadap efisiensi penghilangan warna (Mukimin, et al., 2025). Peningkatan volume sebesar 2 dan 3 kali lipat tidak menghasilkan tingkat penghilangan warna yang proporsional, dengan nilai penghilangan yang teramati masing-masing sebesar 36,5% dan 24%. Pada waktu pemprosesan 30 menit, efisiensi penghilangan warna tercatat sebesar 84%, 71%, dan 63% untuk volume air limbah masing-masing 500, 1000, dan 1500 L. Selain itu, tingkat penghilangan COD tercatat sebesar 51%, 26%, dan 20% untuk volume-volume tersebut.

Reaktor HEF juga menunjukkan kinerja yang baik untuk mengolah air limbah batik. Reaktor telah disusun dari material elektroda yang dapat diperbaharuhi (karbon grafit). Visualisasi elektroda, reaktor dan hasil pengolahan tersaji sebagai berikut:







Gambar elektroda grafit, reaktor HEF dan air limbah sebelum dan setelah proses HEF

Elektroda grafit yang mampu menggantikan elektroda oksida logam berimplikasi pada biaya investasi reaktor (Mukimin, et al., 2025). Total biaya produksi per elektroda grafit hasil fabrikasi dengan dimensi 10 × 5 × 60 mm diperkirakan sebesar Rp 58400. Biaya produksi ini jauh lebih rendah dibandingkan harga beli elektroda komersial dengan dimensi serupa, seperti Ti/RuIrO_2 (Rp 480.000), Ti/RuO2 (Rp 400.000), dan Ti/PtIr (Rp 640.000).

Untuk memaksimalkan kinerja IPAL, industri tekstil dan IKM batik juga dapat melakukan pengembangan proses, dalam bentuk reuse air limbah. Aplikasi teknologi electro Fenton sebagai *post-treatment* ataupun integrasi teknologi ini dengan teknologi lain seperti filtrasi/adsorpsi dapat meningkatkan kualitas efluen, sehingga dapat digunakan kembali (*reuse*) sebagai air proses maupun air *flushing* toilet. Hal ini merupakan salah satu bentuk langkah nyata konservasi sumber daya air untuk mendukung ekonomi sirkular serta keberlanjutan sumber daya alam dan lingkungan hidup, sekaligus menjadi solusi atas permasalahan penurunan daya dukung dan daya tampung lingkungan di Jawa Tengah.

REKOMENDASI KEBIJAKAN

Industri tekstil dan IKM batik berkontribusi signifikan terhadap pencemaran badan air jika tidak melakukan pengolahan air limbahnya. Reaktor electro Fenton yang bekerja berdasarkan proses reaksi oksidasi lanjut (*advanced oxidation process*) dapat menjadi opsi teknologi pengolahan air limbah tekstil dan batik. Tingkat kesiapterapan teknologi telah mencapai level 7 dimana purwarupa yang dihasilkan telah divalidasi di lingkungan yang sebenarnya. Reaktor electro Fenton mempunyai flesibiltas penerapan karena (1) dapat difungsikan sebagai post treatment di IPAL industri tekstil yang menggunakan sistem integrasi anaerob-aerob, (2) sebagai unit tunggal pengolahan air limbah IKM batik, dan (3) diintegrasikan dengan tanki filter sehingga air limbah hasil olahan dapat digunakan sebagai air proses. Pemerintah Provinsi Jawa Tengah dapat mendorong pemanfaatan teknologi electro Fenton melalui skema sosialisasi ke industri tekstil yang masih mengalami kesulitan dalam penanganan air limbahnya sehingga belum mampu menerapkan industri hijau. Pemprov Jawa Tengah juga dapat melakukan hilirisasi teknologi ini untuk IKM batik melalui proyek percontohan di beberapa IKM batik yang sekaligus berfungsi sebagai standarisasi teknologi sebelum replikasi dilakukan. DLHK dan Dinas Perindustrian sebagai UPTD teknis dapat mengawal hilirisasi ini dan menggerakkan kesadaran IKM batik untuk mengolah air limbahnya melalui penerapan teknologi electro Fenton. Selain itu, kedua unit ini dapat memberikan bimbingan maupun kegiatan sosialisasi teknologi pengolahan air limbah secara sistematis dan berkelanjutan untuk meningkatkan pengetahuan dan keterampilan IKM dalam mengelola serta mengolah air limbah. BRIDA Jateng dapat berperan dalam proses standarisasi teknologi dan peningkatan tingkat kesiapterapan yang lebih tinggi. Perguruan tinggi sebagai intitusi yang mencetak talenta iptek dapat mengembangkan teknologi ini sehingga lebih efisien dan ekonomis

Penanganan air limbah industri tekstil/batik perlu dilakukan untuk menyelesaikan salah satu permasalahan, yaitu penurunan daya dukung dan daya tampung lingkungan, serta mendukung program prioritas Gubernur Jawa Tengah, yaitu penanggulangan bencana dan keberlanjutan lingkungan. Teknologi HEF dapat diterapkan untuk mendukung tema prioritas Jawa Tengah dalam transformasi lingkungan, khususnya pada sektor adaptasi perubahan iklim dan konservasi sumber daya alam. Selain itu, aplikasi reaktor HEF juga dapat dilakukan untuk pencapaian SDGs Goal 6, yaitu air bersih dan sanitasi layak.

REFERENSI

Triwiswara, M. (2019). Efficiency Assessment of Batik Industry Wastewater Treatment Plant in Center for Handicraft and Batik Indonesia 1 st Mutiara Triwiswara Center for Handicraft. *Advances in Engineering Research*, 118–119. https://orcid.org/0000-0001-6532-1065

Howlader, Md. I., Morsada, Z., & Hossain, M. (2022). Pollutants removal from textile wastewater by biofilter. In *An Innovative Role of Biofiltration in Wastewater Treatment Plants (WWTPS)* (pp. 309–330). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-B23946-9-00025-5

Karam, A., Bakhoum, 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

Liu, L., Chen, Z., Zhang, J., Shan, D., Wu, Y., Bai, L., & Wang, B. (2021). Treatment of industrial dye wastewater and pharmaceutical residue wastewater by advanced oxidation processes and its combination with nanocatalysts: A review. In *Journal of Water Process Engineering* (Vol. 42). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102122

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*. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101157

Mukimin, A., Ningsih, K., Muhammad, F., Ghozali, A. A., & Rochman, F. F. (2025). A novel electrochemical advanced oxidation technology using a low-cost graphite plate anode for batik-printing wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *13*(5), 117759. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.117759

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*. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105028

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*. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116728

Mukimin, A., Vistanty, H., Zen, N., Maharsa, L., & Harihastuti, N. (2025). Full-scale application and performance of hybrid Fenton electrochemical reactor as post treatment for WWTP of textile industry. *Process Safety and Environmental Protection*, *202*. https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107737

Mukimin, A., Wijaya, K., & Kuncaka, A. (2012). Oxidation of remazol brilliant blue r (RB.19) with in situ electro-generated active chlorine using Ti/PbO 2 electrode. *Separation and Purification Technology*, *95*, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.04.015

Ramirez-Pereda, B., Álvarez-Gallegos, A., Bustos-Terrones, Y. A., Silva-Martínez, S., & Hernández-Pérez, A. (2020). Effective Electro-Fenton Treatment for a Real Textile Effluent: A Case Study. *Journal of Water Process Engineering*, *37*. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101434

Suhartini, S., Pangestuti, M. B., Dewanti, B. S., & Hidayat, N. (2019). Textile wastewater treatment: Biodegradability on aerobic and anaerobic process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *230*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012091

Yang, X., López-Grimau, V., Vilaseca, M., & Crespi, M. (2020). Treatment of textilewaste water by CAS, MBR, and MBBR: A comparative study from technical, economic, and environmental perspectives. *Water (Switzerland)*, *12*(5). https://doi.org/10.3390/W12051306

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