

ADSORPSI LOGAM BERAT LIMBAH CAIR TEKSTIL MENGGUNAKAN ZEOLIT DAN FLY ASH KELAPA SAWIT

TEXTILE WASTE WATER HEAVY METALS ADSORPTION USING ZEOLITE AND POFA

**Elda Pelita, Rita Youfa, Dyah Nirmala, Desniorita Desniorita, Regna Tri Jayanti*,
Resi Levi Permadani, Dwimaryam Suciati**
Politeknik ATI Padang, Padang, 25171, Indonesia

*Penulis Korespondensi:
Alamat Email: regnatrijayanti@gmail.com

Tanggal diterima: 22 Juli 2026, direvisi: 27 Juli 2026,
disetujui terbit: 29 Juli 2026

Abstrak

Penurunan kadar logam berat pada limbah cair menjadi tantangan penting dalam pengolahan limbah industri, termasuk limbah cair tekstil. Salah satu metode yang efektif dan ekonomis adalah filtrasi menggunakan media adsorben berpori. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas media filtrasi berbasis fly ash pabrik kelapa sawit dan zeolit dalam menurunkan kadar logam berat pada limbah cair tekstil. Proses filtrasi dilakukan menggunakan sistem filter berlapis dengan empat variasi model susunan media untuk mengadsorpsi polutan dalam limbah cair. Media disusun dalam variasi 4 model lapisan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem filtrasi mampu menurunkan kadar logam berat secara signifikan dengan rata-rata efisiensi penurunan sebesar 85%. Kualitas air limbah setelah filtrasi menggunakan media POFA dan zeolit mendapatkan nilai parameter pH 7, TSS 0,2 mg/L, dan konsentrasi Cr 0,065 mg/L. Model filtrasi terbaik diperoleh pada Model A dengan susunan media: (1) zeolit kasar, (2) zeolit halus, (3) fly ash, dan (4) kapas. Kombinasi media ini berpotensi menjadi teknologi sederhana, efektif, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah cair tekstil.

Kata kunci : media filtrasi, *fly ash*, zeolit, limbah tekstil, logam berat

Abstract

Reducing heavy metal concentrations in wastewater remains a major challenge in industrial waste treatment, including textile wastewater. One effective and economical method is filtration using porous adsorbent media. This study aimed to evaluate the effectiveness of filtration media based on palm oil mill fly ash and zeolite in reducing heavy metal concentrations in textile wastewater. The filtration process was carried out using a layered filter system with four different media arrangement models to adsorb pollutants from wastewater. The results showed that the filtration system significantly reduced heavy metal concentrations, with an average removal efficiency of 85%. The quality of wastewater after filtration using fly ash and zeolite media with pH of 7, TSS of 0.2 mg/L, and Cr concentration of 0.065 mg/L. The best filtration performance was achieved by Model A, with the media arrangement consisting of (1) coarse zeolite, (2) fine zeolite, (3) fly ash, and (4) cotton fiber. This media combination has strong potential as a simple, effective, and environmentally friendly technology for textile wastewater treatment.

Keywords: filtration media, fly ash, zeolite, textile waste, heavy metals

PENDAHULUAN

Limbah cair dari industri tekstil umumnya mengandung berbagai polutan anorganik dan organik, termasuk logam berat seperti Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, yang berasal dari penggunaan zat warna, mordant, dan bahan tambahan kimia lainnya dalam proses pewarnaan dan *finishing*^{1,2,3}. Keberadaan logam-logam berat ini bersifat toksik dan persisten, serta dapat menimbulkan akumulasi biologis pada organisme akuatik dan manusia. Pengolahan yang tidak tepat pada limbah ini dapat menyebabkan pencemaran lingkungan. Upaya penanganan limbah cair tekstil yang mengandung logam berat membutuhkan metode yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan

Beberapa metode pengolahan limbah cair tekstil telah banyak diupayakan antara lain metode adsorpsi, koagulasi dan flokulasi, dan filtrasi^{4,5}. Metode filtrasi merupakan salah satu teknik yang paling banyak digunakan untuk menghilangkan logam berat dalam air limbah karena efisien, ekonomis, dan dapat menggunakan bahan lokal sebagai media filtrasinya¹. Filtrasi bekerja dengan cara mengikat ion logam ke permukaan media filtrasi melalui gaya fisik dan/atau kimia.

Bahan karbon aktif khususnya dari limbah biomassa seperti tempurung kelapa atau serabut kelapa sawit cukup efektif dalam mengurangi COD, warna, dan logam berat seperti Cu, Fe, Zn, dan Pb. Ani dkk., (2015)⁶ memperlihatkan kombinasi karbon aktif dari batubara Mukah dan biofilm mikroba mampu menurunkan BOD₅ (~71 %), COD (~96 %), TSS (~98 %), dan warna (~91 %) pada limbah cair tekstil

Ramatex. Penelitian Wardani dkk., (2021)⁷ menunjukkan efisiensi penurunan Zn mencapai 80-90 % setelah aktivasi *fly ash* dengan NaOH. Selain itu, *fly ash* juga telah terbukti menurunkan kadar Fe pada air asam tambang secara signifikan setelah aktivasi optimal pada pH netral⁸. Selain karbon aktif dan zeolit, biomassa seperti kulit buah, sekam padi, dan limbah pertanian juga banyak digunakan sebagai alternatif media filtrasi yang murah dan ramah lingkungan⁹.

Zeolit merupakan mineral aluminosilikat dengan struktur pori-pori teratur dan luas permukaan tinggi yang menjadikannya efektif dalam proses pertukaran ion dan penyerapan logam berat dari air limbah¹⁰. Sementara itu, *fly ash* kelapa sawit (*Palm Oil Fly Ash/POFA*) merupakan limbah padat hasil pembakaran cangkang dan serabut kelapa sawit di pabrik kelapa sawit. POFA memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi, yang memungkinkan untuk digunakan langsung sebagai media filtrasi¹⁶. Penggunaan POFA sebagai bahan adsorben memiliki nilai tambah dalam hal ekonomi dan lingkungan, karena memanfaatkan limbah industri yang berlimpah dan sering kali belum termanfaatkan secara optimal¹¹.

Kombinasi antara zeolit dan POFA dapat meningkatkan efektivitas penyerapan logam berat disebabkan oleh sifat sinergis antara kemampuan pertukaran ion zeolit dan luas permukaan spesifik POFA yang tinggi¹². Namun, efektivitas media filtrasi juga dipengaruhi oleh berbagai faktor, salah satunya adalah ketebalan lapisan media. Ketebalan yang tepat dapat meningkatkan waktu kontak antara limbah dengan media filtrasi

sehingga proses penyerapan menjadi lebih optimal. Oleh karena itu, pengaturan kombinasi material dan ketebalan media filtrasi dapat menjadi aspek penting dalam desain sistem filtrasi yang efisien.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi penggunaan zeolit dan POFA sebagai media filtrasi dalam menurunkan kadar logam berat pada limbah cair tekstil. Melalui percobaan laboratorium, akan dianalisis pengaruh urutan lapisan media filtrasi serta efektivitas penyisihan logam berat utama seperti Pb, Zn, dan Cr melalui uji kadar kandungan logam berat. Pendekatan ini, diharapkan memperoleh alternatif solusi pengolahan limbah yang murah, efisien, dan ramah lingkungan serta mendorong pemanfaatan limbah industri sawit yang selama ini kurang termanfaatkan.

BAHAN DAN METODA

Bahan baku utama yang akan digunakan untuk penelitian adalah POFA yang diperoleh dari Pabrik Kelapa Sawit Mutiara Agam di Provinsi Sumatera Barat dan zeolit alam dengan ukuran besar 3/4 inch dan kecil 1/4 inch yang dibeli secara komersial. Selain itu bahan pendukung lain yang dibutuhkan adalah akuades yang diperoleh dari CV Novalindo, kapas, kain dengan kerapatan tinggi (ampas tahu) kurang lebih 400 mesh dan busa dibeli secara komersial. Sedangkan limbah cair tekstil yang diperoleh

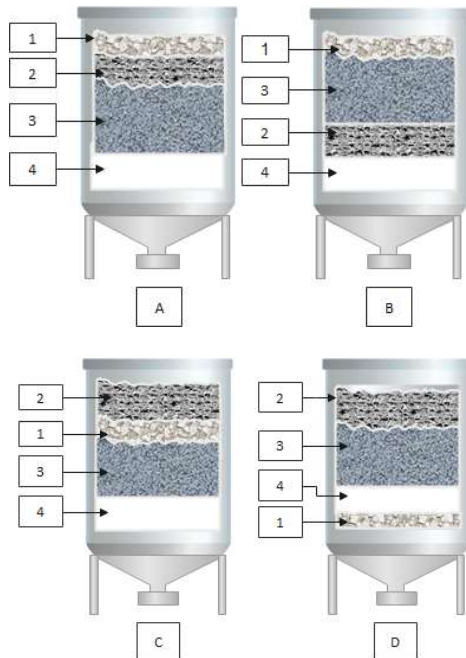
berasal dari limbah pencucian kain setelah pewarnaan dengan bahan sintetik remasol biru pada salah satu IKM Batik Sumatera Barat.

Alat yang akan digunakan dalam melakukan penelitian ini diantaranya adalah: *Oven dryer* (memmert), desikator (pyrex), timbangan digital (ohaus), erlenmeyer 250 ml (pyrex), pipet volume 1 ml dan 5 ml (pyrex), ayakan, piknometer, gelas ukur 100 ml (pyrex), termometer, tali, labu ukur 1000 ml (pyrex), pipet tetes, corong kaca 75 mm, spatula, klem dan statif, kolom filtrasi, dan pH universal.

Variabel pada penelitian ini antara lain variabel bebas yaitu variasi urutan lapisan pada kolom filtrasi dari atas ke bawah lapisan yang disusun terdiri dari 4 lapisan yaitu (lapisan 1, 2, 3 dan 4) dari bahan zeolit ukuran besar, zeolit ukuran kecil, POFA dan kapas dapat dilihat pada Tabel.1. Variasi ini dimaksudkan untuk mendapatkan penjernihan air limbah yang maksimal.

Tabel 1. Variabel Tetap Penelitian

Kode	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
A	Zeolit Besar	Zeolit Besar	Zeolit Kecil	Zeolit Kecil
B	Zeolit Kecil	POFA	Zeolit Besar	POFA
C	POFA	Zeolit Kecil	POFA	Kapas
D	Kapas	Kapas	Kapas	Zeolit Besar



Gambar 1. Variasi urutan lapisan kolom filtrasi

Proses filtrasi yang dilakukan berdasarkan variasi urutan lapisan bahan dimana masing-masing bahan diberi simbol angka yaitu (1) Zeolit Besar, (2) Zeolit Kecil, (3) POFA, dan (4) Kapas. Setiap kolom dengan urutan lapisan berbeda diberi kode A, B, C, dan D. Sebelum dilakukan adsorpsi, semua media berupa zeolit dan POFA dibilas dengan air hingga bersih dari kotoran. Evaluasi yang diterapkan pada penelitian ini meliputi:

1. Uji pH, dilakukan dengan menggunakan alat pH meter *automatic calibration* dengan tingkat akurasi $\pm 0,01$.
2. Uji TSS (*Total Suspended Solids*), Pengujian TSS dilakukan dengan metode gravimetri, yaitu menyaring sampel, lalu mengeringkan dan menimbang residu padat tersuspensi. Perhitungan efektifitas filtrasi terhadap logam berat yaitu perbandingan selisih kadar logam awal dan kadar logam berat setelah filtrasi

terhadap kadar logam berat awal. Perhitungan diperoleh menggunakan rumus berikut ¹³:

$$\% \text{ efektifitas adsorpsi} = \frac{P-Q}{P} \times 100\%$$

.(2)

Dimana:

P = Kadar logam berat awal (ppm)

Q = Kadar logam berat setelah adsorpsi (ppm).

3. Pengujian kandungan logam berat dilakukan untuk melihat penurunan kadar logam berat yang ada di dalam limbah tekstil setelah filtrasi menggunakan media zeolit dan POFA. Pengujian dilakukan di laboratorium Fakultas Teknik Lingmengkungkungan Universitas Andalas dengan alat *Inductively Coupled Plasma (ICP)*.

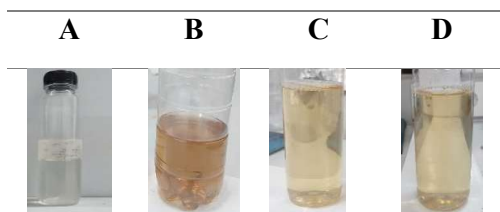
HASIL

Evaluasi Variasi Lapisan Filtrasi

Urutan susunan lapisan media filtrasi mempengaruhi efektifitas proses pengolahan limbah Tekstil khususnya dalam penyisihan padatan tersuspensi, senyawa organik, zat warna, dan ion logam berat. Variasi urutan lapisan filtrasi diterapkan untuk mengevaluasi kemampuan masing-masing media dalam menangkap kontaminan serta meningkatkan kualitas efluen yang dihasilkan.

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa model A yang terdiri atas urutan lapisan (1) Zeolit Besar, (2) Zeolit kecil, (3) POFA, dan (4) Kapas, menunjukkan kinerja filtrasi terbaik dibandingkan dengan tiga variasi susunan lapisan lainnya. Susunan ini menghasilkan *effluent* dengan tingkat kejernihan lebih tinggi yang mengindikasikan efektifitas penyisihan kontaminan yang lebih baik selama proses filtrasi.

Urutan lapisan media pada model A lebih efektif dalam menjernihkan air limbah karena setiap lapisan memiliki peranan yang signifikan. Media zeolit besar sebagai lapisan kasar awal mampu menangkap partikel besar dan mendukung pembentukan biofilm, lalu lapisan zeolit kecil menyediakan luas permukaan lebih tinggi untuk adsorpsi ion logam dan bahan organik¹⁴. Selanjutnya, *fly ash* berbentuk bubuk dapat memperpanjang kontak dengan polutan dan meningkatkan adsorpsi^{15,16}. POFA yang digunakan pada penelitian ini telah berukuran 400 mesh atau sama dengan 0,037 mm, sesuai dengan pernyataan penelitian dari Ayuningsih dkk., (2022)¹⁷. *Fly ash* halus (0,11–0,35 mm) bisa menambah kemampuan adsorpsi terhadap logam berat dari limbah tekstil. Adapun serat kapas (*cotton fiber*) lebih efektif menangkap partikel sangat halus dan sisa padatan tersuspensi serta mengurangi kekeruhan pada tahap akhir. Ini sejalan dengan penelitian Politaeva dkk., (2020)¹⁸ dan Ahson Aslam dkk., (2017)¹⁹ yang melaporkan bahwa sistem filter berbasis kapas tenun dengan kerapatan dapat menurunkan kekeruhan, TSS secara substansial pada air limbah domestik. Perbedaan hasil kejernihan air limbah setelah filtrasi dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 2. Kejernihan air limbah hasil filtrasi dari 4 variasi urutan lapisan

Evaluasi Karakteristik Limbah Hasil Filtrasi

Keberhasilan proses pengolahan limbah cair industri tekstil dapat dievaluasi berdasarkan nilai paramter pH, *Total Suspended Solid* (TSS) dan total kandungan logam Krom (Cr) sebagai indikator utama efektivitas filtrasi.

Hasil uji kadar kandungan logam berat sebelum dan sesudah filtrasi dengan media POFA dan zeolit hanya dilakukan pada variasi model A yang telah terbukti menunjukkan kejernihan yang tinggi dari hasil filtrasi dan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kandungan logam berat dalam limbah Tekstil

UNSUR LOGAM	SEBELUM FILTRASI (g/mL)	SETELAH FILTRASI (g/mL)	EFEKTIFITAS PENURUNAN KADAR (%)
Al	2,18	0,24	88,99
Ca	1,54	0,23	85,06
Cr	0,765	0,065	91,50
Cu	0,876	0,073	91,67
Fe	1,25	0,054	95,68
K	1,56	0,324	79,23
Mg	0,854	0,056	93,44
Zn	0,856	0,068	92,06

Nilai kadar logam berat kromium (Cr) yang diperoleh selanjutnya dibandingkan dengan standar baku mutu air limbah. Berdasarkan hasil karakterisasi awal limbah tekstil, terindikasi beberapa unsur logam yang dominan, Aluminium (Al), Kalium (K), Kalsium (Ca), Besi (Fe), tembaga (Cu), Seng (Zn), Magnesium (Mg) dan Kromium (Cr). Keberadaan logam-logam tersebut berasal dari bahan baku, zat pewarna, bahan kimia proses dan bahan tambahan yang digunakan selama proses produksi tekstil. Kromium menjadi parameter yang mendapat perhatian khusus di antara unsur-unsur tersebut karena

berpotensi memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan apabila terakumulasi dalam perairan.

Secara umum terjadi penurunan konsentrasi logam yang signifikan setelah proses filtrasi menggunakan kombinasi media zeolit dan POFA. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kedua media filtrasi memiliki kemampuan yang baik dalam mengadsorpsi dan menghilangkan ion logam yang terkandung dalam limbah cair tekstil melalui mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion. Secara keseluruhan, rata-rata efisiensi penyisihan logam mencapai $\pm 85\%$ yang mengindikasikan efektivitas sistem filtrasi dalam menurunkan beban pencemar logam pada limbah tekstil. Efisiensi prioritas logam kromium (Cr) diperoleh sebesar 91,50% dengan konsentrasi akhir dari 0,765 mg/L menjadi 0,065 mg/L setelah filtrasi. Penurunan ini menunjukkan bahwa kombinasi zeolit dan POFA memiliki afinitas yang tinggi terhadap ion kromium sehingga berpotensi digunakan sebagai media adsorben dalam pengolahan limbah tekstil.

Selain kromium (Cr), logam-logam dominan lainnya juga mengalami penurunan konsentrasi yang sangat baik. Efisiensi penyisihan untuk Aluminium (Al), Kalsium (Ca), Tembaga (Cu), Besi (Fe), Magnesium (Mg), dan Seng (Zn) berturut-turut mencapai 88,99 %, 85,06%, 91,67 %, 95,68%, 93,44%, dan 92,06%. Besi (Fe) menunjukkan tingkat penyisihan tertinggi setelah kromium (Cr), yang menguatkan dugaan bahwa adanya interaksi adsorptif yang kuat antara ion Fe dengan permukaan aktif media filtrasi. Tingginya efisiensi penurunan

Lapisan zeolit besar berfungsi menahan partikel berukuran besar, sedangkan zeolit

kadar logam berat pada penelitian ini menggambarkan pengaruh yang kuat dari karakteristik fisik dan kimia media filtrasi yang digunakan. Zeolit memiliki struktur kristalin berpori dengan kapasitas tukar kation yang tinggi, sedangkan POFA mengandung senyawa silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3) dan karbon residu yang menyediakan situs aktif untuk proses adsorpsi. Sehingga kombinasi kedua media ini dapat menghasilkan mekanisme penyisihan efektif melalui proses adsorpsi, pertukaran ion, dan penyerapan fisik dalam menurunkan konsentrasi logam dalam limbah tekstil dengan baik.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil pengujian parameter pH, TSS, dan kadar kromium (Cr) total yang diamati, seluruh parameter telah mengalami penurunan yang signifikan dari sebelum filtrasi dan sesudah. Nilai pH limbah cair tekstil mengalami penurunan dari kondisi awal yaitu 9 menjadi 7 setelah proses filtrasi. Nilai tersebut menunjukkan bahwa media filtrasi tidak hanya berperan dalam menghilangkan kontaminan tetapi juga mampu menstabilkan keasaman limbah yang lebih netral²⁰. Parameter *Total Suspended Solid* (TSS) memperlihatkan penurunan yang sangat tinggi dari konsentrasi awal sebesar 6,7 mg/L menjadi 0,2 mg/L setelah filtrasi. Tingginya efisiensi penurunan nilai TSS ini memperlihatkan bahwa kombinasi lapisan media filtrasi model A : media zeolit kasar, zeolit halus, *fly ash*, dan kapas mampu bekerja secara efektif dalam menahan partikel tersuspensi melalui mekanisme penyaringan bertingkat (*multistage filtration*).

kecil dan kapas menyaring partikel yang lebih kecil, sedangkan POFA berkontribusi dalam mengadsorpsi

partikel halus dan senyawa terlarut yang masih tersisa di dalam limbah. Selanjutnya, parameter kromium (Cr) total hasil pengujian berhasil membuktikan bahwa sistem filtrasi yang dikembangkan memiliki kemampuan yang sangat baik dalam menyisihkan logam berat dari konsentrasi awal 0,765 mg/L menjadi 0,065 mg/L. Efisiensi penurunan yang tinggi ini terkait dengan karakteristik zeolit yang mempunyai kapasitas tukar ion yang besar serta kandungan silika dan alumina serta luas permukaan spesifik dari POFA yang cukup tinggi¹⁶. Kedua media ini menyediakan situs aktif yang memungkinkan terjadinya adsorpsi ion logam secara efektif. Selain menunjukkan kinerja pengolahan limbah cair yang baik, pemanfaatan POFA sebagai media adsorben juga memberikan nilai tambah terhadap limbah industri kelapa sawit dan mendukung penerapan prinsip ekonomi sirkular serta pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Media filtrasi POFA dan zeolit telah dapat mengurangi kadar logam berat dalam limbah tekstil dengan hasil rata-rata penurunan kadar logam berat mencapai 85% di mana parameter yang dicapai adalah pH = 7, TSS 0,2 mg/L dan kadar logam berat Cr 0,065 mg/L dengan urutan variasi lapisan model A yaitu (1) untuk Zeolit Besar, (2) Zeolit Kecil, (3) POFA, dan (4) Kapas.

Saran

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebaiknya dilakukan uji BOD dan COD untuk menambah data keefektifan filtrasi dengan media POFA dan zeolit. serta dilakukan juga karakterisasi awal bahan baku POFA dan zeolit alam yang digunakan sebagai media filtrasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Politeknik ATI Padang yang telah memfasilitasi sarana dan prasarana dalam melaksanakan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Balaguru, S., Murali, V., Chellapandi, P. & Gupta, M. Effect of dilution on micro hardness of Ni–Cr–B–Si alloy hardfaced on austenitic stainless steel plate for sodium-cooled fast reactor applications. *Nucl. Eng. Technol.* 52, 589–596 (2020).
2. Atikah, W. S., Umam, K. & Permana, S. Pemanfaatan PTC (Polytitanium Tetrachloride) sebagai Alternatif Koagulan dalam Dekolorisasi Limbah Tekstil. *Texere* 1, (2026).
3. Wahjuni, N. S. Toksisitas dari Logam-Logam Berat dalam Limbah Cair Industri Tekstil. *EKUILIBRIUM* 1, 39–42 (2021).
4. Zhang, Y., Shaad, K., Vollmer, D. & Ma, C. Treatment of textile wastewater using advanced oxidation processes—a critical review. *Water (Switzerland)* 13, 3515 (2021).
5. Donkadokula, N. Y., Kola, A. K., Naz, I. & Saroj, D. A review on advanced physico-chemical and biological textile dye wastewater treatment techniques. *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology* 2020 193 19, 543–560 (2020).
6. Ani, F. N., Junoh, M. M., Muis, Z. A. & Bahru, J. Granular-Activated Carbon from Mukah Coal Using Carbon Dioxide Activation. 75, 2180–3722 (2015).
7. Wardani, A. P., Dwi Maulidz, S., Takwanto, A. & Yulianto, E. Jurusan Teknik Kimia Diterima: 26 Januari 2021 Politeknik Negeri Malang Disetujui: 11 Februari. *Jl. Soekarno-Hatta* 2021, 51–57 (2021).
8. Assegaf, M. H., Rosyani, R. & ALAMSYAH, Z. Analisis Pemanfaatan Limbah Abu Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Dalam Menurunkan Logam Besi (Fe) Pada Air Asam Tambang. (2024).
9. Ahmad Aftab, R. et al. Green Technology Approach Towards the Removal of Heavy Metals, Dyes, and Phenols from Water Using Agro-based Adsorbents: A Review. *Chem. - An Asian J.* 19, e202400154 (2024).
10. Halim, M., Ismail, S., Dalang, S., Syam, S. & Izhar, S. A Study on Zeolite Performance in Waste Treating Ponds for Treatment of Palm Oil Mill Effluent. *J. Water Resour. Prot.* 18–27 (2013) doi:10.4236/jwarp.2013.57A004.
11. Lestari, I., Azira, A. & Farid, F. Adsorption of Remazol Brilliant Blue Dye Using Palm Oil Shell Fly Ash HCl Activated. *al-Kimiya* 10, 114–122 (2023).
12. Oktaviany, H. Sintesis Zeolit X dari Fly Ash Boiler Pabrik Kelapa Sawit sebagai Adsorben Pemurnian Biodiesel. *Sang Pencerah J. Ilm. Univ. Muhammadiyah But.* 8, 430–443 (2022).
13. Sylvia, N., Dewi, R., Ishak, I., Janni, M. & Putri, M. A. Utilization of Fly Ash Palm Oil Mill Waste as an Adsorbent of Methylene Blue in a Fixed Bed Column System by Using Response Surface Methodology. *J. Bahan Alam Terbarukan* 13, 28–37 (2024).
14. Rosyida, A. Bottom ash Limbah Batubara sebagai Media Filter yang Efektif pada Pengolahan Limbah Cair Tekstil. *J. Rekayasa Proses* 5, 56–61 (2013).
15. Nirmala, D. et al. Pemanfaatan Limbah Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Sebagai Adsorben Low-Cost untuk Pemucatan Crude Palm Oil. *J. Integr. Proses* 13, 153–159 (2024).
16. Pelita, E., Youfa, R., Sahaq, A. B., Levi, R. & Miftahurrahmah, M. Pengaruh Penambahan Dolomit Terhadap Performa Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Pada Proses Adsorpsi Methylene Blue. *Indones. J. Chem. Anal.* 06, 63–74 (2023).

17. Ayuningsih, B., Yuniarto, A. & Zuhri, S. The Use of Fly Ash and Bottom Ash to Reduce COD, TSS, and Color in Textile Industry Wastewater Effluent. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 1250, 012009 (2023).
18. Politaeva, N. et al. Cotton Fiber and Carbon Materials Filters for Efficient Wastewater Purification. Int. J. Technol. 11, 1608–1617 (2020).
19. Ahson Aslam, M. M. et al. Performance Evaluation of Trickling Filter-Based Wastewater Treatment System Utilizing Cotton Sticks as Filter Media. Pol. J. Environ. Stud 26, 1955–1962 (2017).
20. Jadaa, W. Wastewater Treatment Utilizing Industrial Waste Fly Ash as a Low-Cost Adsorbent for Heavy Metal Removal: Literature Review. Clean Technol. 2024, Vol. 6, Pages 221-279 6, 221–279 (2024).