



Studi Awal Sintesis dan Evaluasi Kestabilan Hidrogel Komposit Fly Ash-Alginate untuk Adsorpsi Pb^{2+}

Preliminary Study on the Synthesis and Stability Assessment of Fly Ash-Alginate Composite Hydrogel for Pb^{2+} Adsorption

Rimadina Sukmasuci Lestari¹, Farrah Fadhillah Hanum^{1*}, Maryudi¹, Budi Setya Wardhana¹

¹Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Ahmad Dahlan, Jl. Ahmad Yani (Ringroad Selatan), Tamanan, Banguntapan, Bantul, Yogyakarta 55166.

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

Received: 7th December 2025; Revised: 6th January 2026; Accepted: 7th January 2026

ABSTRAK

Meningkatnya produksi abu terbang (FA) dari pembangkit listrik tenaga batubara di Indonesia dan risiko kontaminasi logam berat yang terkait memerlukan pengembangan material adsorben berkelanjutan. Studi ini melaporkan sintesis hidrogel komposit abu terbang natrium alginat yang dihubungkan silang dengan $CaCl_2$ dan aplikasinya untuk adsorpsi Pb^{2+} dalam sistem batch. Eksperimen meliputi persiapan FA, sintesis hidrogel, analisis pembengkakan, evaluasi stabilitas fisik yang didefinisikan sebagai ketahanan terhadap gaya gesek akibat pengadukan selama adsorpsi, dan analisis konsentrasi Pb^{2+} menggunakan Spektroskopi Serapan Atom (AAS). Pengamatan karakterisasi morfologi permukaan secara visual menunjukkan dispersi partikel FA yang homogen di dalam jaringan hidrogel tiga dimensi. Di antara formulasi, FA-D menunjukkan stabilitas fisik terbaik dengan nilai pengembangan terbaik 0,91%, menunjukkan pengikatan silang yang efektif dan kekompakan struktural. Adsorpsi terbaik dicapai pada kecepatan pengadukan 500 rpm dan waktu kontak 1 jam. Dalam kondisi ini, hidrogel FA-D mencapai efisiensi penghilangan Pb^{2+} maksimum sebesar 98,21%. Secara keseluruhan, hidrogel komposit berbasis FA menunjukkan potensi yang kuat sebagai adsorben berbiaya rendah, ramah lingkungan, dan stabil secara mekanis untuk pengolahan air limbah yang terkontaminasi Pb^{2+} .

Kata kunci: Fly ash, Hidrogel, Adsorpsi, Logam berat, Limbah cair.

ABSTRACT

The increasing production of fly ash (FA) from coal-fired power plants in Indonesia and the associated risk of heavy metal contamination necessitate the development of sustainable adsorbent materials. This study reports the synthesis of a composite hydrogel of sodium alginate fly ash cross-linked with $CaCl_2$ and its application for Pb^{2+} adsorption in a batch system. Experiments included FA preparation, hydrogel synthesis, swelling analysis, evaluation of physical stability defined as resistance to frictional forces due to stirring during adsorption, and analysis of Pb^{2+} concentration using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). Visual observation of surface morphology characterization showed a homogeneous dispersion of FA particles within the three-dimensional hydrogel network. Among the formulations, FA-D showed the best physical stability with the best swelling value of 0.91%, indicating effective cross-linking and structural compactness. The best adsorption was achieved at a stirring speed of 500 rpm and a contact time of 1 hour. Under these conditions, the FA-D hydrogel achieved a maximum Pb^{2+} removal efficiency of 98.21%. Overall, the FA-based composite hydrogels show strong potential as low-cost, environmentally friendly, and mechanically stable adsorbents for the treatment of Pb^{2+} -contaminated wastewater.

Keywords: Fly ash, Hydrogel, Adsorption, Heavy metals, Liquid waste.

Copyright © 2026 by Authors, Published by JITK. This is an open-access article under the CC BY-SA License (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

How to cite: Lestari, R. S., Farrah Fadhillah Hanum, Maryudi, & Budi Setya Wardhana. Studi Awal Sintesis dan Evaluasi Kestabilan Hidrogel Komposit Fly Ash-Alginate untuk Adsorpsi Pb^{2+} . *Jurnal Ilmiah Teknik Kimia*, 10(1), 68–79.

Permalink/DOI: [10.32493/jitk.v10i1.55444](https://doi.org/10.32493/jitk.v10i1.55444)



PENDAHULUAN

Abu batubara merupakan salah satu limbah padat hasil pembakaran batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) maupun sektor industri lainnya (Hanum et al., 2024). Abu batubara terdiri dari 2 jenis yaitu *fly ash* (FA) dan *bottom ash* (BA) (Wardhana, Hanum, Lestari, et al., 2025). Di Indonesia, produksi abu batubara diperkirakan mencapai sekitar 15 juta ton per tahun, sehingga menimbulkan tantangan serius dalam pengelolaannya dan potensi risiko pencemaran lingkungan apabila tidak dimanfaatkan secara optimal (Astuti & Kurniawan, 2015; Hardyanti & Syafrudin, n.d.). Di sisi lain, FA mengandung komponen anorganik utama seperti silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dengan luas permukaan relatif tinggi, menjadikannya material yang berpotensi digunakan sebagai adsorben untuk pengolahan air limbah, khususnya yang mengandung logam berat (Hanum et al., 2024; Visa & Chelaru, 2014). Meskipun abu batubara telah diketahui mampu menyerap berbagai jenis polutan termasuk logam berat, kapasitas adsorbsinya secara alami masih tergolong rendah (Ahmaruzzaman, 2009).

Penggunaan FA sebagai adsorben telah diteliti oleh Wardhana, Hanum, Mufrodi, et al., (2025) yang melaporkan pemanfaatan FA, baik dalam bentuk asli maupun setelah modifikasi menjadi zeolit, geopolimer, atau adsorben teraktivasi, untuk penyerapan ion logam berat seperti Pb^{2+} dengan efisiensi yang cukup tinggi hingga mencapai efisiensi diatas 90%. Namun demikian, penggunaan FA dalam bentuk serbuk menghadapi kendala praktis yang signifikan, terutama pada tahap pemisahan adsorben dari media cair setelah proses adsorpsi. Ukuran partikel FA yang sangat halus menyebabkan pemisahan melalui metode konvensional seperti filtrasi dan sentrifugasi menjadi tidak efisien, memerlukan konsumsi energi tinggi, waktu operasi yang lebih lama, serta berpotensi meningkatkan biaya operasional pada skala aplikasi nyata. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan metode modifikasi FA

dalam bentuk hidrogel komposit. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan kemudahan pemisahan, memperkuat stabilitas struktur material selama proses adsorpsi, serta meningkatkan efektivitas penyerapan ion logam berat (Mufrodi et al., 2010; Wardhana et al., 2024).

Pencemaran logam berat seperti timbal (Pb^{2+}) di lingkungan, khususnya pada air limbah industri, menjadi masalah serius karena sifat toksiknya yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem (Asiva Noor Rachmayani, 2015). Salah satu metode yang banyak dikembangkan untuk mengatasi masalah ini adalah proses adsorpsi menggunakan material berbasis limbah, seperti FA (Jadaa, 2024). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa FA, baik dalam bentuk asli maupun setelah dimodifikasi atau dikonversi menjadi geopolimer dan zeolit, mampu mengadsorpsi Pb^{2+} secara efisien melalui mekanisme pertukaran ion, kompleksasi permukaan, dan presipitasi. Namun, belum banyak penelitian yang membahas secara detail bagaimana potensi adsorben FA yang dimodifikasi menjadi hidrogel komposit. Struktur hidrogel yang berupa jaringan tiga dimensi (3D) berpori memungkinkan penyerapan air dan polutan dalam jumlah besar, serta menyediakan banyak situs aktif untuk proses adsorpsi (Darban et al., 2022). Selain itu, hidrogel batubara dapat mengalami *swelling* atau mengembang secara signifikan, sehingga meningkatkan kontak antara adsorben dan polutan di dalam air (Darban et al., 2022). Hidrogel batubara umumnya bersifat stabil secara kimia dan mekanik, sehingga dapat digunakan berulang kali tanpa kehilangan efisiensi adsorpsi. Selain itu, hidrogel ini juga ramah lingkungan karena dapat terbuat dari bahan-bahan yang *biodegradable* dan tidak beracun, sehingga aman untuk aplikasi pengolahan air limbah (Zhao et al., 2025). Kombinasi sifat-sifat tersebut membuat hidrogel batubara menjadi salah satu material adsorben yang menjanjikan untuk mengatasi pencemaran air akibat limbah industri.



Adsorben berbasis FA menunjukkan efisiensi tinggi dalam mengadsorpsi Pb^{2+} , dengan beberapa material mampu mencapai efisiensi di atas 90% dan kapasitas adsorpsi hingga ratusan mg/g (Wardhana, Hanum, Mufrodi, et al., 2025). Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja meliputi pH (umumnya optimal pada pH 4–7), dosis adsorben, waktu kontak, dan suhu. Proses adsorpsi umumnya mengikuti model isotherm Langmuir dan kinetika pseudo-orde dua, menandakan adsorpsi kimia multilapis dan kecenderungan proses spontan serta endo-/eksotermik (Kobayashi et al., 2020).

Meskipun berbagai studi telah melaporkan penggunaan hidrogel berbasis polimer alami dan material anorganik untuk adsorpsi logam berat, kajian yang secara spesifik membahas pengaruh rasio FA terhadap matriks alginat dalam mencapai keseimbangan antara daya swelling dan kestabilan fisik hidrogel masih sangat terbatas. Terlebih lagi, hingga saat ini belum banyak penelitian yang melaporkan formulasi hidrogel komposit berbasis FA yang berasal dari PLTU di Indonesia, khususnya dari wilayah Sulawesi, yang memiliki karakteristik kimia dan mineralogi berbeda dibandingkan FA dari negara lain. Perbedaan asal FA ini berpotensi memengaruhi interaksi antara partikel FA dan matriks polimer, serta berdampak langsung pada sifat mekanik dan kinerja adsorpsi hidrogel.

Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada perancangan dan evaluasi formulasi rasio FA–sodium alginate untuk memperoleh keseimbangan optimal antara kemampuan *swelling* dan kestabilan fisik hidrogel, sekaligus mengkaji kinerjanya sebagai adsorben Pb^{2+} . Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah dalam pemahaman hubungan komposisi–struktur–kinerja hidrogel berbasis FA, tetapi juga menawarkan pendekatan aplikatif yang lebih efisien energi dan berkelanjutan untuk pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat.

BAHAN DAN METODE

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *magnetic stirrer* untuk proses sintesis hidrogel dan adsorpsi, gelas beker (500 mL) sebagai reaktor *batch*, erlenmeyer dan corong kaca untuk proses filtrasi, oven pengering, neraca analitik, serta *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk analisis konsentrasi Pb^{2+} .

Bahan yang digunakan meliputi *fly ash* (FA) yang diperoleh dari salah satu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Sulawesi, Indonesia. Sodium alginate (grade teknis) digunakan sebagai matriks polimer alami. Kalsium klorida ($CaCl_2$, analytical grade, $\geq 99\%$) digunakan sebagai agen pengikat silang. Timbal nitrat $Pb(NO_3)_2$ (analytical grade, $\geq 99\%$) digunakan sebagai sumber ion Pb^{2+} dalam pembuatan larutan limbah sintetik. Aquadest digunakan sebagai pelarut dalam seluruh tahapan percobaan.

Pembuatan Adsorben Hidrogel Berbasis FA

Pembuatan adsorben sintesis hidrogel diawali dengan formulasi FA, sodium alginate dan Aquadest. FA ditimbang dengan berat tertentu (0–10 gr) dan sodium alginate ditimbang sebanyak 1 gr kemudian dicampurkan dalam 200 ml aquadest dan diaduk menggunakan *magnetic stirrer* pada kecepatan maksimal 1000 rpm selama 30 menit hingga homogen. Setelah formulasi sintesis hidrogel selesai, lalu menyiapkan larutan campuran 1 gr $CaCl_2$ dengan 100 ml aquadest (1:100) dan aduk menggunakan spatula hingga homogen. Kemudian mencetak formula sintesis hidrogel FA menggunakan pipet tetes dan meneteskan secara perlahan ke dalam larutan $CaCl_2$. Hidrogel yang terbentuk direndam dalam larutan $CaCl_2$ selama ± 24 jam untuk memastikan proses pengikatan silang berlangsung sempurna, kemudian disimpan pada suhu ruang dalam wadah tertutup agar tidak terkontaminasi sebelum digunakan.

Uji *Swelling* dan Ketahanan Fisik Hidrogel

Uji *swelling* bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan hidrogel dalam menyerap air dan mengembang sampai kondisi



setimbang. Hidrogel yang baik akan memiliki nilai *swelling* tinggi, menandakan kemampuannya menyimpan air di dalam struktur polimer. Prosedurnya dilakukan dengan merendam hidrogel yang sudah dikeringkan dalam oven dengan suhu 80°C ke dalam air aquadest selama 24 jam, menimbang berat awal (W_0) dan berat setelah pembengkakan (W_t) pada waktu tertentu. Hasil uji *swelling* dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Swelling (\%)} = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

di mana W_0 adalah berat awal hidrogel kering, dan W_t adalah berat hidrogel setelah pembengkakan.

Kemudian uji ketahanan fisik dilakukan dengan memvariasikan massa FA dalam komposisi hidrogel dengan dikontakkan ke dalam beberapa variasi diantaranya variasi kecepatan pengadukan (100-1000 rpm) dan variasi waktu pengadukan (0-300 menit). Uji ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana karakteristik fisik hidrogel selama proses adsorpsi berlangsung.

Metode Evaluasi Kekeruhan

Tingkat kekeruhan larutan setelah proses adsorpsi dievaluasi melalui pengamatan visual, berdasarkan perubahan kejernihan larutan dan keberadaan partikel hidrogel yang terlepas ke dalam media cair. Metode ini digunakan sebagai indikator kualitatif degradasi fisik hidrogel akibat gaya gesek selama pengadukan.

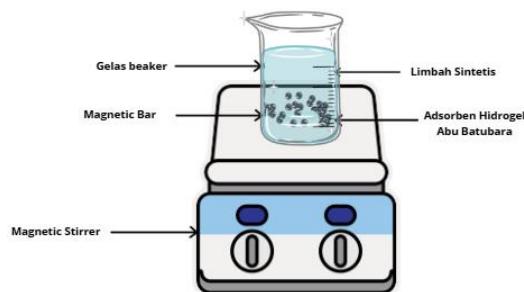
Karakterisasi Visual Hidrogel

Karakterisasi visual hidrogel dilakukan melalui pengamatan morfologi permukaan dan keutuhan struktur hidrogel selama pengujian kestabilan fisik dengan menggunakan beberapa parameter variasi diantaranya, variasi FA (2,5 gr; 5 gr; 7,5 gr dan 10 gr), variasi waktu (0 – 300 menit) dan variasi kecepatan pengadukan (100 - 1000 rpm).

Evaluasi ini bertujuan untuk menilai distribusi FA dalam matriks hidrogel serta perubahan bentuk akibat pengadukan.

Proses Adsorpsi pada Logam Berat Pb^{2+}

Proses adsorpsi dilakukan dengan mencampurkan adsorben sintesis hidrogel berbasis FA ke dalam gelas beker berukuran 500 ml yang berisi air limbah sintetik mengandung logam berat. Air limbah sintetik Pb^{2+} disiapkan dengan melarutkan logam berat Pb^{2+} ke dalam aquadest hingga mencapai konsentrasi 1000 ppm. Untuk proses adsorpsi, adsorben hidrogel abu batubara ditambahkan ke dalam larutan limbah logam sintetis. Campuran ini kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 500 rpm pada suhu 30°C selama 1 jam. Dapat dilihat gambar rangkaian alat percobaan proses adsorpsi pada Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian Alat Percobaan Adsorpsi

Setelah proses adsorpsi selesai, larutan disaring menggunakan kertas saring untuk memisahkan adsorben dari larutan. Konsentrasi ion logam berat yang tersisa di dalam larutan dianalisis menggunakan AAS. Efisiensi penyisihan dihitung dengan persamaan:

$$\% \text{RE} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan:

$\% \text{RE}$ = Removal Efficiency (%)

C_0 = Konsentrasi awal ion logam berat (ppm)

C_e = Konsentrasi akhir ion logam berat (ppm)

Hasil perhitungan $\% \text{RE}$ digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi dari masing-masing perlakuan. Adsorben dengan performa terbaik akan digunakan pada tahap berikutnya.



HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi massa FA, kecepatan pengadukan, dan waktu pengadukan dan uji *swelling* terhadap kestabilan fisik hidrogel berbasis FA serta mengetahui bagaimana kinerjanya dalam menyerap logam berat Pb^{2+} . Analisis dilakukan untuk menilai tingkat kehancuran hidrogel serta perubahan kejernihan air sebagai indikator stabilitas struktural dan ketahanan material terhadap gaya gesek. Pengujian ini merupakan tahap awal untuk menentukan kondisi optimum pembuatan hidrogel yang kokoh, homogen, dan tahan terhadap pengadukan sebelum digunakan sebagai adsorben logam berat. Selain itu juga, sintesis hidrogel berbasis FA ini diuji mengenai efektivitasnya dalam menyerap kadar logam yang terkandung dalam limbah sintesis logam berat.

Observasi Awal Sintesis Hidrogel Berbasis FA

Proses sintesis ini bertujuan menghasilkan hidrogel yang stabil, efektif, dan ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi, termasuk adsorpsi polutan dalam sistem perairan. Berdasarkan hasil penelitian sistem batch yang telah dilakukan dengan kecepatan pengadukan 500 rpm dan waktu pengadukan 1 jam dapat dilihat pada Tabel 1, ditemukan bahwa ukuran partikel abu batubara yang sangat halus menyebabkan kesulitan dalam proses pemisahan padatan, sehingga memerlukan waktu pemisahan yang lebih lama dibandingkan material berukuran lebih besar. Maka pada tahapan awal ini, penelitian bertujuan untuk menemukan ukuran yang optimum berdasarkan massa dan ketahanannya dalam variasi kecepatan pengadukan dan waktu pengadukan.

Tabel 1. Observasi Awal Sintesis Hidrogel Berbasis FA

Kode Sampel	FA (gr)	Sodium Alginate (gr)	Aquadest (ml)	Bentuk Hidrogel	Tekstur
FA-A	0			+	>
FA-B	2,5			+	>
FA-C	5	1	200	++	>
FA-D	7,5			+++	>
FA-E	10			+++	>>

Keterangan :

- +: Kurang pekat
- ++: Cukup pekat
- +++: Pekat
- >: Kokoh
- >>: Sedikit hancur

Pengaruh Variasi FA terhadap Daya Swelling Hidrogel

Uji *swelling* dilakukan untuk mengetahui kemampuan hidrogel dalam menyerap dan menahan air yang merefleksikan kerapatan jaringan serta interaksi hidrogelnya dengan fasa cair. Nilai *swelling* yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan pengembangan yang lebih besar akibat penetrasi air ke dalam matriks hidrogel. Pada penelitian ini, dilakukan pengujian *swelling* terhadap hidrogel sampel FA-A, FA-B, FA-C, FA-D dan FA-E untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap kemampuan hidrogel menyerap air. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pengaruh Variasi FA terhadap Daya Swelling Hidrogel

Sampel	Swelling (%)
FA-A	1,05
FA-B	0,71
FA-C	0,61
FA-D	0,91
FA-E	0,72

Hasil pengujian *swelling* menunjukkan bahwa penambahan FA mempengaruhi kemampuan *swelling* hidrogel melalui perubahan struktur pori dan kerapatan jaringan.



FA-A yang merupakan hidrogel tanpa penambahan FA memiliki nilai *swelling* tertinggi sebesar 1,05%, yang menunjukkan bahwa struktur matriks hidrogel yang didominasi oleh jaringan polimer yang memungkinkan penyerapan fasa cair secara optimal.

Penambahan FA diketahui mempengaruhi komposisi matriks hidrogel. Pada FA-B dan FA-C, nilai *swelling* mengalami penurunan menjadi 0,71% dan 0,61%. Penurunan ini menunjukkan bahwa keberadaan FA pada jumlah tertentu bertindak sebagai filler anorganik yang mengisi ruang pori hidrogel sehingga meningkatkan kerapatan jaringan polimer. Kondisi ini menghambat proses penetrasi fasa cair ke dalam matriks hidrogel. Hal ini sesuai dengan hasil riset sebelumnya yang menyatakan bahwa struktur yang lebih rapat akibat penyisipan partikel FA mengurangi ruang kosong (pori) sehingga air yang dapat masuk menjadi lebih terbatas (S. Ghani et al., 2023).

Pada hidrogel FA-D, nilai *swelling* kembali meningkat hingga 0,91%. Fenomena ini menunjukkan bahwa pada komposisi tertentu, penambahan FA dapat mempengaruhi pembentukan struktur jaringan yang lebih memungkinkan pembentukan distribusi partikel pori di dalam matriks hidrogel. Hal ini mungkin terjadi karena interaksi antara FA dan matriks alginat menjadi lebih optimal, sehingga meningkatkan kemampuan hidrogel dalam mengikat air tanpa menyebabkan penyumbatan pori (Saha et al., 2020).

Namun, pada hidrogel FA-E, terjadi penurunan drastis nilai *swelling* menjadi 0,72%. Hal ini mengindikasikan bahwa kelebihan jumlah FA menyebabkan terjadinya penumpukan partikel pori yang terlalu padat dalam matriks hidrogel. Sehingga kondisi ini menurunkan fleksibilitas jaringan, memperkecil ukuran pori, dan menghambat proses difusi air ke dalam struktur hidrogel.

Dengan demikian, nilai *swelling* menunjukkan bahwa dengan adanya

penambahan FA mempengaruhi kemampuan pengembangan matriks hidrogel. Komposisi FA pada hidrogel FA-D disimpulkan sebagai komposisi optimum berdasarkan parameter uji *swelling*.

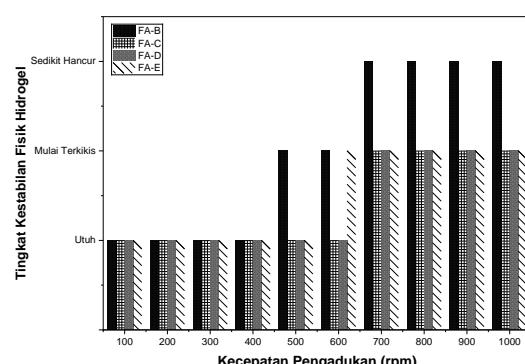
Pengaruh Massa FA dan Kecepatan Pengadukan

Uji pengaruh massa FA dan kecepatan pengadukan terhadap tingkat kestabilan fisik hidrogel dan tingkat kekeruhan air dilakukan pada rentang 100–1000 rpm dan massa FA 2,5 – 10 gr dengan durasi pengadukan selama 1 jam. Dengan hasil penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.

Untuk meningkatkan objektivitas evaluasi kestabilan fisik hidrogel selama pengadukan, tingkat degradasi hidrogel diklasifikasikan menggunakan skala semi-kuantitatif berdasarkan kondisi visual hidrogel setelah proses pengadukan, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Skala Semi-Kuantitatif Kestabilan Fisik Hidrogel

Skala	Kategori	Deskripsi Visual
1	Utuh	Hidrogel mempertahankan bentuk awal, tidak terlihat erosi atau pelepasan partikel
2	Mulai Terkikis	Permukaan mulai tererosi, tetapi bentuk utama masih utuh
3	Sedikit Hancur	Hidrogel terfragmentasi menjadi beberapa bagian besar
4	Hancur	Hidrogel terdisintegrasi, banyak partikel terlepas ke dalam larutan

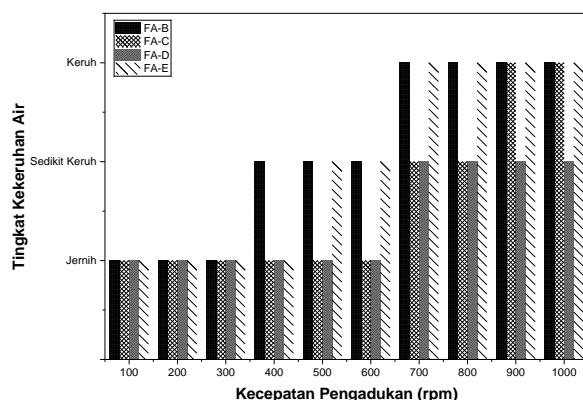


Gambar 2. Grafik Pengaruh Kecepatan Pengadukan Terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Variasi Konsentrasi FA



Berdasarkan skala semi-kuantitatif kestabilan fisik, hidrogel dengan kandungan FA rendah (FA-B) menunjukkan peningkatan tingkat degradasi dari skala 1 menjadi skala 2 pada kecepatan pengadukan 500 rpm. Sebaliknya, hidrogel FA-D tetap berada pada skala 1 hingga 500 rpm dan baru menunjukkan degradasi ringan (skala 2) pada kecepatan yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kandungan FA berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan hidrogel terhadap gaya gesek.

Hal ini menunjukkan bahwa penambahan FA dalam jumlah lebih besar meningkatkan kekuatan fisik hidrogel karena partikel FA bertindak sebagai *filler* yang memperkuat jaringan gel (Kalinkin et al., 2020).



Gambar 3. Grafik Pengaruh Kecepatan Pengadukan Terhadap Tingkat Kekeruhan Air pada Variasi Konsentrasi FA

Pengujian tingkat kekeruhan air digunakan untuk menilai sejauh mana partikel hidrogel terlepas ke dalam larutan ketika dikenai gaya mekanik melalui pengadukan (Smith et al., 2010). Semakin keruh air yang terbentuk, semakin banyak partikel hidrogel yang mengalami erosi, terkelupas, atau hancur akibat gesekan.

Kecepatan pengadukan yang lebih tinggi mempercepat laju transfer massa eksternal, sehingga mempercepat proses adsorpsi dan meningkatkan efisiensi penyerapan polutan hingga titik tertentu.

Namun, jika kecepatan terlalu tinggi, efisiensi bisa menurun akibat desorpsi atau kerusakan struktur adsorben (Amrhar et al., 2021; Guiza et al., 2019; Roldán-Cruz et al., 2021). Sedangkan Meningkatkan massa adsorben menyediakan lebih banyak situs aktif untuk penyerapan, sehingga meningkatkan kapasitas dan efisiensi adsorpsi (Garg et al., 2008; Meili et al., 2019). Namun, setelah titik tertentu, penambahan massa adsorben tidak lagi meningkatkan efisiensi secara signifikan karena semua polutan sudah teradsorpsi atau terjadi aglomerasi partikel yang mengurangi area permukaan efektif (Akar et al., 2022; Guiza et al., 2019; Irdemez et al., 2022).

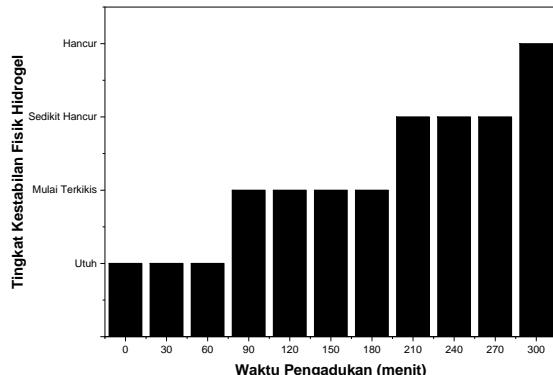
Hasil menunjukkan bahwa pada kecepatan rendah hingga menengah (100–400 rpm), seluruh variasi massa FA menghasilkan hidrogel yang masih utuh dengan air yang tetap jernih. Namun, mulai dari 500 rpm, hidrogel dengan konsentrasi FA rendah (FA-B dan FA-C) mulai mengalami pengikisan, sedangkan hidrogel FA-D dan FA-E masih utuh hingga 600 rpm. Pada kecepatan tinggi (700–1000 rpm), semua hidrogel mulai terkikis bahkan sedikit hancur, dan kekeruhan air meningkat tajam akibat terlepasnya partikel FA ke dalam medium. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan pengadukan memperbesar gaya gesek yang bekerja pada permukaan hidrogel, menyebabkan ikatan antara rantai polimer dan partikel FA menjadi tidak stabil (Ghica et al., 2016). Secara umum, kondisi optimum terdapat pada kecepatan 500–600 rpm, di mana hidrogel masih stabil secara fisik tanpa menyebabkan peningkatan kekeruhan yang signifikan.

Berdasarkan pengamatan ini dan nilai uji *swelling* yang didapatkan sebelumnya, formulasi massa FA-D dipilih sebagai komposisi ideal untuk pengujian lanjutan.



Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Kecepatan Pengadukan 500 rpm

Pengujian dilakukan dengan formulasi hidrogel FA-D dengan variasi waktu 0 – 300 menit. Didapatkan hasil pada Gambar 4.

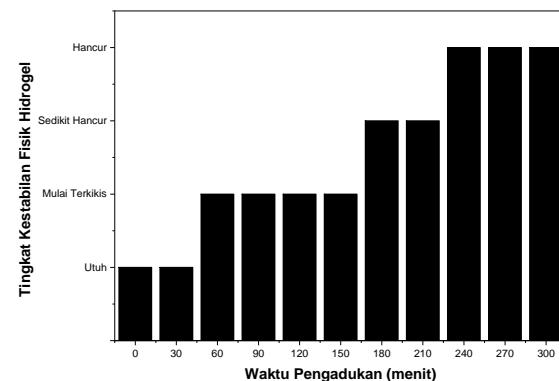


Gambar 4. Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan Terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Variasi Kecepatan Pengadukan 500 rpm

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kestabilan fisik hidrogel sangat dipengaruhi oleh lamanya waktu pengadukan dan besarnya kecepatan (rpm). Pada kecepatan pengadukan 500 rpm, hidrogel mampu mempertahankan kondisi utuh hingga menit ke-60. Hal ini menunjukkan bahwa pada durasi singkat hingga menengah, gaya gesek yang diterima hidrogel belum cukup untuk merusak struktur jaringannya (Ghica et al., 2016). Hal ini membuktikan bahwa peningkatan kandungan FA berperan penting dalam memperkuat struktur hidrogel karena partikel anorganik berfungsi sebagai *reinforcing filler* yang meningkatkan kekompakan dan kekuatan mekanik jaringan polimer (Wang et al., 2022).

Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Kecepatan Pengadukan 600 rpm

Pengujian yang sama dilakukan kembali dengan kecepatan pengadukan yang berbeda, yaitu pada 600 rpm. Hasil pengamatan dapat dilihat pada gambar 5.



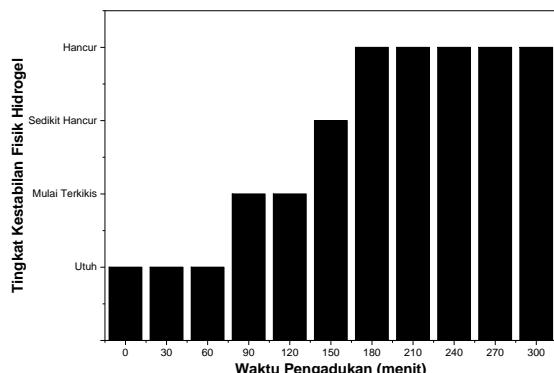
Gambar 5. Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan Terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Variasi Kecepatan Pengadukan 600 rpm

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan waktu pengadukan pada kecepatan 600 rpm memberikan pengaruh signifikan terhadap tingkat kestabilan fisik hidrogel. Pada waktu pengadukan 0–60 menit, hidrogel masih berada pada kondisi utuh, menandakan jaringan polimer belum berkembang sepenuhnya. Memasuki 90–150 menit, hidrogel mulai menunjukkan kondisi mulai terkikis, yang mengindikasikan proses pengikatan silang (*crosslinking*) mulai meningkat namun struktur masih belum stabil sepenuhnya. Pada interval 180–210 menit, hidrogel mencapai kondisi sedikit hancur, menunjukkan bahwa intensitas pengadukan yang tinggi mulai memberikan tegangan mekanis yang memengaruhi integritas struktur. Setelah melewati 210 menit hingga 300 menit, hidrogel tercatat berada pada kondisi hancur, menandakan bahwa pengadukan yang terlalu lama pada 600 rpm menyebabkan kerusakan jaringan polimer akibat gaya gesek yang berlebihan. Secara keseluruhan, data ini menegaskan bahwa pada kecepatan tinggi, waktu pengadukan optimal perlu dibatasi untuk mencegah degradasi fisik hidrogel (S. M. M. Ghani et al., 2023).



Pengaruh Waktu Pengadukan terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Kecepatan Pengadukan 700 rpm

Pengujian yang sama dilakukan kembali dengan kecepatan pengadukan yang berbeda pada 700 rpm untuk perbandingan pada variasi kecepatan pengadukan sebelumnya. Hasil pengamatan dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Grafik Pengaruh Waktu Pengadukan Terhadap Tingkat Kestabilan Fisik Hidrogel pada Variasi Kecepatan Pengadukan 700 rpm

Gambar 6 menunjukkan bahwa pada kecepatan 700 rpm, semakin lama waktu pengadukan, semakin rendah kestabilan fisik hidrogel. Hidrogel masih utuh pada 0–60 menit, mulai terkikis pada 90–120 menit, menjadi sedikit hancur pada 150–180 menit, dan sepenuhnya hancur pada ≥ 210 menit.

Secara ilmiah, kecepatan pengadukan yang sangat tinggi (700 rpm) menghasilkan gaya gesek yang kuat sehingga merusak jaringan polimer hidrogel (Fransiska & Reynaldi, 2020). Gaya turbulensi ini memutus ikatan silang antara sodium alginat dan Ca^{2+} , mengganggu distribusi partikel abu batubara, serta menghambat pembentukan struktur gel yang kompak. Akibatnya, semakin lama hidrogel terekspos gaya mekanik tinggi, struktur matriksnya semakin lemah hingga akhirnya hancur (Simion et al., 2025).

Aplikasi Adsorben pada Logam Berat

Pengujian efektivitas adsorpsi hidrogel dilakukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing variasi komposisi dalam mengurangi konsentrasi logam berat pada larutan. Variasi yang diuji meliputi hidrogel FA-A, hidrogel FA-C, dan hidrogel FA-D. Jenis logam berat yang akan dianalisis yaitu $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$. Hasil persentase *removal* yang diperoleh mencerminkan seberapa besar kemampuan hidrogel dalam mengadsorpsi logam-logam tersebut. Data berikut disajikan dalam Tabel 4 perbandingan efektivitas adsorpsi berdasarkan variasi komposisi hidrogel.

Tabel 4. Persentase Removal Logam Pb^{2+} oleh Hidrogel pada Variasi Konsentrasi FA

Sampel	% Removal (mg/g)
FA-A	91,16
FA-C	97,57
FA-D	98,21

Berdasarkan data hasil persen removal di atas, terlihat bahwa penambahan FA berpengaruh signifikan terhadap kemampuan adsorpsi hidrogel, terutama pada logam Pb^{2+} . FA-A mampu mengadsorpsi Pb sebesar 91,16%, sedangkan pada sampel FA-C dan FA-D yang menunjukkan pada penambahan FA, nilai % removal meningkat menjadi 97,57% dan 98,21%. Peningkatan efisiensi adsorpsi Pb^{2+} pada hidrogel dengan kandungan FA yang lebih tinggi diduga berkaitan dengan mekanisme pertukaran ion dan/atau kompleksasi permukaan yang melibatkan komponen mineral utama FA. Dugaan ini didasarkan pada karakteristik kimia FA yang umumnya kaya akan fase silika dan alumina, yang dalam berbagai studi dilaporkan memiliki afinitas terhadap ion logam berat.



Temuan ini sejalan dengan laporan sebelumnya yang menunjukkan bahwa adsorpsi Pb^{2+} oleh material berbasis FA dapat berlangsung melalui mekanisme pertukaran ion dan kompleksasi permukaan, meskipun konfirmasi mekanistik secara langsung memerlukan analisis instrumen lanjutan seperti FTIR atau EDX (Wardhana, Hanum, Mufrodi, et al., 2025). Oleh karena itu, mekanisme adsorpsi yang diusulkan dalam penelitian ini bersifat indikatif dan didasarkan pada kecenderungan hasil adsorpsi serta kesesuaian dengan literatur terdahulu, bukan sebagai bukti mekanistik yang bersifat konklusif.

Secara keseluruhan, formulasi FA-C dan FA-D menunjukkan kinerja adsorpsi terbaik terutama terhadap Pb, dengan FA-D sebagai formulasi terbaik karena menghasilkan efisiensi penyerapan tertinggi dan kestabilan struktur hidrogel yang baik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa hidrogel komposit berbasis fly ash-alginate berhasil disintesis dan menunjukkan kinerja yang efektif dalam mengadsorpsi ion Pb^{2+} dari limbah cair sintetik. Pada konsentrasi awal Pb^{2+} (C_0) sebesar 1000 ppm, formulasi hidrogel FA-D memberikan keseimbangan terbaik antara daya *swelling* (0,91%) dan kestabilan fisik terhadap gaya gesek selama pengadukan. Dengan kondisi operasi pada kecepatan pengadukan 500 rpm, waktu kontak 1 jam, dan suhu 30 °C, di mana hidrogel FA-D mampu mencapai efisiensi removal Pb^{2+} tertinggi sebesar 98,21%. Peningkatan kandungan FA terbukti meningkatkan ketahanan mekanik hidrogel dan kinerja adsorpsi, meskipun mekanisme adsorpsi yang terlibat masih bersifat indikatif dan memerlukan konfirmasi melalui analisis instrumen lanjutan. Secara keseluruhan,

hidrogel berbasis FA ini berpotensi diaplikasikan sebagai adsorben yang efektif, ramah lingkungan, dan berenergi rendah untuk pengolahan limbah cair yang mengandung Pb^{2+} .

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmaruzzaman, M. (2009). Role of fly ash in the removal of organic pollutants from wastewater. *Energy and Fuels*, 23(3), 1494–1511.
- Akar, S. T., Çolo, H., Sayin, F., Kara, I., & Akar, T. (2022). Parametric optimization of $Cu(II)$ removal process by a metakaolin-based geopolymer: Batch and continuous process design. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132819>
- Alinnor, I. J. (2007). Adsorption of heavy metal ions from aqueous solution by fly ash. *Fuel*, 86(5–6), 853–857. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.08.019>
- Amrhar, O., Berisha, A., Gana, E., Nassali, H., & Elyoubi, M. (2021). Removal of methylene blue dye by adsorption onto Natural Muscovite Clay: experimental, theoretical and computational investigation. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103, 2419–2444. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1897119>
- Asiva Noor Rachmayani. (2015). *Adsorpsi Batubara Terhadap Ion Timbal*. 6.
- Astusi, W., & Kurniawan, B. (2015). *Adsorpsi Pb^{2+} Dalam Limbah Cair Artifisial Menggunakan Sistem Kolom Dengan Bahan Isian Abu Layang Batubara Serbuk dan Granular*. 4(1), 27–33.
- Darban, Z., Shahabuddin, S., Gaur, R., Ahmad, I., & Sridewi, N. (2022). Hydrogel-Based Adsorbent Material for the Effective Removal of Heavy Metals from Wastewater: A Comprehensive Review. *Gels*, 8. <https://doi.org/10.3390/gels8050263>
- Fransiska, D., & Reynaldi, A. (2020). Karakteristik Hidrogel Dari Iota



- Karaginan dan PVA (Poly-Vinyl Alcohol) Dengan Metode Freezing-Thawing Cycle. *Jambura Fish Processing Journal*, 1(1), 28–36. <https://doi.org/10.37905/jfpj.v1i1.4503>
- Garg, U., Kaur, M., Garg, V., & Sud, D. (2008). Removal of nickel(II) from aqueous solution by adsorption on agricultural waste biomass using a response surface methodological approach. *Bioresource Technology*, 99 5, 1325–1331. <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECH.2007.02.011>
- Ghani, S. M. M., Nurul Ekmi Rabat *, Abdul Rahman Abdul Rahim, Khairiraihanna Johari, A. A. S. and R. K., & Chemical. (2023). *Amine Infused Fly Ash Grafted Acrylic Acid / Acrylamide*.
- Ghani, S., Rabat, N., Rahim, A. A., Johari, K., Siyal, A., & Kumeresen, R. (2023). Amine Infused Fly Ash Grafted Acrylic Acid/Acrylamide Hydrogel for Carbon Dioxide (CO₂) Adsorption and Its Kinetic Analysis. *Gels*, 9. <https://doi.org/10.3390/gels9030229>
- Ghica, M., Hîrjău, M., Lupuleasa, D., & Dinu-Pîrvu, C. (2016). Flow and Thixotropic Parameters for Rheological Characterization of Hydrogels. *Molecules*, 21. <https://doi.org/10.3390/molecules21060786>
- Guiza, S., Hajji, H., & Bagané, M. (2019). External mass transport process during the adsorption of fluoride from aqueous solution by activated clay. *Comptes Rendus Chimie*. <https://doi.org/10.1016/J.CRCI.2019.02.001>
- Hanum, F. F., & Rahayu, A. (2022). Studi pemanfaatan dan metode pemisahan silika dari coal fly ash. *Open Science and Technology*. <https://doi.org/10.33292/ost.vol2no1.2022.44>
- Hanum, F. F., Salamah, S., Rifai Sanuhung, A., & Setya Wardhana, B. (2024). Study on The Potential Contamination of Heavy Metals: Analysis of Cr and Pb Contents From Power Plants in Indonesia Using the Batch Leaching Method. *Jurnal Sains Natural*, 14(1), 53–61. <https://doi.org/10.31938/jsn.v14i1.689>
- Hardyanti, N., & Syafrudin. (n.d.). *Penyisihan Konsentrasi Timbal (Pb) Menggunakan Adsorbent Abu Endapan Batu Bara (Studi Kasus : Air Limbah Industri Percetakan Semarang)*.
- Irdemez, S., Özyay, G., Torun, E., Kul, S., & Bingül, Z. (2022). Comparison of Bomaplex Blue CR-L Removal by Adsorption Using Raw and Activated Pumpkin Seed Shells. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 29, 199–216. <https://doi.org/10.2478/eces-2022-0015>
- 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/cleantechol6010013>
- Kalinkin, A., Gurevich, B., Myshenkov, M., Chislov, M., Kalinkina, E., Zvereva, I., Cherkezova-Zheleva, Z., Paneva, D., & Petkova, V. (2020). Synthesis of Fly Ash-Based Geopolymers: Effect of Calcite Addition and Mechanical Activation. *Minerals*. <https://doi.org/10.3390/min10090827>
- Kobayashi, Y., Ogata, F., Nakamura, T., & Kawasaki, N. (2020). Synthesis of novel zeolites produced from fly ash by hydrothermal treatment in alkaline solution and its evaluation as an adsorbent for heavy metal removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8, 103687. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103687>
- Meili, L., Lins, P., Costa, M. T., Almeida, R., Abud, A., Soletti, J., Dotto, G., Tanabe, E., Sellaoui, L., Carvalho, S., & Erto, A. (2019). Adsorption of methylene blue on agroindustrial wastes: Experimental investigation and phenomenological modelling. *Progress in Biophysics and*



- Molecular Biology*, 141, 60–71.
<https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2018.07.011>
- Mufrodi, Z., Sutrisno, B., & Hidayat, A. (2010). Modifikasi Limbah Abu Layang Sebagai Material Baru Adsorben. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*, 1–6.
- Roldán-Cruz, C., García-Hernández, Á., Álvarez-Ramírez, J., & Vernon-Carter, E. (2021). Effect of the stirring speed in the in vitro activity of α -amylase. *Food Hydrocolloids*, 110, 106127. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106127>
- Saha, A., Sekharan, S., Manna, U., & Sahoo, L. (2020). Transformation of non-water sorbing fly ash to a water sorbing material for drought management. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75674-6>
- Simion, A., Grigoras, C., & Favier, L. (2025). Batch Adsorption of Orange II Dye on a New Green Hydrogel—Study on Working Parameters and Process Enhancement. *Gels*, 11. <https://doi.org/10.3390/gels11010079>
- Smith, M., South, A., Gaulding, J., & Lyon, L. (2010). Monitoring the erosion of hydrolytically-degradable nanogels via multiangle light scattering coupled to asymmetrical flow field-flow fractionation. *Analytical Chemistry*, 82(2), 523–530. <https://doi.org/10.1021/ac901725m>
- Visa, M., & Chelaru, A. M. (2014). Hydrothermally modified fly ash for heavy metals and dyes removal in advanced wastewater treatment. *Applied Surface Science*, 303, 14–22.
- Wang, H., Hu, B., Li, H., Feng, G., Pan, S., Chen, Z., & Song, J. (2022). Biomimetic Mineralized Hydroxyapatite Nanofiber-Incorporated Methacrylated Gelatin Hydrogel with Improved Mechanical and Osteoinductive Performances for Bone Regeneration. *International Journal of Nanomedicine*, 17, 1511–1529. <https://doi.org/10.2147/ijn.s354127>
- Wardhana, B. S., Hanum, F. F., Lestari, R. S., Rahayu, D. E., Amini, R., Kimia, M. T., Industri, F. T., Dahlan, U. A., & Selatan, J. R. (2025). *Potensi Fly Ash dan Bottom Ash (FABA) sebagai Bahan Adsorben untuk Mengatasi Pencemaran Zat Warna Sintetis di Limbah Industri*.
- Wardhana, B. S., Hanum, F. F., Mufrodi, Z., Febriani, A. V., & Salamah, S. (2025). Comparison of Activation Methods for Coal Ash as an Adsorbent in the Removal of Lead (Pb²⁺) from Aqueous Solution. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 28(8), 452–462.
- Wardhana, B. S., Musnamar, A. A., Rahayu, D. E., Kimia, M. T., Industri, F. T., Dahlan, U. A., Selatan, J. R., & Yogyakarta, D. I. (2024). Pengolahan Air Limbah Industri: Pendekatan Metode Adsorpsi. *Jurnal Kemuhammadiyahan Dan Integrasi Ilmu*, 213–225.
- Zhao, H., Xie, M., He, S., Lin, S., Wang, S., & Liu, X. (2025). Development of a Novel Nanoclay-Doped Hydrogel Adsorbent for Efficient Removal of Heavy Metal Ions and Organic Dyes from Wastewater. *Gels*, 11. <https://doi.org/10.3390/gels11040287>