

Studi Literatur: Potensi Material Fe_3O_4 /Zeolit sebagai Adsorben Efektif untuk Pengolahan Limbah Cair Industri

Mohamad Rizki Ramadhani¹, Alya Rahimah², Erwan Adi Saputro^{1,2,3*}, Ardika Nurmawati¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

²Magister Ilmu Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

³Pusat Penelitian Teknologi Karbon, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: erwanadi.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 30 Oktober 2025

Disetujui: 20 November 2025

Abstract

The increasing activities of industries such as textiles, metal plating, mining, and pharmaceuticals have also generated large amounts of hazardous organic and inorganic wastewater. Adsorption has become a preferred method for treating such waste, particularly through the use of zeolite materials modified with magnetite (Fe_3O_4) to enhance efficiency and ease of separation. The Fe_3O_4 /zeolite material exhibits high adsorption capacity toward various pollutants, making it a potential adsorbent for industrial wastewater treatment. This review aims to examine the potential of Fe_3O_4 /zeolite as an adsorbent through a literature study by collecting and analyzing secondary data from various scientific publications. The selected literature was analyzed to compare synthesis methods, operating conditions, and adsorption efficiencies in order to obtain a comprehensive understanding of the performance and adsorption mechanism of Fe_3O_4 /zeolite. Based on the review, Fe_3O_4 /zeolite demonstrates good adsorption efficiency, with recorded values ranging from 42% to 99%.

Keywords: Fe_3O_4 /zeolite, adsorption, wastewater treatment, synthesis method

Abstrak

Peningkatan aktivitas industri seperti tekstil, pelapisan logam, pertambangan, dan farmasi juga telah menghasilkan banyak limbah cair organik maupun anorganik yang berbahaya. Metode adsorpsi menjadi pilihan untuk pengolahan limbah tersebut, terutama dengan penggunaan material zeolit yang dimodifikasi magnetit (Fe_3O_4) guna meningkatkan efisiensi dan kemudahan pemisahan. Material Fe_3O_4 /zeolit menunjukkan kemampuan adsorpsi tinggi terhadap berbagai polutan, menjadikannya adsorben potensial dalam pengolahan limbah cair industri. Penulisan *review* jurnal ini bertujuan untuk mengkaji potensi material Fe_3O_4 /zeolit sebagai adsorben melalui studi literatur dengan mengumpulkan dan menganalisis data sekunder dari berbagai publikasi ilmiah. Literatur yang terpilih dianalisis untuk membandingkan metode sintesis, kondisi operasi, serta efisiensi adsorpsi guna memperoleh gambaran komprehensif mengenai performa dan mekanisme adsorpsi material Fe_3O_4 /zeolit. Berdasarkan hasil kajian, material Fe_3O_4 /zeolit memiliki efisiensi adsorpsi yang baik dengan nilai efisiensi adsorpsi yang tercatat memiliki rentang 42% hingga 99%.

Kata Kunci: Fe_3O_4 /zeolit, adsorpsi, pengolahan limbah cair, metode sintesis

1. Pendahuluan

Industrialisasi dan peningkatan populasi di Indonesia telah menyebabkan penurunan kualitas lingkungan. Peningkatan aktivitas industri seperti tekstil, pelapisan logam, pertambangan, dan farmasi juga telah menghasilkan banyak limbah cair organik maupun anorganik yang berbahaya. Limbah organik seperti metilen biru, basic violet, dan zat warna sintesis lainnya banyak dijumpai pada industri tekstil. Limbah organik zat warna sintesis tersebut sulit untuk didegradasi karena stabilitas kimianya yang tinggi [1]. Selain itu, limbah anorganik seperti ion logam berat berupa Cr^{6+} , Pb^{2+} , Cu^{2+} , dan Cd^{2+} bersifat toksik, tidak dapat terurai, serta mudah terakumulasi di jaringan organisme hidup sehingga bersifat karsinogenik dan gangguan fungsi organ [2],[3]. Berbagai metode telah banyak yang dikembangkan untuk mengolah limbah cair, seperti presipitasi, filtrasi, membran, pertukaran ion, dan adsorpsi. Diantara beberapa metode tersebut, adsorpsi dinilai menjadi yang paling efektif karena prosesnya yang sederhana, ekonomis, serta mampu menghilangkan polutan atau limbah tanpa menghasilkan *secondary waste* [4].

Sebagai salah satu material yang banyak digunakan dalam proses adsorpsi, zeolit dikenal memiliki struktur pori dengan luas permukaan yang besar, kestabilan termal tinggi, serta kemampuan tukar ion yang baik [5]. Namun, zeolit murni memiliki keterbatasan seperti ukuran pori yang terlalu kecil, kemungkinan

terjadinya aglomerasi tinggi, serta sulit dipisahkan ketika adsorpsi [6]. Sehingga diperlukan suatu modifikasi untuk meningkatkan efisiensi dan kemudahan pemanfaatannya. Salah satu metode yang dapat dipakai untuk modifikasi zeolit adalah penggabungan zeolit dengan material magnetit (Fe_3O_4). Fe_3O_4 memiliki sifat superparamagnetik, stabilitas kimia tinggi, dan dapat dengan mudah dipisahkan dari larutan menggunakan medan magnet eksternal [7]. Penggabungan Fe_3O_4 dan zeolit menghasilkan material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ yang memiliki keunggulan ganda, yaitu kemampuan adsorpsi tinggi dari zeolit dan kemudahan pemisahan magnetik dari Fe_3O_4 . Material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ memiliki potensi besar untuk diaplikasikan dalam pengolahan berbagai polutan, sebagaimana dibuktikan oleh beberapa penelitian yang menunjukkan bahwa material tersebut mampu mengadsorpsi metilena biru hingga 97,7%, Pb^{2+} sebesar 95,15%, dan Cr^{6+} mencapai 84,17% dan beberapa polutan lain [8],[6],[2].

Kemampuan adsorpsi tersebut disebabkan oleh sifat permukaan Fe_3O_4 pada zeolit yang dapat membentuk gugus $\text{Fe}-\text{OH}$ yang mengalami protonasi menjadi $\text{Fe}-\text{OH}_2^+$ pada kondisi asam sehingga efektif mengadsorpsi polutan bermuatan negatif seperti kromium (VI) dalam bentuk HCrO_4^- dan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$, serta mengalami deprotonasi menjadi $\text{Fe}-\text{O}^-$ pada kondisi basa yang memperkuat interaksi dengan polutan bermuatan positif seperti ion logam berat lain dan pewarna kationik [9], [10], [11]. Untuk memperoleh material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ dengan karakteristik yang optimal, berbagai metode sintesis telah dikembangkan seperti co-precipitation, hidrotermal, impregnasi, microwave-assisted, dan ultrasound-assisted [12],[13],[14]. Review jurnal ini bertujuan untuk membahas lebih detail mengenai potensi material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ sebagai adsorben berbagai polutan cair.

2. Metode Penelitian

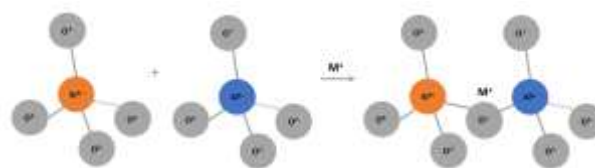
Metode penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur dengan pengumpulan data sekunder yang diperoleh dari berbagai publikasi ilmiah terkait sintesis dan aplikasi material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ sebagai adsorben. Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran artikel ilmiah menggunakan basis data daring seperti Google Scholar, ScienceDirect, dan ResearchGate. Pencarian literatur difokuskan pada penelitian-penelitian yang diterbitkan dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir (2015–2025) untuk memperoleh informasi yang relevan dan mutakhir. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi “sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ ”, “adsorpsi $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ ”, “*magnetic zeolite composite*”, dan “ Fe_3O_4 zeolit *pollutant removal*”.

Literatur yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kesesuaian topik dengan fokus penelitian, yaitu sintesis, karakterisasi, serta efektivitas $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ dalam proses adsorpsi berbagai jenis polutan. Setiap publikasi yang terpilih dikaji lebih lanjut untuk mengidentifikasi metode sintesis yang digunakan, kondisi operasi seperti pH dan waktu kontak, serta nilai efisiensi adsorpsi yang dihasilkan. Hasil kajian kemudian dibandingkan dan disusun secara sistematis untuk memperoleh gambaran umum mengenai performa material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ serta mekanisme adsorpsi yang terjadi. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk menarik kesimpulan komprehensif mengenai pengaruh komposisi dan kondisi sintesis terhadap kemampuan adsorpsi material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ dalam pengolahan limbah cair.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Zeolit

Zeolit merupakan mineral aluminosilikat yang tersusun dari unit tetrahedral $[\text{SiO}_4]^{4-}$ dan $[\text{AlO}_4]^{5-}$ yang saling terhubung atom oksigen [15]. Ketidakseimbangan muatan akibat keberadaan membuat kerangka zeolit bermuatan negatif, yang kemudian dinetralkan oleh kation-kation seperti Na^+ , Ca^{2+} , atau K^+ [16]. Sifat ini membuat zeolit mampu melakukan pertukaran ion, yaitu kation penetral dapat digantikan dengan kation lain tanpa merusak kerangkanya (**Gambar 1**). Selain itu, struktur tiga dimensi zeolit membentuk pori dengan ukuran sekitar 2 nm, yang menghasilkan luas permukaan zeolit tinggi [17].



Gambar 1. Struktur dasar penyusun zeolit dan kerangka Zeolit
 Sumber: [18]

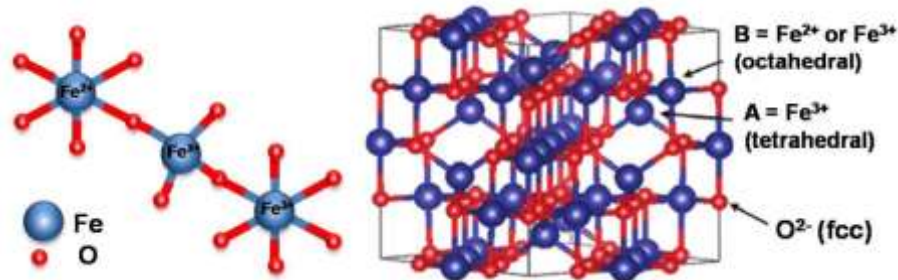
Karakteristik ini membuat zeolit umum digunakan dalam proses adsorpsi polutan. Proses adsorpsi pada zeolit berlangsung melalui beragam mekanisme interaksi, seperti kontak elektrostatik, ikatan

hidrogen, pengisian pori, interaksi π - π , serta pembentukan kompleks [5] Berbagai studi telah melaporkan efektivitas zeolit alami maupun sintetis dalam mengadsorpsi limbah, termasuk ion logam Cu^{2+} dan Ni^{2+} (99,54; 88,99 mg/g), metilen biru (48,7 mg/g), serta senyawa farmasi seperti diazepam (8,05 mg/g) [19].

Zeolit terbagi menjadi dua jenis, yaitu zeolit alam dan zeolit sintesis. Zeolit alam terbentuk secara alami dari batuan vulkanik maupun sedimen, seperti chabazite, clinoptilolite, dan mordenit. Meskipun mudah ditemukan, zeolit alam memiliki beberapa keterbatasan seperti diameter pori yang kecil dan adanya pengotor mineral atau logam [20]. Sementara itu, zeolit sintesis dapat diproduksi menyesuaikan sifat fisikokimia sesuai kebutuhan aplikasi, konsistensi kualitas yang lebih tinggi, mempunyai kapasitas sorpsi yang baik [21].

3.2 Magnetit (Fe_3O_4)

Magnetit (Fe_3O_4) adalah material oksida besi berwarna hitam yang memiliki sifat magnetik paling kuat diantara senyawa oksida besi lainnya. Fe_3O_4 banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang seperti pemisahan, biokimia, penyimpanan data, bahan pengontras, penghantaran obat, serta terapi kanker [7]. Fe_3O_4 pada skala nano menunjukkan sifat superparamagnetik dengan domain magnet tunggal yang menghasilkan magnetisasi saturasi tinggi (92 emu/g pada suhu ruang) dan respon cepat terhadap medan magnet eksternal [22]. Fe_3O_4 memiliki juga memiliki potensi sebagai agen fotokatalis yang mempercepat oksidasi dan reduksi dengan bantuan cahaya karena sifatnya yang semikonduktor dengan *band gap* sebesar 1-3 eV [23]. Nanopartikel Fe_3O_4 memiliki biaya produksi yang rendah, toksisitas rendah, dan stabilitas yang baik. Terdapat beberapa metode sintesis Fe_3O_4 seperti *co-precipitation*, *hydrothermal*, *microwave-assisted*, *impregnasi*, dan *sonochemical* [24]. Kristal Fe_3O_4 memiliki bentuk struktur *inverse spinel cubic*. Ion-ion Fe^{2+} menempati struktur oktahedral, sedangkan ion-ion Fe^{3+} terbagi menempati struktur oktahedral dan juga tetrahedral seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 2**. dimana molekul serta ion Fe berwarna biru dan oksigen berwarna merah [25].



Gambar 2. Struktur dasar kerangka Fe_3O_4

Sumber: [25]

3.3 Material Fe_3O_4 /Zeolit

Berbagai penelitian telah melaporkan aplikasi zeolit dalam pengolahan air limbah, dan saat ini fokus riset semakin mengarah pada pengembangan material berbasis zeolit dengan berbagai modifikasi untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi. Salah satu material yang banyak dikaji adalah Fe_3O_4 /zeolit, yang menggabungkan zeolit yang struktur berpori dan luas permukaan tinggi, dengan Fe_3O_4 yang memiliki stabilitas serta sifat magnetik [7]. Modifikasi zeolit ini menghasilkan kapasitas adsorpsi lebih besar, aksesibilitas situs aktif yang lebih baik, dan respons cepat terhadap medan magnet, menjadikannya potensial untuk aplikasi industri [24], [26].

Tabel 1. Rangkuman metode sintesis Fe_3O_4 /zeolit

No	Metode	Penjelasan	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
1	Co-precipitation	Metode sintesis yang melibatkan pencampuran dua larutan garam logam yang mengandung (ion Fe^{2+} dan Fe^{3+}) dan penambahan agen presipitat berupa basa.	Metode sederhana, efisien, dan ekonomis	<ul style="list-style-type: none"> • Dispersi partikel yang kurang baik di permukaan zeolit • Ukuran partikel yang tidak seragam 	[12] [27]
2	Hidrotermal	Metode hidrotermal dilakukan dalam suatu larutan di bejana bertekanan tinggi seperti autoklaf.	<ul style="list-style-type: none"> • Menghasilkan material dengan kemurnian magnetit tinggi 	<ul style="list-style-type: none"> • Memerlukan tekanan tinggi (0,3–4 MPa) di dalam autoklaf 	[28] [29] [14]

No	Metode	Penjelasan	Kelebihan	Kekurangan	Sumber
		Kondisi operasi dilakukan pada suhu 120–160°C selama 3–6 jam dalam autoklaf bertekanan tinggi (0,3–4 MPa).	<ul style="list-style-type: none"> tanpa penambahan agen pelindung seperti gas N₂ Mampu mengontrol morfologi dan ukuran partikel Menghasilkan partikel yang seragam dan terdispersi di permukaan zeolit 	<ul style="list-style-type: none"> Waktu sintesis relatif lama (beberapa jam hingga lebih dari 6 jam) Memerlukan peralatan khusus (autoklaf tahan tekanan dan suhu tinggi) 	
3	<i>Microwave-assisted</i>	Menggunakan bantuan gelombang microwave, di mana larutan prekursor (ion Fe ²⁺ dan Fe ³⁺ , presipitasi basa, dan zeolite) diaduk pada suhu kamar, kemudian dipanaskan menggunakan gelombang mikro berdaya 600 W (2.45 GHz) untuk mempercepat reaksi pembentukan Fe ₃ O ₄ .	<ul style="list-style-type: none"> Pemanasan merata dan cepat Menghasilkan partikel monodispersi dengan ukuran kecil dan distribusi seragam. Efisiensi energi tinggi dan langkah sintesis lebih sederhana. 	<ul style="list-style-type: none"> Menggunakan peralatan khusus (microwave reaktor) yang mampu menahan tekanan tinggi. Skala produksi besar masih sulit dilakukan Reaksi yang terlalu cepat menyebabkan pembentukan fase yang tidak sempurna. 	[30] [31] [32]
4	Impregnation	Mencampurkan Fe ₃ O ₄ secara langsung ke dalam suspensi zeolit dalam air deionisasi di bawah atmosfer N ₂ dan diaduk hingga homogen. Bahan yang digunakan terdiri dari zeolit alam dan serbuk Fe ₃ O ₄	<ul style="list-style-type: none"> Prosedur sederhana dan tidak memerlukan reaksi kimia kompleks Tidak memerlukan kontrol pH atau bahan pengendap tambahan seperti NH₄OH 	<ul style="list-style-type: none"> Dispersi Fe₃O₄ kurang merata pada permukaan zeolit dibanding metode kopresipitasi Luas permukaan dan daya adsorpsi cenderung lebih rendah 	[6]
5	<i>Ultrasound-assisted</i>	Menggunakan bantuan gelombang ultrasonik (gelombang berfrekuensi > 20.000 Hz) untuk mempercepat dan memaksimalkan distribusi partikel. Material disintesis dengan larutan prekursor yang mengandung ion Fe ²⁺ dan Fe ³⁺ , presipitat basa, dan zeolite.	<ul style="list-style-type: none"> Proses cepat, efisien, dan hemat energi Menghasilkan partikel berukuran seragam dengan dispersi tinggi Dapat mengontrol ketebalan lapisan dan porositas melalui pengaturan intensitas ultrasound dan waktu reaksi 	<ul style="list-style-type: none"> Membutuhkan peralatan ultrasonik khusus dengan kontrol daya presisi Efisiensi dapat menurun jika parameter sonikasi (waktu, amplitudo) tidak dioptimalkan 	[13]

Tabel 1 menunjukkan beberapa metode telah dikembangkan untuk mensintesis material Fe₃O₄/zeolit. Metode co-precipitation merupakan metode sintesis Fe₃O₄/zeolit dengan cara mengendapkan Fe₃O₄, bersamaan dengan prekursor zeolit dalam suatu larutan [14]. Pembentukan Fe₃O₄ dilakukan dari dua larutan garam logam yang mengandung ion Fe²⁺ dan Fe³⁺ sebagai bahawan awal dengan penambahan larutan basa sebagai agen pengendap [12]. Co-precipitation umum digunakan karena metodenya yang sederhana. [33] berhasil mensintesis Fe₃O₄/zeolit Na-Y menggunakan FeCl₃.6H₂O, FeSO₄.7H₂O dan NH₄OH sebagai pengendap dalam pelarut demineralized water atau HCl [33]. Hasil karakterisasi mengonfirmasi keberhasilan pembentukan Fe₃O₄/zeolit Na-Y dengan pelarut demineralized water Fe₃O₄/zeolit yang baik. Metode co-precipitation juga telah berhasil mensintesis Fe₃O₄/zeolite alam pada penelitian [34]

Metode hidrotermal merupakan metode mensintesis material melalui pembentukan kristal dari reaksi kimia dalam larutan air pada kondisi suhu dan tekanan yang tinggi [14]. [35] berhasil menambahkan Fe₃O₄

pada prekursor zeolit NaA menggunakan metode hidrotermal pada suhu 95 °C selama 8 jam. Hasil karakterisasi SEM menunjukkan Fe₃O₄ berhasil menempel permukaan zeolit NaA tanpa mempengaruhi morfologinya [36]. Selain itu, [37] melakukan sintesis Fe₃O₄/ZSM-5 melalui metode hidrotermal dengan menggunakan prekursor FeCl₃ dalam pelarut etilen glikol dan natrium asetat selama 190°C dan 24 jam menghasilkan material dengan kristalinitas yang lebih tinggi dari metode coprecipitation [37].

Metode *microwave-assisted* memanfaatkan iradiasi gelombang mikro selama proses sintesis yang menghasilkan efek termal yang dapat meningkatkan laju reaksi dan memungkinkan reaksi yang sulit terjadi secara konvensional [38]. [31] mensintesis Fe₃O₄/zeolit alam dengan metode *microwave-assisted* coprecipitation selama 5, 7, dan 9 menit (600 W, 2.45 GHz). Hasil karakterisasi menunjukkan Fe₃O₄/zeolit alam berhasil terbentuk, dengan ukuran kristal yang meningkat seiring penambahan waktu iradiasi. [31] juga menyatakan penggunaan microwave berperan dalam mempercepat dan memperbaiki proses pembentukan kristal [31].

Metode impregnasi memanfaatkan interaksi fisik antara serbuk zeolit yang tersuspensi dalam air dan serbuk Fe₃O₄, di mana campuran tersebut terus diaduk secara konstan untuk memastikan distribusi partikel yang merata [6]. [39] melakukan metode impregnasi untuk mensintesis Fe₃O₄/zeolit alam, namun metode ini menghasilkan distribusi partikel Fe₃O₄ yang kurang merata dan ukuran partikel lebih besar, karena interaksi dengan zeolit hanya bersifat fisik tanpa ikatan kimia. Akibatnya, karakteristik permukaan dan pori zeolit kurang optimal dibandingkan metode co-precipitation, meskipun adsorben tetap dapat digunakan [6].

Metode *ultrasound-assisted* menggunakan gelombang ultrasonik (frekuensi > 20.000 Hz) untuk mempercepat reaksi dan menghasilkan partikel yang lebih merata. Gelombang ultrasonik menimbulkan fenomena kavitasi, yaitu terbentuknya gelembung-gelembung kecil yang meledak dan melepaskan energi besar, menciptakan kondisi yang mendukung reaksi kimia [40]. [41] sebelumnya telah melakukan sintesis Fe₃O₄/borosilikat zeolit dengan metode *ultrasound-assisted* co-precipitation (Sonicator 2200 MH S3, 40 kHz) [41]. Serta [3] yang juga melakukan sintesis Fe₃O₄/bentonite dengan metode *ultrasound-assisted* co-precipitation (Sonicator 2200 MH S3). Menurut [3], ultrasound membantu penempelan Fe₃O₄ pada bentonite lebih merata dan menghasilkan luas permukaan lebih besar dan lapisan nanopartikel yang lebih halus dan tidak menyumbat pori bentonit [3].

3.3 Karakterisasi Material Fe₃O₄/Zeolit

Karakterisasi material Fe₃O₄/zeolit dilakukan untuk mengetahui sifat fisis, kimia, dan struktural hasil sintesis yang berperan penting dalam menentukan kinerja material pada berbagai aplikasi seperti adsorpsi, katalis, dan pemisahan magnetic [34]. Setiap metode karakterisasi memiliki fungsi spesifik untuk mengungkap aspek tertentu dari material, baik morfologi, struktur kristal, maupun sifat kemagnetannya. Analisis secara komprehensif diperlukan agar hubungan antara kondisi sintesis dan sifat material dapat dipahami dengan baik. Karakterisasi yang tepat dapat memaksimalkan potensi aplikasi material dengan mengamati sejauh mana interaksi antara partikel Fe₃O₄ dan kerangka zeolit terbentuk. Hasil karakterisasi menjadi dasar penting dalam menilai keberhasilan sintesis dan potensi aplikatif dari material Fe₃O₄/zeolit yang dihasilkan. **Tabel 2** berikut menjelaskan mengenai metode karakterisasi material Fe₃O₄/Zeolit yang umum digunakan.

Tabel 2. Karakterisasi Material Fe₃O₄/Zeolit

No.	Metode Karakterisasi	Tujuan	Prinsip Kerja / Mekanisme	Informasi yang diperoleh	Sumber
1.	SEM (Scanning Electron Microscopy)	Menganalisis morfologi permukaan dan struktur dari material Fe ₃ O ₄ /zeolit	Menembakkan berkas elektron ke permukaan sampel, kemudian mendeteksi elektron pantul yang dihasilkan	bentuk, ukuran, dan distribusi partikel serta morfologi permukaan material	[42] [43]
2.	EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)	Menganalisis komposisi unsur pada material	Mengukur sinar-X karakteristik yang dipancarkan dari sampel ketika ditembakkan oleh berkas elektron	Mengidentifikasi unsur-unsur penyusun (Fe, Si, Al, O, Na, dll.) serta menentukan persentase komposisinya pada material	[28]
3.	XRD (X-Ray Diffraction)	Mengidentifikasi struktur kristal dan fase material	Menembakkan sinar-X ke sampel dan menganalisis	Struktur, ukuran kristal, tingkat kristalinitas, dan identifikasi fase	[34] [44]

No.	Metode Karakterisasi	Tujuan	Prinsip Kerja / Mekanisme	Informasi yang diperoleh	Sumber
			pola difraksi yang terbentuk sesuai hukum Bragg	material zeolite dan Fe ₃ O ₄	
4.	FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)	Mengidentifikasi gugus fungsi dan jenis ikatan pada struktur zeolit	Mengukur serapan radiasi inframerah oleh ikatan kimia dalam sampel dan menghasilkan spektrum khas	Menunjukkan jenis gugus fungsi, ikatan Si-O, Al-O, Fe-O, serta perubahan struktur selama sintesis material	[10] [45]
5.	BET (Brunauer-Emmett-Teller)	Menentukan luas permukaan, volume pori, dan distribusi ukuran pori material	Mengukur jumlah gas (N ₂) yang teradsorpsi pada permukaan sampel pada berbagai tekanan relative	Memberikan data luas permukaan spesifik, volume pori, dan distribusi ukuran pori dari material	[46] [47]
6.	VSM (Vibrating Sample Magnetometer)	Mengukur sifat kemagnetan material	Sampel digetarkan di medan magnet eksternal untuk menghasilkan sinyal induksi yang sebanding dengan momen magnetik	Menunjukkan nilai magnetisasi jenuh (Ms), koersivitas (Hc), dan remanensi (Mr) untuk menentukan sifat superparamagnetic material	[48]

Berdasarkan hasil karakterisasi yang disajikan pada **Tabel 2**, analisis SEM menunjukkan morfologi dan distribusi partikel Fe₃O₄ yang merata pada permukaan zeolit, menandakan keberhasilan pembentukan komposit [42]. Hasil EDX mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan adanya unsur Fe, Si, Al, dan O yang menegaskan keterikatan Fe₃O₄ pada matriks zeolit [28]. Pola difraksi XRD mengonfirmasi keberadaan fase magnetit Fe₃O₄ yang khas tanpa mengubah struktur kristalin zeolit secara signifikan [34], [44]. Spektrum FTIR menunjukkan adanya pita serapan khas Fe-O, Si-O, dan Al-O yang mengindikasikan interaksi kimia antara komponen penyusun material [10]. Analisis BET memperlihatkan penurunan luas permukaan akibat pengisian sebagian pori oleh partikel Fe₃O₄, namun masih menunjukkan karakter mesopori yang baik [46]. Sementara itu, hasil VSM menunjukkan sifat superparamagnetik dengan nilai magnetisasi jenuh (Ms) yang tinggi, sehingga material Fe₃O₄/zeolit mudah dipisahkan dengan medan magnet eksternal [48]. Secara keseluruhan, hasil karakterisasi dapat membuktikan bahwa sintesis Fe₃O₄/zeolit berhasil atau tidak menghasilkan material dengan struktur stabil, interaksi kuat antara komponen, serta sifat magnetik yang mendukung aplikasinya.

3.3 Aplikasi Fe₃O₄/Zeolit dalam Pengolahan Air Limbah

Modifikasi zeolit dengan Fe₃O₄ banyak menarik perhatian untuk dimanfaatkan dalam aplikasi lingkungan khususnya pengolahan air limbah. Selain menambah situs aktif pada zeolit [24], Fe₃O₄ memiliki sifat magnetik memudahkan proses separasi dari medium liquid dengan menggunakan medan magnet eksternal, tanpa menggunakan metode konvensional seperti sentrifugasi dan filtrasi [49]. Material Fe₃O₄/Zeolit telah banyak dikaji dalam proses penghilangan sejumlah limbah melalui proses adsorpsi dikarenakan karakteristik luas permukaannya yang besar dan selektivitasnya. Adsorpsi merupakan proses fisikokimia untuk menghilangkan berbagai jenis polutan dari suatu badan cair menuju adsorben berfase padat [14]. Beberapa kajian adsorpsi polutan berbagai Fe₃O₄/zeolit dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Rangkuman kajian adsorpsi berbagai polutan oleh Fe₃O₄/zeolit

No	Material	Polutan	Jumlah adsorben (mg)	Konsentrasi awal (mg/L)	pH	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi Removal (%)	Sumber
1	Zeolit NaA/Fe ₃ O ₄	Cr ⁶⁺	200	12	4	20	69,23	[50]
2	Zeolit alam/ Fe ₃ O ₄	Metilen blue	25	10	9	60	95	[34]
3	Fe ₃ O ₄ /Zeolit borosilikat	Metilen blue	100	20	-	150	98,28	[41]

No	Material	Polutan	Jumlah adsorben (mg)	Konsentrasi awal (mg/L)	pH	Waktu Kontak (menit)	Efisiensi Removal (%)	Sumber
		Nitrat	200	30	4	90	85,51	
		BOD	100	98	6	180	100	
		COD	300	5000	6	180	60	
4	Fe ₃ O ₄ /Bentonite	Nitrat	600	30	7,5-8,5	90	79	[3]
		BOD	2000	397	7,5-8,5		84,88	
		COD	2000	1875	5,5-6,5	180	88,8	
5	Fe ₃ O ₄ /Zeolit NaA	Metilene blue	360	300	8,6	120	97,7	[28]
6	Fe ₃ O ₄ /Zeolit NaA	Ammonium	250	63,75	7	181	84,22	[36]
7	Zeolit alam/Fe ₃ O ₄	Pb ²⁺	12,5	150	3	90	95,15	[6]
8	Zeolite HY-Fe ₃ O ₄	Metilene blue	-	10	9	40	92,1	[49]
9	Zeolite13X-Fe ₃ O ₄	Metilene blue	-	10	9	40	88,5	[49]
10	Zeolite clinoptilolit/Fe ₃ O ₄	Basic violet 16	-	50	7	60	93,62	[51]
11	Activated Natural Zeolite-Fe ₃ O ₄	Cr ⁶⁺	200	10	2	50	84,17	[2]
12	Fe ₃ O ₄ /Clinoptilolite	Tetracycline	-	10	7	-	97,1	[52]
13	Zeolite/Fe ₃ O ₄	Blue 41 Cationic Dye	-	100	9	60	71,4	[53]
14	Zeolit Sintesis@Fly Ash Magnetic Spheres	Cu ²⁺	-	280	3,3	60	78	[54]
		Cd ²⁺	-	280	-	60	50	
		Pb ²⁺	-	280	-	60	28	
15	Fe ₃ O ₄ /zeolit LTA	Cu ²⁺	100	300	6	0-480	57	[55]
16	Magnetic zeolite	Crystal Violet	200	500	4	10	95	[56]
17	Fe ₃ O ₄ @TiO ₂ @Zeolite	Levofloxacin	200	60	-	20	84	[57]
18	Fe ₃ O ₄ /zeolit	Mn ²⁺	400	10	-	60	99,81	[57]
19	Fe ₃ O ₄ @Zeolit NaA	Metilene blue	50	20	9	25	86,5	[58]
20	Fe ₃ O ₄ /zeolit mordenit	COD	520	-	7,81	15,83	42,63	[59]
		BOD	520	-	7,81	15,83	65,28	

Berdasarkan **Tabel 3** berbagai penelitian menunjukkan bahwa material komposit Fe₃O₄/zeolit memiliki kemampuan adsorpsi yang tinggi terhadap beragam jenis polutan seperti logam berat (Cr⁶⁺, Cu²⁺, Pb²⁺, Cd²⁺), senyawa organik (BOD, COD), serta pewarna tekstil seperti metilene biru, crystal violet dan basic violet. Efisiensi adsorpsi yang tercatat umumnya melebihi 80%, bahkan mencapai 98% pada beberapa penelitian seperti yang dilaporkan oleh [41] dan [28]. Adsorpsi Hal ini membuktikan bahwa kombinasi antara zeolit dan Fe₃O₄ mampu meningkatkan performa adsorpsi dibandingkan penggunaan zeolit atau Fe₃O₄ tunggal. Zeolit berperan menyediakan luas permukaan yang besar dan situs pertukaran ion bermuatan negatif, sedangkan Fe₃O₄ menambah sifat magnetik sekaligus situs aktif tambahan pada permukaannya.

Secara mekanis, adsorpsi berlangsung melalui interaksi elektrostatik antara gugus bermuatan negatif pada kerangka zeolit, yaitu Si-O⁻ dan Al-O⁻, dengan ion bermuatan positif dari polutan seperti metilene biru (C=N⁺) atau logam Cu²⁺ dan Pb²⁺ [60]. Selain itu, Fe₃O₄ pada permukaan zeolit dapat membentuk gugus Fe-OH yang mengalami protonasi atau deprotonasi tergantung pada kondisi pH. Pada suasana asam,

gugus ini menjadi Fe-OH_2^+ sehingga mampu menarik polutan bermuatan negatif seperti kromium (VI) dalam bentuk HCrO_4^- dan $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ dan anion sejenisnya, sedangkan pada suasana basa gugus Fe-O^- mendominasi dan memperkuat adsorpsi terhadap kation logam berat [9], [10], [11]. Adanya interaksi ganda dari dua mekanisme ini menjadikan $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ efektif dalam menangani berbagai jenis polutan baik organik maupun anorganik.

Selain itu, material menunjukkan bahwa penggabungan Fe_3O_4 ke dalam struktur zeolit tidak hanya memberikan sifat magnetik yang memudahkan proses pemisahan adsorben, tetapi juga memperluas area permukaan aktif akibat terbentuknya ikatan Si-O-Fe [61]. Mekanisme pertumbuhan partikel Fe_3O_4 pada pori-pori zeolit melalui proses nukleasi dan Ostwald ripening turut berkontribusi dalam meningkatkan homogenitas distribusi Fe_3O_4 pada permukaan zeolit. Dengan demikian, kombinasi antara kemampuan pertukaran ion dari zeolit dan sifat magnetik serta aktif secara kimia dari Fe_3O_4 menghasilkan material komposit yang efisien, stabil, dan dapat digunakan kembali untuk pengolahan limbah cair yang mengandung zat berbahaya.

4. Kesimpulan

Material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ menjadi salah satu pengembangan inovatif yang menggabungkan keunggulan zeolit yang memiliki struktur berpori, luas permukaan besar, serta kemampuan tukar ion yang tinggi, dengan sifat magnetik dan gugus aktif Fe_3O_4 yang memudahkan proses pemisahan. Kombinasi Fe_3O_4 dan zeolit menghasilkan material dengan kemampuan adsorpsi yang tinggi terhadap berbagai polutan organik maupun anorganik, termasuk logam berat seperti Cr^{6+} , Pb^{2+} , dan Cu^{2+} , serta zat warna sintesis seperti metilen biru dan basic violet. Beragam metode sintesis seperti co-precipitation, hidrotermal, microwave-assisted, impregnasi, dan ultrasound-assisted telah dikembangkan untuk memperoleh karakteristik material yang optimal. Metode karakterisasi seperti XRD, SEM, EDX, BET, FTIR, dan VSM memiliki peran penting dalam memahami sifat fisikokimia material. Karakterisasi material $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ menunjukkan bahwa material memiliki struktur stabil, sifat superparamagnetik, serta situs aktif ganda yang mendukung efektivitas adsorpsi. Sehingga $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{zeolit}$ memiliki potensi besar sebagai adsorben multifungsi yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan air limbah industri di masa depan.

5. Referensi

- [1] N. B. T. Tran, N. B. Duong, and N. L. Le, "Synthesis and Characterization of Magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Zeolite NaA}$ Nanocomposite for the Adsorption Removal of Methylene Blue Potential in Wastewater Treatment," *J Chem*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6678588.
- [2] Y. A. B. Neolaka *et al.*, "Efficiency of activated natural zeolite-based magnetic composite (ANZ- Fe_3O_4) as a novel adsorbent for removal of Cr(VI) from wastewater," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 2896–2909, May 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.03.153.
- [3] M. Khatamian, B. Divband, and R. Shahi, "Ultrasound assisted co-precipitation synthesis of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{bentonite}$ nanocomposite: Performance for nitrate, BOD and COD water treatment," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 31, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100870.
- [4] P. L. Tran-Nguyen *et al.*, "Application of $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{thiamine}$ Magnetic Particles in the Removal of Methylene Blue," *Applied Environmental Research*, vol. 45, no. 4, Oct. 2023, doi: 10.35762/AER.2023018.
- [5] S. Kumari, J. Chowdhry, M. Kumar, and M. Chandra Garg, "Zeolites in Wastewater Treatment: A Comprehensive Review on Scientometric Analysis, Adsorption Mechanisms, and Future Prospects," Nov. 01, 2024, *Academic Press Inc.* doi: 10.1016/j.envres.2024.119782.
- [6] T. Pambudi, E. T. Wahyuni, and M. Mudasir, "Recoverable Adsorbent of Natural Zeolite/ Fe_3O_4 for Removal of Pb(II) in Water," *J. Mater. Environ. Sci*, vol. 2020, no. 1, p. 69, 2020, [Online]. Available: <http://www.jmaterenvironsci.com>
- [7] M. Sinurat, D. Riski Gusti, F. Deswardani, Safitri, and Sudiby, "Synthesis and Characterization Magnetite Nanoparticles (Fe_3O_4) from Iron Sand in Batanghari River Encapsulated Silica," *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, vol. 9, no. 1, pp. 106–114, 2021
- [8] N. B. T. Tran, N. B. Duong, and N. L. Le, "Synthesis and Characterization of Magnetic $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{Zeolite NaA}$ Nanocomposite for the Adsorption Removal of Methylene Blue Potential in Wastewater Treatment," *J Chem*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6678588.
- [9] H. Wang, X. Liu, and Z. Zhang, "Approaches for electroplating sludge treatment and disposal technology: Reduction, pretreatment and reuse," Jan. 01, 2024, *Academic Press.* doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119535.

- [10] M. Asanu, D. Beyene, and A. Befekadu, "Removal of Hexavalent Chromium from Aqueous Solutions Using Natural Zeolite Coated with Magnetic Nanoparticles: Optimization, Kinetics, and Equilibrium Studies," *Adsorption Science and Technology*, vol. 2022, no. 1, pp. 1–22, 2022, doi: 10.1155/2022/8625489.
- [11] R. Agnestisia, "Sintesis dan Karakterisasi Magnetit (Fe₃O₄) serta Aplikasinya sebagai Adsorben MethyleneBlue," *Sains dan Terapan Kimia*, vol. 11, no. 2, pp. 61–70, 2017.
- [12] C. C. Lin, J. M. Ho, and M. S. Wu, "Continuous preparation of Fe₃O₄ nanoparticles using a rotating packed bed: Dependence of size and magnetic property on temperature," *Powder Technol*, vol. 274, pp. 441–445, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.01.013.
- [13] T. T. Bui, D. C. Nguyen, S. H. Hua, H. Chun, and Y. S. Kim, "Sonochemical Preparation of a Magnet-Responsive Fe₃O₄@ZIF-8 Adsorbent for Efficient Cu²⁺ Removal," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 5, p. 753, Feb. 2022, doi: 10.3390/nano12050753.
- [14] S. Vohl, I. Ban, J. Stergar, and M. Slemnik, "Synthesis, Characterization, and Application of Magnetic Zeolite Nanocomposites: A Review of Current Research and Future Applications," Jun. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/nano15120921.
- [15] X. He, B. Yao, Y. Xia, H. Huang, Y. Gan, and W. Zhang, "Coal fly ash derived zeolite for highly efficient removal of Ni²⁺ in waste water," *Powder Technol*, vol. 367, pp. 40–46, May 2020, doi: 10.1016/j.powtec.2019.11.037.
- [16] C. W. Purnomo, N. Putri, I. Perdana, and H. Hinode, "Ethanol Purification Using Activated Natural Zeolite," *Makara Journal of Technology*, vol. 21, no. 2, p. 93, Aug. 2017, doi: 10.7454/mst.v21i2.3086.
- [17] J. Yu and D. Zhao, "Preface to special topic on new era of zeolite science," Sep. 01, 2022, *Oxford University Press*. doi: 10.1093/nsr/nwac157.
- [18] S. M. Kanan and M. A. Moyet, "Fabricated metal zeolites as photocatalysts for the degradation of organic pollutants," Feb. 01, 2021, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11164-021-04416-8.
- [19] E. Svobodová *et al.*, "Adsorption of Cu(II) and Ni(II) from Aqueous Solutions Using Synthesized Alkali-Activated Foamed Zeolite Adsorbent: Isotherm, Kinetic, and Regeneration Study," *Molecules*, vol. 29, no. 10, May 2024, doi: 10.3390/molecules29102357.
- [20] N. Kordala and M. Wyszowski, "Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications," Mar. 01, 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/molecules29051069.
- [21] M. Król, "Natural vs. Synthetic zeolites," *Crystals (Basel)*, vol. 10, no. 7, pp. 1–8, Jul. 2020, doi: 10.3390/cryst10070622.
- [22] K. Nee Koo, A. Fauzi Ismail, M. Hafiz Dzarfan Othman, M. A. Rahman, and T. Zhong Sheng, "Preparation and characterization of superparamagnetic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles: A short review," *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 15, no. 1, pp. 23–31, 2019.
- [23] I. Safitri, Y. G. Wibowo, D. Rosarina, and Sudibyo, "Synthesis and characterization of magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles from iron sand in Batanghari Beach," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Jan. 2021. doi: 10.1088/1757-899X/1011/1/012020.
- [24] M. M. Ba-Abbad, A. Benamour, D. Ewis, A. W. Mohammad, and E. Mahmoudi, "Synthesis of Fe₃O₄ Nanoparticles with Different Shapes Through a Co-Precipitation Method and Their Application," *JOM*, vol. 74, no. 9, pp. 3531–3539, Sep. 2022, doi: 10.1007/s11837-022-05380-3.
- [25] D. Arista, A. Rachmawati, N. Ramadhani, R. E. Saputro, A. Taufiq, and Sunaryono, "Antibacterial Performance of Fe₃O₄/PEG-4000 Prepared by Co-precipitation Route," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2019. doi: 10.1088/1757-899X/515/1/012085.
- [26] F. Bahmanzadegan, A. Ghaemi, and R. Norouzbeigi, "Ecofriendly novel hydrophobic core-shell zeolite@MOF nanoadsorbent for CO₂ capture," *Journal of CO₂ Utilization*, vol. 100, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.jcou.2025.103183.
- [27] E. Nyankson *et al.*, "Characterization and Evaluation of Zeolite A/Fe₃O₄ Nanocomposite as a Potential Adsorbent for Removal of Organic Molecules from Wastewater," *J Chem*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1155/2019/8090756.
- [28] N. B. T. Tran, N. B. Duong, and N. L. Le, "Synthesis and Characterization of Magnetic Fe₃O₄/Zeolite NaA Nanocomposite for the Adsorption Removal of Methylene Blue Potential in Wastewater Treatment," *J Chem*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/6678588.

- [29] N. Torres-Gómez, O. Nava, L. Argueta-Figueroa, R. García-Contreras, A. Baeza-Barrera, and A. R. Vilchis-Nestor, "Shape tuning of magnetite nanoparticles obtained by hydrothermal synthesis: Effect of temperature," *J Nanomater*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/7921273.
- [30] S. Haghjoo, M. Kavand, C. L. Lengauer, H. Kazemian, and M. Roushani, "Enhanced herbicide removal using an innovative NaP1-Fe3O4-La(OH)3 zeolite: Advances in water treatment and experimental modeling," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 386, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.micromeso.2024.113483.
- [31] F. Iskandar, P. Fitriani, S. Merissa, R. R. Mukti, Khairurrijal, and M. Abdullah, "Fe3O4/Zeolite nanocomposites synthesized by microwave assisted coprecipitation and its performance in reducing viscosity of heavy oil," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., 2014, pp. 132–135. doi: 10.1063/1.4866746.
- [32] T. Lu, F. Dang, H. Wang, Q. Zhao, and Z. Xu, "Experimental Study on Fe3O4 Nanoparticle-Assisted Microwave Enhancing Heavy Oil," *Geofluids*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6457186.
- [33] D. Astira *et al.*, "Comparing two synthesis methods: Exploring unique characteristics and catalytic activity of fenton catalyst Fe3O4/zeolite-NaY in methylene blue degradation," *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscee.2024.100963.
- [34] D. Rendo, "Adsorption of Methylene Blue Dye using Fe3O4 Magnetized Natural Zeolite Adsorbent," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 24, no. 2, pp. 51–57, Mar. 2021, doi: 10.14710/jksa.24.2.51-57.
- [35] H. Liu, S. Peng, L. Shu, T. Chen, T. Bao, and R. L. Frost, "Effect of Fe 3O 4 addition on removal of ammonium by zeolite NaA," *J Colloid Interface Sci*, vol. 390, no. 1, pp. 204–210, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.jcis.2012.09.010.
- [36] H. Liu, S. Peng, L. Shu, T. Chen, T. Bao, and R. L. Frost, "Effect of Fe 3O 4 addition on removal of ammonium by zeolite NaA," *J Colloid Interface Sci*, vol. 390, no. 1, pp. 204–210, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.jcis.2012.09.010.
- [37] N. Senamart *et al.*, "Improving the efficiency of Cr(vi) reduction and adsorption by Fe3O4 using ZSM-5 zeolite support prepared through various methods," *RSC Adv*, vol. 15, no. 8, pp. 5808–5821, Feb. 2025, doi: 10.1039/d4ra06845a.
- [38] Z. Liu, F. Miao, W. Hua, and F. Zhao, "Fe3O4 nanoparticles: Microwave-assisted Synthesis and Mechanism," *Mater Lett*, vol. 67, no. 1, pp. 358–361, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.matlet.2011.09.095.
- [39] T. Pambudi and H. I. Umam, "Synthesis of Magnetite-Modified Natural Zeolite Using Coprecipitation and Physical Mixing Techniques," *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 6, no. 3, p. 122, Oct. 2023, doi: 10.26418/indonesian.v6i3.66363.
- [40] S. Alizadeh, N. Fallah, and M. Nikazar, "An ultrasonic method for the synthesis, control and optimization of CdS/TiO 2 core-shell nanocomposites," *RSC Adv*, vol. 9, no. 8, pp. 4314–4324, 2019, doi: 10.1039/c8ra10155h.
- [41] R. Shahi and M. Khatamian, "Synthesis of magnetic borosilicate zeolite/graphene quantum dots nanocomposites for removal of nitrate and organic pollutants from water," *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-07746-4.
- [42] P. Nowak, B. Muir, A. Solinska, M. Franus, and T. Bajda, "Synthesis and characterization of zeolites produced from low-quality coal fly ash and wet flue gas desulphurization wastewater," *Materials*, vol. 14, no. 6, Mar. 2021, doi: 10.3390/ma14061558.
- [43] A. Mukaromah, I. Hasna Azizah, and T. Ariyadi, "Karakterisasi Membran Zeolit ZSM-5 Berdasarkan Variasi Jenis Dan Ukuran Kasa Dengan Pre-Treatment Direndam Dalam NaOH, HCl, Dan elektro-oksidasasi Dengan H2SO4," in *Prosiding Seminar Nasional Unimus*, Semarang: Unimus, 2018, pp. 1–12. [Online]. Available: <http://prosiding.unimus.ac.id>
- [44] V. Alfredo Reyes Villegas, J. Isaías De León Ramírez, E. Hernandez Guevara, S. Perez Sicairos, L. Angelica Hurtado Ayala, and B. Landeros Sanchez, "Synthesis and characterization of magnetite nanoparticles for photocatalysis of nitrobenzene," *Journal of Saudi Chemical Society*, vol. 24, no. 2, pp. 223–235, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jscs.2019.12.004.
- [45] M. Faisal, Suhartana, and Pardoyo, "Zeolit Alam Termodifikasi Logam Fe sebagai Adsorben Fosfat (PO4 3-) pada Air Limbah," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 18, no. 3, pp. 91–95, 5AD.
- [46] F. S. Irwansyah *et al.*, "How to Read and Determine the Specific Surface Area of Inorganic Materials using the Brunauer-Emmett-Teller (BET) Method," *ASEAN Journal of Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 61–70, Mar. 2024, doi: 10.17509/ajse.v4i1.60748.

- [47] Kadarisman and L. Nurhasanah, "Pengaruh Energi Aktivasi Terhadap Aktivitas Nanopartikel ZnFe₂O₄ Pada Advanced Oxidation Processes (AOPs) Sebagai Pengurai Rhodamine B," *Berkala Fisika*, vol. 24, no. 1, pp. 29–34, 2021.
- [48] E. S. Mirjavadi, R. M.A.Tehrani, and A. Khadir, "Effective adsorption of zinc on magnetic nanocomposite of Fe₃O₄/zeolite/cellulose nanofibers: kinetic, equilibrium, and thermodynamic study," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 32, pp. 33478–33493, Nov. 2019, doi: 10.1007/s11356-019-06165-z.
- [49] Z. Majid, A. A. AbdulRazak, and W. A. H. Noori, "Modification of Zeolite by Magnetic Nanoparticles for Organic Dye Removal," *Arab J Sci Eng*, vol. 44, no. 6, pp. 5457–5474, Jun. 2019, doi: 10.1007/s13369-019-03788-9.
- [50] N. T. Ngoc Mai *et al.*, "Adsorption of chromium (VI) ion using zeolite NaA/Fe₃O₄ composite derived from rice husk ash," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/947/1/012012.
- [51] A. Peyghami, A. Moharrami, Y. Rashtbari, S. Afshin, M. Vosuoghi, and A. Dargahi, "Evaluation of the efficiency of magnetized clinoptilolite zeolite with Fe₃O₄ nanoparticles on the removal of basic violet 16 (BV16) dye from aqueous solutions," *J Dispers Sci Technol*, vol. 44, no. 2, pp. 278–287, 2023, doi: 10.1080/01932691.2021.1947847.
- [52] M. Rouhani, S. D. Ashrafi, K. Taghavi, M. N. Joubani, and J. Jaafari, "Evaluation of tetracycline removal by adsorption method using magnetic iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) and clinoptilolite from aqueous solutions," *J Mol Liq*, vol. 356, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.molliq.2022.119040.
- [53] S. Afshin *et al.*, "Removal of basic blue-41 dye from water by stabilized magnetic iron nanoparticles on clinoptilolite zeolite," *Revista de Chimie*, vol. 71, no. 2, pp. 218–229, 2020, doi: 10.37358/RC.20.2.7919.
- [54] X. Zhang *et al.*, "Synthesis of a novel magnetic nano-zeolite and its application as an efficient heavy metal adsorbent," *Mater Res Express*, vol. 7, no. 8, pp. 1–18, Aug. 2020, doi: 10.1088/2053-1591/abab43.
- [55] S. Buzukashvili *et al.*, "Magnetic Zeolite: Synthesis and Copper Adsorption Followed by Magnetic Separation from Treated Water," *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/cryst13091369.
- [56] O. S. Amodu, T. V. Ojumu, S. K. Ntwampe, and O. S. Ayanda, "Rapid Adsorption of Crystal Violet onto Magnetic Zeolite Synthesized from Fly Ash and Magnetite Nanoparticles," *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*, vol. 05, no. 04, pp. 191–203, 2015, doi: 10.4236/jeas.2015.54016.
- [57] M. Lisa, P. L. Hariani, and M. Faizal, "Uji Persamaan Langmuir Dan Freundlich Pada Penyerapan Mn(II) Oleh Komposit Fe₃O₄-ZEOLIT," *Jurnal Teknik Lingkungan UNAND*, vol. 12, no. 2, pp. 114–119, Jul. 2015, doi: 10.25077/dampak.12.2.114-119.2015
- [58] L. H. V. Thanh, H. Q. Bao, N. D. Nhan, N. V. N. Hoa, T. Q. Q. Viet, and L. T. Phu, "Synthesis of Fe₃O₄@zeolite NaA NaA from rice husk ash for efficient methylene blue adsorption," *CTU Journal of Innovation and Sustainable Development*, vol. 17, no. 1, pp. 8–18, Mar. 2025, doi: 10.22144/ctujoisd.2025.016.
- [59] R. H. Hesas, M. S. Baei, H. Rostami, J. Gardy, and A. Hassanpour, "An investigation on the capability of magnetically separable Fe₃O₄/mordenite zeolite for refinery oily wastewater purification," *J Environ Manage*, vol. 241, pp. 525–534, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.09.005.
- [60] S. Oukil, F. Bali, and D. Halliche, "Adsorption and kinetic studies of methylene blue on modified HUSY zeolite and an amorphous mixture of γ -alumina and silica," *Separation Science and Technology (Philadelphia)*, vol. 55, no. 15, pp. 2642–2658, Oct. 2020, doi: 10.1080/01496395.2019.1645174.
- [61] F. Ahangaran, A. Hassanzadeh, and S. Nouri, "Surface modification of Fe₃O₄@SiO₂ microsphere by silane coupling agent," *Int Nano Lett*, vol. 3, no. 1, pp. 1–6, Dec. 2013, doi: 10.1186/2228-5326-3-23.