

Potensi *Fly Ash* dan *Bottom Ash* (FABA) sebagai Bahan Adsorben untuk Mengatasi Pencemaran Zat Warna Sintetis di Limbah Industri

Budi Setya Wardhana¹, Farrah Fadhilah Hanum^{1*}, Rimadina Sukmasuci Lestari¹,
Dheka Esti Rahayu¹, Mar'atu Roisa Amini²

¹ Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Bantul, Yogyakarta, 55191, Indonesia

² Magister Teknik Kimia, Faculty of Natural and applied sciences, Suleyman Demirel University. Çünür, Süleyman Demirel Cd., 32260 Merkez/Isparta, Türkiye

*Corresponding Author : farrah.hanum@che.uad.ac.id

Abstrak

Pertumbuhan industri tekstil yang pesat telah menyebabkan peningkatan limbah cair yang mengandung zat pewarna sintetis. Zat pewarna ini dikenal sulit terurai serta berdampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Berbagai metode pengolahan limbah telah dikembangkan, salah satunya adalah metode adsorpsi yang dinilai efisien dan ramah lingkungan. FABA yang merupakan limbah padat dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), kini tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3 dan berpotensi dimanfaatkan sebagai material adsorben. Artikel ini mengkaji karakteristik FABA, efektivitasnya dalam mengadsorpsi zat pewarna, serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerjanya. Hasil kajian menunjukkan bahwa FABA mampu menurunkan konsentrasi zat pewarna seperti *Rhodamine B* (RhB), *Direct Blue 78* (DB 78), *Crystal Violet* (CV), dan *Direct Fast Scarlet 4BS* (DFC 4BS) secara signifikan, dengan efisiensi penyisihan mencapai lebih dari 90%. Pemanfaatan FABA sebagai adsorben tidak hanya menawarkan solusi pengolahan limbah cair industri yang lebih ekonomis dan berkelanjutan, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah padat PLTU. Kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi pengolahan limbah industri yang lebih ramah lingkungan di masa depan.

Kata kunci: zat pewarna, adsorpsi, adsorben, FABA, lingkungan

Abstract

The rapid growth of the textile industry has led to an increase in liquid waste containing synthetic dyes. These dyes are known to be difficult to decompose and have a negative impact on the environment and human health. Various waste treatment methods have been developed, one of which is the adsorption method, which is considered efficient and environmentally friendly. FABA, which is solid waste from Steam Power Plants (PLTU), is no longer categorized as hazardous waste (B3) and has the potential to be utilized as an adsorbent material. This article examines the characteristics of FABA, its effectiveness in adsorbing dyes, and the factors that influence its performance. The study results show that FABA is capable of significantly reducing the concentration of dyes such as *Rhodamine B* (RhB), *Direct Blue 78* (DB 78), *Crystal Violet* (CV), and *Direct Fast Scarlet 4BS* (DFC 4BS), with removal efficiencies reaching over 90%. The utilization of FABA as an adsorbent not only offers a more economical and sustainable solution for industrial liquid waste treatment but also contributes to the reduction of solid waste from coal-fired power plants. This study is expected to serve as a reference in the development of more environmentally friendly industrial waste treatment technologies in the future.

Keywords : dyes, adsorption, adsorbent, FABA, environment

PENDAHULUAN

Pertumbuhan industri, khususnya sektor tekstil, telah meningkatkan volume air limbah

yang mengandung zat pewarna (Periyasamy, 2024). Limbah cair ini umumnya terdiri dari polutan organik dan anorganik, dengan dominasi zat pewarna yang berpotensi mencemari lingkungan (Olisah et al., 2021). Dalam proses produksinya, industri lebih banyak menggunakan pewarna sintetis karena sifatnya yang praktis dan tahan lama (Mabuza et al., 2023). Pewarna sintetis memang menawarkan berbagai keunggulan seperti variasi warna, kestabilan, dan efisiensi biaya, tetapi juga menimbulkan risiko lingkungan dan kesehatan karena sifatnya yang non-biodegradable (Islam et al., 2025; Khan & Borah, 2024; P. O. Oladoye et al., 2022). Upaya untuk mengganti pewarna sintetis dengan pewarna alami dari tanaman atau mikroorganisme telah dilakukan, namun aplikasinya dalam industri masih terbatas (Affat, 2008; Kusumlata et al., 2024; Pizzicato et al., 2023). Oleh karena itu, berbagai teknologi pengolahan limbah dikembangkan, termasuk koagulasi-flokulasi, filtrasi membran, fotokatalisis, dan adsorpsi (Benosmane et al., 2022; Khan et al., 2024; Luo et al., 2019; Wardhana, Musnamar, et al., 2024). Di antara metode tersebut, adsorpsi dianggap paling efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan (Satyam & Patra, 2024).

Adsorpsi merupakan proses di mana ion atau molekul (adsorbat) dari fase gas atau cair terikat pada permukaan padat berpori (adsorben) akibat ketidakseimbangan gaya tarik (Mahmood Aljamali et al., 2021; Pal et al., 2023). Proses ini membentuk lapisan adsorbat yang terakumulasi di permukaan adsorben (Costa et al., 2020). Pemilihan adsorben perlu mempertimbangkan ketersediaan, efektivitas, dan biaya, mengingat tingginya volume limbah industri (Jadaa, 2024; Younas et al., 2021). Salah satu material potensial adalah abu batubara atau *fly ash* dan *bottom ash* (FABA), limbah padat dari PLTU (Hanum et al., 2024; Wardhana, Hanum, et al., 2024). Berdasarkan PP RI No. 22 Tahun 2021, FABA dari PLTU tidak lagi dikategorikan sebagai limbah B3, sehingga membuka peluang pemanfaatannya sebagai adsorben (Sutrisno et al., 2023). Penelitian menunjukkan FABA efektif untuk mendegradasi zat pewarna seperti *Rhodamine 6G*, *Metilen Blue*, dan *Malachite green* (Dash

et al., 2018). Artikel ini bertujuan mengkaji potensi pemanfaatan FABA sebagai adsorben untuk menghilangkan zat pewarna dalam limbah cair industri, mencakup karakteristik FABA, efektivitasnya, serta faktor-faktor yang memengaruhi kinerjanya.

KARAKTERISTIK ZAT PEWARNA DALAM LIMBAH INDUSTRI

Zat pewarna sintetis dalam limbah industri, khususnya dari industri tekstil, merupakan kelompok senyawa organik yang banyak digunakan karena warna yang cerah dan tahan lama. Namun, zat pewarna ini memiliki sifat kimia yang berbahaya, toksisitas tinggi, dan dampak negatif signifikan terhadap lingkungan serta kesehatan manusia.

Jenis-jenis Pewarna Sintetis Umum

Zat pewarna diklasifikasikan berdasarkan struktur kimia dan aplikasi. Pewarna azo, yang mengandung gugus azo ($-N=N-$), mencakup sekitar 80% pewarna industri karena mudah disintesis dan memiliki spektrum warna luas (Kishor et al., 2021; Hagan & Poulin, 2021). Pewarna sulfur ekonomis dan tahan luntur, cocok untuk serat selulosa meski warnanya kurang cerah (Hagan & Poulin, 2021; Slama et al., 2021). Pewarna antrakuinon memiliki stabilitas tinggi dan warna merah hingga ungu (Duval et al., 2016; Hagan & Poulin, 2021). Pewarna trifenilmetana digunakan karena warnanya yang cerah dan struktur aromatik kompleks (Thetford, 2000; Y. Li et al., 2025).

Dalam aplikasinya, pewarna dipilih berdasarkan jenis serat. Pewarna asam cocok untuk wol dan nilon dalam kondisi asam (Shen et al., 2024; Omotosho & Ameuru, 2019). Pewarna dasar menempel pada serat bermuatan negatif seperti akrilik (Kumar et al., 2021). Pewarna langsung digunakan pada kapas secara ekonomis (Wei et al., 2022). Pewarna dispersi cocok untuk poliester (Al-etaibi & El-apasery, 2023). Pewarna reaktif membentuk ikatan kovalen dengan serat (Patel et al., 2023), sedangkan pewarna vat dan mordant digunakan untuk pewarnaan tahan lama dengan proses reduksi dan tambahan mordant (Patra et al., 2018; Repon et al., 2024; Freeman, 2018).



Gambar. 1. Berbagai Pewarna dan Aplikasinya

Gambar 1 menunjukkan berbagai macam pewarna sintetis beserta aplikasinya dalam berbagai bidang, seperti industri tekstil, plastik, makanan, dan farmasi. Pewarna sintetis ini disintesis melalui proses kimia tertentu untuk menghasilkan warna yang stabil, tahan lama, dan sesuai dengan kebutuhan fungsional maupun estetika dari produk akhir.

Sifat Kimia dan Toksisitas

Zat pewarna dalam limbah industri tekstil memiliki struktur kimia kompleks dan toksisitas tinggi. Pewarna sintetis seperti methylene blue dan Congo red bersifat persisten, sulit terurai, dan berbahaya bagi kesehatan serta lingkungan (Lan et al., 2021). Limbah pewarna sering mengandung logam berat (kromium, timbal, kadmium, dll.) serta senyawa seperti nitrat dan asam asetat yang menambah toksisitasnya (Al., 2016; P. Oladoye et al., 2022). Pewarna ini bisa bersifat kationik atau anionik, memengaruhi interaksinya di lingkungan (Haque et al., 2022; P. Oladoye et al., 2022). Beberapa bersifat toksik, karsinogenik, mutagenik, menyebabkan iritasi kulit dan gangguan kesehatan lainnya (Al-Tohamy et al., 2022; Garg & Chopra, 2021; Ismail et al., 2019). Di lingkungan perairan, pewarna menghambat fotosintesis, merusak ekosistem, dan dapat terakumulasi dalam rantai makanan (Lin et al., 2023; P. Oladoye et al., 2022). Oleh karena itu, pengelolaan limbah pewarna sangat krusial.

Dampak Terhadap Lingkungan Dan Kesehatan

Zat pewarna sintetis yang banyak digunakan di industri tekstil memiliki struktur kimia kompleks dan sangat stabil, sehingga sulit terurai secara alami dan sering dibuang tanpa pengolahan memadai ke badan air atau digunakan untuk irigasi, yang berdampak buruk pada ekosistem dan kesehatan manusia (Al-Tohamy et al., 2022; Lin et al., 2023). Limbah ini menyebabkan perubahan warna air, menghambat penetrasi cahaya, serta mengganggu fotosintesis tanaman air. Selain itu, peningkatan kebutuhan oksigen biokimia dan kimia menurunkan kualitas air (Al-Tohamy et al., 2022).

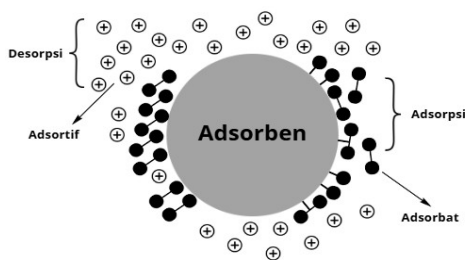
Limbah pewarna juga mengandung logam berat seperti tembaga, arsen, timbal, kadmium, merkuri, dan kobalt, serta asam dan bahan kimia tambahan lain, yang menjadikannya sangat toksik (Al., 2016; Manzoor & Sharma, 2020). Zat pewarna dan turunannya bersifat karsinogenik, mutagenik, dan teratogenik, serta dapat menyebabkan iritasi, alergi, bahkan kanker (Al-Tohamy et al., 2022; Ramamurthy et al., 2024). Penggunaan limbah ini untuk irigasi juga menyumbat pori tanah dan menurunkan produktivitas lahan (Manzoor & Sharma, 2020).

Pengelolaan limbah pewarna memerlukan teknologi ramah lingkungan seperti adsorpsi, filtrasi membran, oksidasi lanjutan, dan metode biologis (Lin et al., 2023; Slama et al., 2021; Tripathi et al., 2023), serta

regulasi ketat dan pengembangan pewarna yang lebih aman (Al., 2016; Lin et al., 2023).

MEKANISME PROSES ADSORPSI DALAM DEGRADASI ZAT PEWARNA

Adsorpsi adalah proses di mana molekul zat (adsorbat), seperti pewarna, menempel pada permukaan padatan (adsorben) tanpa masuk ke dalam struktur internalnya (Shi et al., 2022). Proses ini berbeda dengan absorpsi, di mana zat diserap ke dalam volume material (Haleem et al., 2023). Adsorpsi banyak digunakan untuk menghilangkan pewarna karena efisiensinya yang tinggi dan kemudahan regenerasi adsorben (Uddin et al., 2021). Setelah memahami konsep dasar adsorpsi sebagai proses penempelan ion atau molekul pada permukaan material adsorben, selanjutnya akan dijelaskan mekanisme adsorpsi secara lebih rinci melalui gambar 2. Gambar ini menggambarkan tahapan interaksi antara ion logam dan permukaan adsorben yang menunjukkan bagaimana proses adsorpsi berlangsung pada tingkat molekuler.



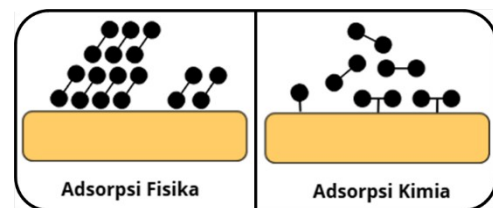
Gambar. 2. Mekanisme Adsorpsi Secara Umum

Mekanisme Adsorpsi Secara Fisika dan Kimia

Adsorpsi secara fisika (fisikadsorpsi) adalah proses di mana molekul atau ion menempel pada permukaan adsorben melalui gaya-gaya fisik tanpa pembentukan ikatan kimia (Dhaouadi et al., 2021). Mekanisme ini sangat penting dalam pemurnian air, penghilangan polutan, dan berbagai aplikasi lingkungan serta industri (Vidali et al., 1991). Adsorpsi secara kimia (kimisorpsi) adalah proses di mana molekul atau ion menempel pada permukaan adsorben melalui pembentukan ikatan kimia (J. Li et al., 2024). Mekanisme ini sangat penting dalam penghilangan polutan, pemurnian air, dan aplikasi lingkungan lainnya karena menghasilkan ikatan yang kuat dan selektif

antara adsorbat dan adsorben (Calatayud et al., 2003; Chang et al., 2024).

Mekanisme adsorpsi dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu adsorpsi fisika (physisorption) dan adsorpsi kimia (chemisorption). Gambar 3 menyajikan ilustrasi perbedaan fundamental antara kedua mekanisme tersebut, mencakup jenis interaksi yang terjadi, kekuatan ikatan, serta karakteristik energi yang terlibat dalam proses adsorpsi.



Gambar. 3. Mekanisme Adsorpsi Fisika dan Adsorpsi Kimia

Parameter yang Memengaruhi Proses Adsorpsi

Proses adsorpsi dipengaruhi oleh berbagai parameter penting. Salah satunya adalah pH larutan, yang memengaruhi muatan permukaan adsorben dan bentuk ionik adsorbat. Umumnya, pH rendah efektif untuk zat anionik, sedangkan pH tinggi untuk zat kationik (Takam et al., 2020). Dosis adsorben juga berpengaruh—semakin besar dosis, semakin banyak situs aktif tersedia (N'diaye et al., 2022). Waktu kontak lebih lama meningkatkan efisiensi adsorpsi hingga tercapai kesetimbangan (Takam et al., 2020; N'diaye et al., 2022). Konsentrasi awal adsorbat turut memengaruhi kapasitas adsorpsi hingga jenuh (Takam et al., 2020). Sifat fisik dan kimia adsorben seperti ukuran partikel, luas permukaan, morfologi, dan gugus fungsional turut berperan (Calvet, 1989). Interaksi juga dipengaruhi oleh karakteristik adsorbat seperti ukuran molekul, kelarutan, dan hidrofobisitas (Muthukkumaran & Aravamudan, 2017), serta keberadaan ion lain dalam larutan (Müller et al., 2024).

FABA merupakan limbah padat dari pembakaran batubara, terutama dari PLTU (Zhou et al., 2022). Partikelnya bervariasi dari halus hingga kasar, menyerupai abu atau pasir, dengan warna abu-abu kehitaman tergantung kadar karbon (Bhatt et al., 2019). Densitasnya 1,20–2,80 g/cm³ dan luas permukaannya tinggi (17,64–60 m²/kg), menjadikannya material

potensial untuk adsorpsi (Eteba et al., 2023; Hussain et al., 2019; Singh & Bhardwaj, 2020). Teksturnya yang ringan dan berpori mendukung efektivitas penyisihan zat pewarna sintetis dari limbah cair industri. Untuk menilai potensi FABA sebagai material

adsorben, dilakukan perbandingan karakteristik dengan beberapa adsorben umum lainnya, yaitu karbon aktif, zeolit, dan nanotube karbon. Perbandingan ini mencakup aspek teknis, ekonomi, dan ketersediaan bahan, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Berbagai Jenis Adsorben

Parameter	FABA	Karbon Aktif	Zeolit	Nanotube Karbon
Luas Permukaan	Sedang-Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi
Kapasitas Adsorpsi	Sedang-Tinggi	Tinggi	Tinggi	Sangat Tinggi
Biaya	Sangat Murah	Murah-Mahal	Murah	Sangat Mahal
Ketersediaan	Melimpah	Melimpah	Melimpah	Terbatas
Keunggulan	Limbah bernilai ekonomi	Serbaguna dan efektif	Struktur pori teratur	Konduktivitas tinggi
Kelemahan	Perlu modifikasi	Biaya tinggi untuk kualitas premium	Kapasitas terbatas	Toksik potensial dan mahal

Berdasarkan Tabel 1, FABA memiliki potensi besar sebagai adsorben murah dan melimpah, dengan kapasitas adsorpsi cukup baik dan masih dapat ditingkatkan melalui modifikasi. Dibanding karbon aktif atau nanotube karbon yang mahal dan terbatas, FABA lebih ekonomis dan ramah lingkungan karena merupakan limbah industri bernilai guna. Dengan pengolahan tepat, FABA dapat menjadi solusi adsorben yang efektif dan berkelanjutan. Komposisi kimianya ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Kimia Utama FABA

No	Komponen	Komposisi (%)
1	SiO ₂	50,2 - 52,2
2	Al ₂ O ₃	28,9 - 27,5
3	Fe ₂ O ₃	4,7 - 6,0
4	CaO	5,0 - 5,9

Sumber : (Imran et al., 2024)

Berdasarkan komposisi kimianya, FABA (fly ash dan bottom ash) mengandung

berbagai senyawa logam oksida seperti silika (SiO₂), alumina (Al₂O₃), besi oksida (Fe₂O₃), dan kalsium oksida (CaO). Senyawa-senyawa ini berperan penting dalam memberikan sifat aktif pada permukaan FABA, memungkinkan terjadinya interaksi fisik dan kimiawi dengan berbagai zat pencemar, termasuk senyawa pewarna dalam air limbah industri. Permukaan FABA yang bersifat poros serta mengandung gugus fungsional oksida memungkinkan proses adsorpsi berlangsung secara efektif. Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa FABA memiliki kemampuan yang signifikan dalam mengadsorpsi dan mendegradasi zat pewarna sintetis seperti Rhodamine B, Metilen Blue, dan Malachite Green. Efektivitas FABA dalam menghilangkan pewarna sangat dipengaruhi oleh kondisi proses seperti pH, waktu kontak, dan konsentrasi awal pewarna. Tabel 3 menyajikan ringkasan berbagai hasil studi terdahulu yang menunjukkan potensi besar FABA sebagai bahan adsorben limbah cair industri.

Tabel 3. Ringkasan kondisi adsorpsi berbagai zat warna oleh adsorben berbasis FABA

Zat Warna	Metode	pH	Waktu (jam)	Dosis (gr)	C ₀ (ppm)	Efisiensi (%)	Referensi
<i>Methylene Blue (MB)</i>	Aktivasi Fisika	5	1	0,5	40	~90	(Borhade et al., 2017)
<i>Rhodamine B (RhB)</i>	Aktivasi Kimia	4	2	0,5	100	95	(Balji & Kumar, 2023)
<i>Congo Red (CR)</i>	Aktivasi Kimia	2	24	0,1	100	92	(Abas & Fathy, 2024)
<i>Methyl Violet (MV)</i>	Aktivasi Kimia	9	4	1	100	90	(Astuti et al., 2019)
<i>Direct Blue 78 (DB78)</i>	Aktivasi Kimia	8,6	0,5	4	30	97,5	(Eteba et al., 2023)
<i>Crystal Violet (CV)</i>	Aktivasi Kimia	9	1	0,01	10	97,5	(Nadeem et al., 2024)

<i>Direct Fast Scarlet 4BS (DFC 4BS)</i>	Aktivasi Kimia	9	2	0,05	100	96	(Hussain et al., 2022)
<i>Direct Sky Blue 5B (DSB 5B)</i>	Aktivasi Kimia	9	2	0,05	100	93,8	(Hussain et al., 2022)

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 3, dapat disimpulkan bahwa secara umum efisiensi adsorpsi FABA terhadap zat pewarna tergolong tinggi, dengan rata-rata nilai efisiensi mencapai lebih dari 90%. Temuan ini menunjukkan bahwa FABA memiliki potensi sebagai material adsorben dalam pengolahan limbah cair industri yang mengandung senyawa pewarna. Namun, tingkat efisiensi adsorpsi tersebut tidak terlepas dari berbagai faktor yang memengaruhi kinerja FABA. Salah satu faktor utama adalah kondisi operasi selama proses adsorpsi, seperti pH, suhu, waktu kontak, dan dosis adsorben (Anggorowati et al., 2022). Setiap jenis zat pewarna memiliki karakteristik kimia yang berbeda, sehingga memerlukan kondisi operasi yang spesifik untuk mencapai efisiensi optimal (Affat, 2008). Selain itu, efisiensi adsorpsi juga dapat ditingkatkan melalui berbagai metode aktivasi FABA, baik secara fisika maupun kimia. Proses aktivasi ini bertujuan untuk meningkatkan luas permukaan spesifik dan mengembangkan struktur pori, sehingga memperbesar kapasitas FABA dalam menangkap molekul-molekul pewarna dari larutan (Kurniasih et al., 2025). Dengan demikian, kombinasi antara pemilihan kondisi operasi yang tepat dan penerapan metode aktivasi yang sesuai dapat secara signifikan meningkatkan efektivitas FABA sebagai adsorben dalam proses penyisihan zat pewarna dari air limbah industri.

TANTANGAN DAN ARAH PENGEMBANGAN KE DEPAN

Ketersediaan FABA di Indonesia sangat melimpah, diperkirakan antara 3,63 hingga 5,19 juta ton per tahun. Pada 2019, sektor MEOG (Mineral, Energi, dan Oil dan Gas) menghasilkan 7,38 juta ton FABA, sementara sektor MAS (*Manufacturing and Services*) mencapai 21,76 juta ton. Berdasarkan prediksi pertumbuhan tahunan, produksi FABA dari PLTU pada 2040 diproyeksikan mencapai 3,67–5,24 juta ton (Abinawa & Gobel, 2024). FABA hasil pembakaran batu bara berkalor tinggi di PLTU dikategorikan sebagai limbah non-B3 karena tidak menunjukkan karakteristik berbahaya (Chadijah et al., 2013).

Penelitian menunjukkan FABA berpotensi besar sebagai adsorben yang lebih efektif dibandingkan karbon aktif dan zeolit. Namun, tantangan utamanya adalah variasi karakteristik FABA yang dipengaruhi jenis batubara dan proses pembakaran, serta potensi kandungan logam berat seperti arsenik dan merkuri yang dapat mencemari lingkungan (Kishor et al., 2021). Pemanfaatannya masih terbatas di skala laboratorium, sehingga dibutuhkan studi kelayakan, uji operasional nyata, serta pengembangan regulasi dari KLHK (Abinawa & Gobel, 2024). Dengan integrasi konsep ekonomi sirkular, FABA berpeluang menjadi solusi pengolahan limbah cair industri tekstil yang ramah lingkungan dan bernilai ekonomi (Haryanti, 2017).

SIMPULAN DAN SARAN

FABA memiliki potensi besar sebagai material adsorben dalam pengolahan limbah cair industri yang mengandung zat pewarna sintesis. Pemanfaatan FABA mampu menurunkan konsentrasi zat pewarna secara signifikan, sehingga dapat mengurangi dampak negatif limbah terhadap lingkungan dan kesehatan. Selain itu, penggunaan FABA sebagai adsorben mendukung prinsip ekonomi sirkular dengan memanfaatkan limbah padat PLTU menjadi produk bernilai guna. Nilai efisiensi penyisihan zat pewarna yang didapatkan diatas 90% Dengan demikian, FABA dapat menjadi solusi inovatif, efisien, dan ramah lingkungan dalam pengelolaan limbah industri, serta mendukung upaya pengurangan limbah padat di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abas, K. M., & Fathy, N. A. (2024). Sodalite zeolitic materials produced from coal fly ash for removal of congo red dye from aqueous solutions. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 5165–5184. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05347-0>
- Abinawa, C., & Gobel, A. P. (2024). Studi Pengolahan Limbah Fly Ash Batubara dalam Upaya Peningkatan Konsentrasi

- Silika Menggunakan Asam Sitrat. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*.
<https://doi.org/10.55123/insologi.v3i3.3519>
- Affat, S. S. (2008). Classifications, Advantages, Disadvantages, Toxicity Effects of Natural and Synthetic Dyes: A review. *University of Thi-Qar Journal of Science*, 8(1), 130–135.
<http://doi.org/10.32792/utq/utjsci/v8/1/21>
- Al-etaibi, A. M., & El-apasery, M. A. (2023). Can Novel Synthetic Disperse Dyes for Polyester Fabric Dyeing Provide Added Value?. *Polymers*, 15(8), 1845.
<https://doi.org/10.3390/polym15081845>
- Al-Tohamy, R., Ali, S., Li, F.-C., Okasha, K., Mahmoud, Y., 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.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Al., A. G. et. (2016). Colorants in Health and Environmental Aspects. *Dyes and Pigments*, 69–83.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7>
- Anggorowati, H., Perwitasari, & Lestari, I. (2022). Manik Komposit Abu Layang Batu Bara – Alginat untuk Menghilangkan Rhodamine B Fly Ash – Alginate Composites Beads for Rhodamine B Removal. *Eksergi*, 19(3), 160–164.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31315/e.v19i3.8199>
- Aspland, J. (1992). A Series on Dyeing Chap.3, Part I; Vat Dyes and Their Application. *Textile Chemist and Colorist*, 24.
<https://consensus.app/papers/a-series-on-dyeing-chap3-part-i-vat-dyes-and-their-aspland/f0a46fa9cea25671887ec3c66c9d72e1/>
- Astuti, W., Chafidz, A., Wahyuni, E. T., Prasetya, A., Bendiyasa, I. M., & Abasaeed, A. E. (2019). Methyl violet dye removal using coal fly ash (CFA) as a dual sites adsorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103262>
- Balji, G. B., & Kumar, P. S. (2023). Sulphuric Acid-Modified Coal Fly Ash for the Removal of Rhodamine B Dye from Water Environment: Isotherm, Kinetics, and Thermodynamic Studies. *Adsorption Science and Technology*, 1(2808794), 1–15.
<https://doi.org/10.1155/2023/2808794>
- Benli, H. (2024). Bio-mordants: a review. *Environmental Science and Pollution Research International*, 31, 20714–20771.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32174-8>
- Benosmane, N., Boutemour, B., Hamdi, S. M., & Hamdi, M. (2022). Removal of methylene blue dye from aqueous solutions using polymer inclusion membrane technology. *Applied Water Science*, 12(5), 1–11.
<https://doi.org/10.1007/s13201-022-01627-1>
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., & Acharath, A. (2019). Physical , chemical , and geotechnical properties of coal fl y ash : A global review. *Case Studies in Construction Materials*, 11, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00263>
- Borhade, A. V., Kshirsagar, T. A., & Dholi, A. G. (2017). Eco-Friendly Synthesis of Aluminosilicate Bromo Sodalite from Waste Coal Fly Ash for the Removal of Copper and Methylene Blue Dye. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, 4479–4491.
<https://doi.org/10.1007/s13369-017-2759-9>
- Calatayud, M., Markovits, A., Ménétrey, M., Mguig, B., & Minot, C. (2003). Adsorption on perfect and reduced surfaces of metal oxides. *Catalysis Today*, 85, 125–143.

- [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(03\)00381-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(03)00381-X)
- Calvet, R. (1989). Adsorption of organic chemicals in soils. *Environmental Health Perspectives*, 83, 145–177. <https://doi.org/10.1289/EHP.8983145>
- Chadijah, S., Ilyas Jurusan Kimia, A., Sains dan Teknologi, F., & Alauddin Makassar, U. (2013). Analisa Penurunan Kadar Cod Dan Bod Limbah Cair Laboratorium Biokimia Uin Makassar Menggunakan Fly Ash (Abu Terbang) Batubara. *Jurnal Penelitian Sains Kimia*, 1(1), 64–75. <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v1i1.1622>
- Chang, Z., Lu, C., Bai, L., Guo, N., Xing, Z., & Yan, Y. (2024). Removal of Cd²⁺ and Pb²⁺ from an Aqueous Solution Using Modified Coal Gangue: Characterization, Performance, and Mechanisms. *Journal Processes*, 12(10), 2095. <https://doi.org/10.3390/pr12102095>
- Costa, T. B. da, Silva, M. G. C. da, & Vieira, M. G. A. (2020). Recovery of rare-earth metals from aqueous solutions by bio/adsorption using non-conventional materials: a review with recent studies and promising approaches in column applications. *Journal of Rare Earths*, 38(4), 339–355. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jre.2019.06.001>
- Dash, S., Chaudhuri, H., Gupta, R., & Nair, U. G. (2018). Adsorption study of modified coal fly ash with sulfonic acid as a potential adsorbent for the removal of toxic reactive dyes from aqueous solution: Kinetics and thermodynamics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(5), 5897–5905. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.017>
- Dhaouadi, F., Sellaoui, L., Reynel-Ávila, H., Landín-Sandoval, V., Mendoza-Castillo, D., Jaime-Leal, J., Lima, E., Bonilla-Petriciolet, A., & Lamine, A. (2021). Adsorption mechanism of Zn²⁺, Ni²⁺, Cd²⁺, and Cu²⁺ ions by carbon-based adsorbents: interpretation of the adsorption isotherms via physical modelling. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 30943–30954. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12832-x>
- Duval, J., Pecher, V., Poujol, M., & Lesellier, E. (2016). Research advances for the extraction, analysis and uses of anthraquinones: A review. *Industrial Crops and Products*, 94, 812–833. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.09.056>
- Eteba, A., Bassyouni, M., & Saleh, M. (2023). Utilization of chemically modified coal fly ash as cost - effective adsorbent for removal of hazardous organic wastes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(7), 7589–7602. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04457-5>
- Fourness, R. (2008). The Disperse Dyes — Their Development and Application. *Journal of The Society of Dyers and Colourists*, 72, 513–527. <https://doi.org/10.1111/J.1478-4408.1956.TB02113.X>
- Freeman, H. S. (2018). Mordant dye application on cotton : optimisation and combination with natural Coloration Technology. December. <https://doi.org/10.1111/cote.12288>
- Garg, A., & Chopra, L. (2021). Dye Waste: A significant environmental hazard. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.003>
- Hagan, E., & Poulin, J. (2021). Statistics of the early synthetic dye industry. *Heritage Science*, 9(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00493-5>
- Haleem, A., Shafiq, A., Chen, S.-Q., & Nazar, M. (2023). A Comprehensive Review on Adsorption, Photocatalytic and Chemical Degradation of Dyes and Nitro-Compounds over Different Kinds of Porous and Composite Materials. *Molecules*, 28. <https://doi.org/10.3390/molecules28031081>

- Hanum, F. F., Salamah, S., Sanuhung, A. R., & Wardhana, B. S. (2024). Study On The Potential Contamination Of Heavy Metals: Analysis Of Cr And Pb Contents From Power Plants. *Jurnal Sains Natural*, 14(1), 53–61. <https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.689>
- Haque, A., Sultana, N., Sayem, A., & Smriti, S. (2022). Sustainable Adsorbents from Plant-Derived Agricultural Wastes for Anionic Dye Removal: A Review. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su141711098>
- Haryanti, N. H. (2017). Uji Abu Terbang Pltu Asam Asam Sebagai Bahan Pembuatan Bata Ringan. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 11(2), 127–137. <http://dx.doi.org/10.20527/flux.v11i2.2675>
- Hussain, M., Tufa, L. D., Yusup, S., & Zabiri, H. (2019). Characterization of Coal Bottom Ash & its Potential to be used as Catalyst in Biomass Gasification. *Materials Today: Proceedings*, 16, 1886–1893. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.065>
- Hussain, Z., Chang, N., Sun, J., Xiang, S., Ayaz, T., Zhang, H., & Wang, H. (2022). Modification of coal fly ash and its use as low-cost adsorbent for the removal of directive, acid and reactive dyes. *Journal of Hazardous Materials*, 422(April 2021), 126778. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126778>
- Imran, Hanum, F. F., Setya Wardhana, B., Totok, E. S., & Febriani, A. V. (2024). Karakterisasi Komposisi Kimia Dan Potensi Pemanfaatan Campuran Tanah Gambut Kalimantan Timur Dengan Fly Ash Dan Bottom Ash Untuk Pertanian. *Jurnal Crystal: Publikasi Penelitian Kimia Dan Terapannya*, 6(2), 115–123. <https://doi.org/10.36526/jc.v6i2.4250>
- Islam, M. M., Aidid, A. R., Mohshin, J. N., Mondal, H., Ganguli, S., & Chakraborty, A. K. (2025). A critical review on textile dye-containing wastewater: Ecotoxicity, health risks, and remediation strategies for environmental safety. *Cleaner Chemical Engineering*, 11(January), 100165. <https://doi.org/10.1016/j.clce.2025.100165>
- Ismail, M., Akhtar, K., Khan, M., Kamal, T., Khan, M., Asiri, A., Seo, J., & Khan, S. (2019). Pollution, Toxicity and Carcinogenicity of Organic Dyes and their Catalytic Bio-Remediation. *Current Pharmaceutical Design*. <https://doi.org/10.2174/1381612825666191021142026>
- Jadaa, W. (2024). Wastewater Treatment Utilizing Industrial Waste Fly Ash as a Low-Cost Adsorbent for Heavy Metal Removal: Literature Review. *Clean Technologies*, 6(1), 221–279. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6010013>
- Khan, S., & Borah, D. (2024). Microbial cell factories in the degradation of azo-dye and their limiting factors: An insight. *Cleaner Water*, 2(May), 100034. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2024.100034>
- Khan, S., Noor, T., Iqbal, N., & Yaqoob, L. (2024). Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review. *ACS Omega*, 9(20), 21751–21767. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00887>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Kumar, A., Dixit, U., Singh, K., Gupta, S. P., & Beg, M. J. (2021). Structure and Properties of Dyes and Pigments. *Dyes and Pigments - Novel Applications and Waste Treatment*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.97104>

- Kurniasih, M., Hidayat, N., Roto, R., & Mudasir, M. (2025). Modification of Coal Fly Ash for High Capacity Adsorption of Methylene Blue. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11(June), 101101. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101101>
- Kusumlata, Ambade, B., Kumar, A., & Gautam, S. (2024). Sustainable Solutions: Reviewing the Future of Textile Dye Contaminant Removal with Emerging Biological Treatments. *Limnological Review*, 24(2), 126–149. <https://doi.org/10.3390/limnolrev24020007>
- Lan, D., Zhu, H., Zhang, J., Li, S., Chen, Q., Wang, C., Wu, T., & Xu, M.-X. (2021). Adsorptive removal of organic dyes via porous materials for wastewater treatment in recent decades: A review on species, mechanisms and perspectives. *Chemosphere*, 133464. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133464>
- Li, J., Wei, Y., Zou, L., Li, S., & Luo, Y. (2024). Study on the Adsorption Mechanism of Cu²⁺ by ZnAl-LDH-Containing Exchangeable Interlayer Chloride Ions. *Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids*. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.4c02644>
- Li, Y., Yu, K., Li, H., Li, S., Han, J., Guo, D., Chen, S., & Pan, Q. (2025). Colorimetric Xylenol Orange: A Long-Buried Aggregation-Induced Emission Dye and Restricted Rotation for Dual-Mode Sensing of pH and Metal Ions. *Analytical Chemistry*. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.4c05819>
- Lin, J., Ye, W., Xie, M., Seo, D. H., Luo, J., Wan, Y., & Van Der Bruggen, B. (2023). Environmental impacts and remediation of dye-containing wastewater. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 785–803. <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00489-8>
- Luo, X., Liang, C., & Hu, Y. (2019). Comparison of different enhanced coagulation methods for azo dye removal from wastewater. *Sustainability*, 11(17), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su11174760>
- Mabuza, L., Sonnenberg, N., & Marx-Pienaar, N. (2023). Natural versus synthetic dyes: Consumers' understanding of apparel coloration and their willingness to adopt sustainable alternatives. *Resources, Conservation and Recycling Advances*, 18(2), 200146. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200146>
- Mahmood Aljamali, N., Abdul Baqi Aldujaili, D., & Obaid Alfatlawi, I. (2021). Physical and Chemical Adsorption and its Applications. *International Journal*, 7(2), 1–8. <https://doi.org/10.37628/IJTCK>
- Manzoor, J., & Sharma, M. (2020). Impact of Textile Dyes on Human Health and Environment. IGI Global Scientific Publishing, 162–169. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-0311-9.ch008>
- Müller, N., Kirtane, A., Schefer, R., & Mitrano, D. (2024). eDNA Adsorption onto Microplastics: Impacts of Water Chemistry and Polymer Physiochemical Properties. *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10825>
- Muthukkumaran, A., & Aravamudan, K. (2017). Combined Homogeneous Surface Diffusion Model - Design of experiments approach to optimize dye adsorption considering both equilibrium and kinetic aspects. *Journal of Environmental Management*, 204 Pt 1, 424–435. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.010>
- N'diaye, A., Kankou, M., Hammouti, B., Nandiyanto, A., & Husaeni, D. F. Al. (2022). A review of biomaterial as an adsorbent: From the bibliometric literature review, the definition of dyes and adsorbent, the adsorption phenomena and isotherm models,

- factors affecting the adsorption process, to the use of typha species waste as adsorbent. *Communications in Science and Technology*.
<https://doi.org/10.21924/cst.7.2.2022.977>
- Nadeem, H., Jamil, F., Iqbal, M. A., Nee, T. W., Kashif, M., Ibrahim, A. H., Al-Rawi, S. S., Zia, S. U., Shoukat, U. S., Kanwal, R., Ahmad, F., Khalid, S., & Rehman, M. T. (2024). Comparative study on efficiency of surface enhanced coal fly ash and raw coal fly ash for the removal of hazardous dyes in wastewater: optimization through response surface methodology. *RSC Advances*, 14(31), 22312–22325.
<https://doi.org/10.1039/d4ra04075a>
- Oladoye, P., Bamigboye, O., Ogunbiyi, O., & Akano, M. T. (2022). Toxicity and decontamination strategies of Congo red dye. *Groundwater for Sustainable Development*, 20(November), 100844.
<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100844>
- Oladoye, P. O., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., & Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16(September), 100678.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>
- Olisah, C., Adams, J. B., & Rubidge, G. (2021). The state of persistent organic pollutants in South African estuaries: A review of environmental exposure and sources. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 219, 112316.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112316>
- Omar, A., Mohamed, A., Hamed, E., El-Badry, S., & El-Atawy, M. (2024). Enhancing color brilliance and fastness of polyester dyeing with antipyrine-derived disperse dyes. *Journal of Molecular Liquids*.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.125216>
- Omotosho, O. O., & Ameuru, U. (2019). Synthesis and Dyeing Properties of Acid Dyes Derived from 1-amino-2-naphthol-4-sulphonic Acid. 4, 63.
<https://doi.org/10.11648/J.WJAC.20190404.14>
- Pal, C. A., Lingamdinne, L. P., Chang, Y.-Y., & Koduru, J. R. (2023). Chapter 13 - Carbon dots as adsorbents for removal of toxic chemicals. In *Carbon Dots in Analytical Chemistry Detection and Imaging* (pp. 161–180).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-98350-1.00007-4>
- Patel, M., Tandel, R., Sonera, S., & Bairwa, S. (2023). Trends in the synthesis and application of some reactive dyes: A review. *Brazilian Journal of Science*.
<https://doi.org/10.14295/bjs.v2i7.350>
- Patra, S., Patra, A., Ojha, P., Shekhawat, N., & Khandual, A. (2018). Vat dyeing at room temperature. *Cellulose*, 25, 5349–5359.
<https://doi.org/10.1007/s10570-018-1901-5>
- Periyasamy, A. P. (2024). Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability*, 16(2), 495–536.
<https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Pizzicato, B., Pacifico, S., Cayuela, D., Mijas, G., & Riba-Moliner, M. (2023). Advancements in Sustainable Natural Dyes for Textile Applications: A Review. *Molecules*, 28(16), 1–22.
<https://doi.org/10.3390/molecules28165954>
- Ramamurthy, K., Priya, P., Murugan, R., & Arockiaraj, J. (2024). Hues of risk: investigating genotoxicity and environmental impacts of azo textile dyes. *Environmental Science and Pollution Research International*.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-33444-1>
- Repon, M., Dev, B., Rahman, M. A., Jurkonienė, S., Haji, A., Alim, M. A., & Kumpikaitė, E. (2024). Textile dyeing using natural mordants and dyes: a review. *Environmental Chemistry*

- Letters. <https://doi.org/10.1007/s10311-024-01716-4>
- Satyam, S., & Patra, S. (2024). Innovations and challenges in adsorption-based wastewater remediation: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(9), e29573. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29573>
- Shen, Y., Zhao, S., Lv, Y., Chen, F., & Fu, L. (2024). Acid red dyes and the role of electrochemical sensors in their determination. *Microchemical Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.111705>
- Shi, Y.-J., Chang, Q., Zhang, T., Song, G., Sun, Y., & Ding, G. (2022). A Review on Selective Dye Adsorption by Different Mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108639>
- Singh, N., & Bhardwaj, A. (2020). Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement. *Construction and Building Materials*, 233, 117276. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117276>
- Slama, H. Ben, Bouket, A. C., Pourhassan, Z., Alenezi, F. N., & Silini, A. (2021). Diversity of Synthetic Dyes from Textile Industries , Discharge Impacts and Treatment Methods. *Applied Sciences*, 11(14), 6255. <https://doi.org/10.3390/app11146255>
- Sutrisno, E., Frianto, D., & Wahyudi, A. (2023). FABA: Tata Kelola dan Pemanfaatannya. *STANDAR: Better Standard Better Living*, 2(6), 5–8. <https://majalah.bsilhk.menlhk.go.id/>
- Takam, B., Tarkwa, J., Acayanka, E., Nzali, S., Chessey, D. M., Kamgang, G. Y., & Laminsi, S. (2020). Insight into the removal process mechanism of pharmaceutical compounds and dyes on plasma-modified biomass: the key role of adsorbate specificity. *Environ Sci Pollut Res* 27, 20500–20515. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08536-3>
- Thetford, D. (2000). Triphenylmethane and Related Dyes. *Encyclopedia of Chemical Technology*, 20, 672–737. <https://doi.org/10.1002/0471238961.2018091620080520.A01>
- Tripathi, M., Singh, S., Pathak, S., Kasaudhan, J., Mishra, A., Bala, S., Garg, D., Singh, R., Singh, P., Singh, P., Shukla, A., & Pathak, N. (2023). Recent Strategies for the Remediation of Textile Dyes from Wastewater: A Systematic Review. *Toxics*, 11. <https://doi.org/10.3390/toxics11110940>
- Uddin, J., Ampiauw, R. E., & Lee, W. (2021). Chemosphere Adsorptive removal of dyes from wastewater using a metal-organic framework : A review. *Chemosphere*, 284(June), 131314. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131314>
- Vidali, G., Ihm, G., Kim, H.-Y., & Cole, M. (1991). Potentials of physical adsorption. *Surface Science Reports*, 12, 135–181. [https://doi.org/10.1016/0167-5729\(91\)90012-M](https://doi.org/10.1016/0167-5729(91)90012-M)
- Wardhana, B. S., Hanum, F. F., Mufrodi, Z., & Jamilatun, S. (2024). Review : Effect Of Material Characteristics , And Process Conditions In Reducing Gaseous Pollutants Using Fly Ash (Fa) - Based Adsorbent. *Jurnal Sains Natural*, 14(4), 169–178. <https://doi.org/10.31938/jsn.v14i4>
- Wardhana, B. S., Musnamar, A. A., & Rahayu, D. E. (2024). Pengolahan Air Limbah Industri: Pendekatan Metode Adsorpsi Dalam Perspektif Islam Berkemajuan. *Jurnal Kemuhmadiyah dan Integrasi Ilmu*, 2(2), 213–225. <https://doi.org/10.24853/jkii.2.2.213-225>
- Wei, Q., Zhang, Y., Zhang, K., Mwasiagi, J., Zhao, X., Chow, C., & Tang, R. (2022). Removal of direct dyes by coagulation: Adaptability and mechanism related to the molecular structure. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 39, 1850–1862. <https://doi.org/10.1007/s11814-021-1056-1>

Younas, F., Mustafa, A., Farooqi, Z. U. R., Wang, X., Younas, S., Mohy-ud-din, W., Hameed, M. A., Abrar, M. M., Maitlo, A. A., Noreen, S., & Hussain, M. M. (2021). Current and Emerging Adsorbent Technologies for Wastewater Treatment: Trends, Limitations, and Environmental Implications. *Water*, 13(215), 1–25.
<https://doi.org/10.3390/w13020215>

Zhou, H., Bhattarai, R., Li, Y., Si, B., Dong, X., Wang, T., & Yao, Z. (2022). Towards sustainable coal industry: Turning coal bottom ash into wealth. *Science of the Total Environment*, 804, 149985.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149985>