

Penurunan Kadar Logam Cr(VI) Dan Zat Warna Dari Limbah Batik Menggunakan Adsorben Zeolit Terimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ Dengan Metode Adsorpsi

Eka Ayu Lintang Ambarwati¹, Siti Nur Faizah¹, Susilowati^{1*}, Sri Redjeki¹, Ely Kurniati¹

^{1*} Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Email: susilowati.tk@upnjatim.ac.id

Abstract

Batik wastewater contains hexavalent chromium (Cr(VI)) and synthetic dyes that pose environmental risks. This study aimed to evaluate the performance of natural zeolite activated with 2 M HCl and impregnated with $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ for removing Cr(VI) and color from batik wastewater using a fixed-bed adsorption column. The investigated variables were flow rates of 400–1400 mL/min and adsorbent masses of 350–550 g. The adsorbent was characterized using Brunauer–Emmett–Teller (BET) and Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM–EDS). BET analysis showed that activation increased the specific surface area by 29.28% and pore volume by 14.28%, while the pore diameter remained relatively unchanged within the mesoporous range. SEM–EDS analysis showed an increase in Fe content from 3.73 to 9.12 wt% after impregnation. The adsorption results showed that increasing the adsorbent mass tended to improve Cr(VI) and color removal, whereas increasing the flow rate tended to decrease removal efficiency. The best operating conditions within the investigated range were an adsorbent mass of 550 g and a flow rate of 400 mL/min, yielding final concentrations of 0.75 mg/L for Cr(VI) and 198.8 Pt-Co for color. Both values were below the reference limits used in this study, 1 mg/L for Cr(VI) and 200 Pt-Co for color. These results indicate the potential of the treatment process to reduce both pollutant parameters below the specified reference limits.

Keywords: Batik wastewater, adsorption, zeolite, impregnation, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

Abstrak

Industri batik menghasilkan limbah cair yang mengandung logam berat Cr(VI) dan zat warna sintesis yang berpotensi mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kemampuan zeolit alam yang diaktivasi menggunakan HCl 2 M dan diimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ sebagai adsorben dalam menurunkan kadar Cr(VI) dan zat warna limbah batik menggunakan sistem adsorpsi kolom tetap (fixed-bed column). Variasi yang dikaji meliputi laju alir 400–1400 mL/menit dan massa adsorben 350–550 g. Karakterisasi adsorben dilakukan menggunakan BET dan SEM-EDS. Hasil BET menunjukkan bahwa aktivasi meningkatkan luas permukaan zeolit sebesar 29,28% dan volume pori sebesar 14,28%, sedangkan diameter pori relatif tetap pada kisaran mesopori. Analisis SEM-EDS menunjukkan peningkatan kandungan Fe dari 3,73 menjadi 9,12 wt% setelah impregnasi. Hasil adsorpsi menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben cenderung meningkatkan penyisihan Cr(VI) dan zat warna, sedangkan peningkatan laju alir cenderung menurunkan efisiensi penyisihan. Kondisi operasi terbaik dalam rentang percobaan diperoleh pada massa adsorben 550 g dan laju alir 400 mL/menit, dengan konsentrasi akhir Cr(VI) sebesar 0,75 mg/L dan zat warna sebesar 198,8 Pt-Co. Kedua nilai tersebut berada di bawah batas konsentrasi yang digunakan sebagai acuan penelitian, yaitu 1 mg/L untuk Cr(VI) dan 200 Pt-Co untuk zat warna, sehingga menunjukkan potensi pengolahan dalam menurunkan kedua parameter pencemar hingga di bawah nilai acuan tersebut.

Kata kunci: Limbah batik, adsorpsi, impregnasi, zeolit, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

1. Pendahuluan

Peningkatan aktivitas industri telah memberikan dampak terhadap penurunan kualitas lingkungan, terutama pada badan perairan yang menerima pembuangan limbah cair [1]. Salah satu industri yang berkontribusi terhadap pencemaran air adalah industri batik. Limbah cair batik umumnya mengandung logam berat dan zat warna sintetis yang bersifat toksik, sulit terdegradasi, serta dapat terakumulasi di lingkungan [2,3]. Salah satu logam berat yang banyak ditemukan pada limbah batik adalah kromium heksavalen (Cr(VI)), yang diketahui memiliki toksisitas tinggi, bersifat karsinogenik, dan membahayakan kesehatan manusia maupun ekosistem perairan [4]. Selain itu, zat warna sintetis yang digunakan pada proses pewarnaan batik memiliki struktur kimia yang stabil sehingga sulit diuraikan secara alami dan dapat menghambat penetrasi cahaya ke dalam perairan [3,5]. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019, kadar maksimum Cr(VI) dalam limbah industri tekstil adalah 1 mg/L, sedangkan kadar warna sebesar 200 Pt-Co [6]. Hasil karakterisasi limbah batik yang digunakan pada penelitian ini menunjukkan kadar Cr(VI) sebesar 3,69 mg/L, zat warna sebesar 978 Pt-Co, dan pH sebesar 3,45, sehingga diperlukan metode pengolahan yang efektif sebelum limbah dibuang ke lingkungan.

Adsorpsi merupakan salah satu metode pengolahan limbah yang banyak digunakan karena memiliki proses yang sederhana, biaya operasional relatif rendah, serta efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan berbagai jenis polutan [7,8]. Salah satu adsorben yang banyak dimanfaatkan adalah zeolit alam karena memiliki struktur aluminosilikat berpori, luas permukaan yang besar, kapasitas pertukaran ion yang tinggi, serta ketersediaan yang melimpah [9,10]. Namun demikian, kemampuan adsorpsi zeolit alam masih terbatas akibat jumlah situs aktif yang relatif sedikit dan sebagian pori masih tertutup oleh pengotor.

Oleh karena itu, diperlukan modifikasi terhadap zeolit untuk meningkatkan luas permukaan dan ketersediaan situs aktif sehingga kemampuan adsorpsinya berpotensi meningkat [11].

Modifikasi zeolit dapat dilakukan melalui aktivasi menggunakan larutan HCl yang berfungsi menghilangkan pengotor, membuka pori-pori, serta meningkatkan luas permukaan spesifik adsorben [11,12]. Setelah proses aktivasi, impregnasi menggunakan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dilakukan untuk menambahkan spesies Fe(III) pada permukaan zeolit. Berdasarkan penelitian terdahulu, modifikasi permukaan menggunakan spesies besi berpotensi menyediakan situs aktif yang dapat berinteraksi dengan polutan dalam larutan [13,14]. Spesies besi pada permukaan adsorben berpotensi membentuk gugus hidroksil Fe-OH yang dapat berperan dalam interaksi dengan anion Cr(VI). Pada kondisi asam, Cr(VI) dapat berada dalam bentuk HCrO_4^- , sedangkan interaksinya dengan permukaan yang mengandung besi dapat melibatkan pembentukan kompleks permukaan, bergantung pada karakteristik adsorben dan kondisi larutan [15,16]. Selain itu, interaksi antara permukaan yang mengandung besi dan gugus sulfonat pada zat warna berpotensi berkontribusi terhadap penyisihan zat warna dari larutan [17,18]. Meskipun demikian, mekanisme interaksi tersebut perlu dikaji lebih lanjut dan tidak dapat dipastikan hanya berdasarkan hasil karakterisasi BET dan SEM-EDS.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melaporkan bahwa laju alir dan massa adsorben merupakan parameter penting yang memengaruhi kinerja adsorpsi pada sistem kolom tetap (fixed-bed column). Laju alir yang rendah memberikan waktu kontak yang lebih lama antara adsorbat dan adsorben sehingga dapat meningkatkan peluang terjadinya adsorpsi [19,20], sedangkan peningkatan massa adsorben dapat menambah jumlah adsorben yang tersedia dalam kolom [21]. Penelitian lain juga menunjukkan bahwa impregnasi zeolit menggunakan FeCl_3 mampu meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap logam berat dan zat warna [22]. Temuan tersebut menjadi dasar

untuk mengkaji potensi modifikasi zeolit menggunakan senyawa besi lainnya. Namun, penggunaan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ sebagai bahan impregnasi pada zeolit untuk penyisihan Cr(VI) dan zat warna limbah batik masih relatif jarang dilaporkan. Selain itu, kajian mengenai pengaruh laju alir dan massa adsorben terhadap kinerja zeolit terimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ pada sistem adsorpsi kontinu juga masih terbatas. Oleh karena itu, diperlukan pengujian eksperimental untuk mengevaluasi kinerja adsorben tersebut pada kondisi operasi yang berbeda.

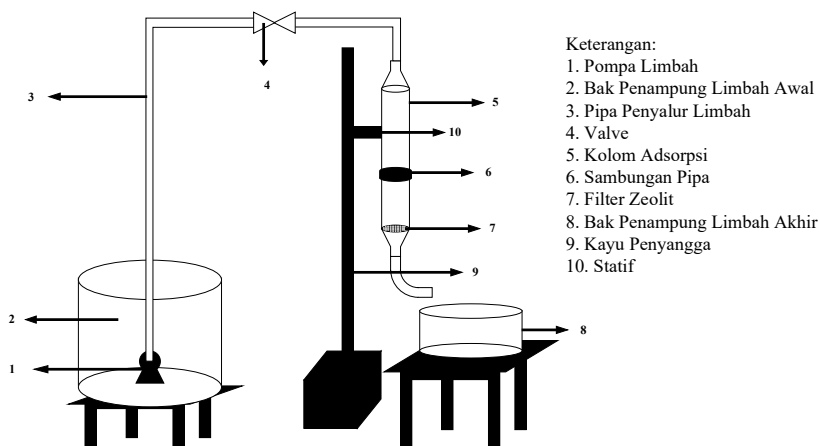
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan zeolit alam yang diaktivasi menggunakan HCl 2 M dan diimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dalam menurunkan kadar Cr(VI) dan zat warna pada limbah cair batik menggunakan sistem fixed-bed column. Pengaruh variasi laju alir 400–1400 mL/menit dan massa adsorben 350–550 g terhadap penyisihan Cr(VI) dan zat warna dianalisis untuk menentukan kondisi operasi terbaik dalam rentang percobaan. Selain itu, karakterisasi menggunakan Brunauer–Emmett–Teller (BET) dan Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray

Spectroscopy (SEM–EDS) dilakukan untuk mengevaluasi perubahan luas permukaan, volume pori, diameter pori, dan komposisi unsur adsorben setelah proses aktivasi dan impregnasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi eksperimental mengenai kinerja zeolit terimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dalam penyisihan Cr(VI) dan zat warna pada limbah batik.

2. Metoda Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Alat yang digunakan adalah rangkaian kolom adsorpsi yang terbuat dari pipa PVC (Gambar 1.). Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi limbah cair batik yang diperoleh dari salah satu industri batik di Kabupaten Gresik, Jawa Timur, zeolit alam, asam klorida (HCl), besi (III) sulfat ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), dan akuades. Zeolit alam digunakan sebagai adsorben utama, sedangkan HCl digunakan sebagai aktivator untuk meningkatkan karakteristik permukaan zeolit. $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ digunakan sebagai bahan impregnasi untuk membentuk situs aktif Fe–OH pada permukaan zeolit.



Gambar 1. Rangkaian Alat Adsorpsi

2.2. Aktivasi Zeolit

Zeolit alam dicuci menggunakan akuades untuk menghilangkan pengotor, kemudian dikeringkan pada suhu 110 °C selama 3 jam. Zeolit kering selanjutnya diaktivasi

menggunakan larutan HCl 2 M dengan perbandingan zeolit terhadap larutan sebesar 1:3 (b/v). Proses aktivasi dilakukan menggunakan pengaduk magnetik pada suhu 30 °C dengan kecepatan 250 rpm selama 2 jam.

Setelah proses aktivasi selesai, zeolit disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 200 °C selama 2 jam. Zeolit teraktivasi selanjutnya digunakan sebagai bahan untuk proses impregnasi.

2.3. Impregnasi Zeolit

Zeolit teraktivasi diimpregnasi menggunakan larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 0,5 M dengan perbandingan zeolit terhadap larutan sebesar 1:3 (b/v). Campuran diaduk pada suhu 30 °C dengan kecepatan 250 rpm selama 3 jam. Setelah proses impregnasi, sampel disaring dan dicuci menggunakan akuades hingga mencapai pH netral. Sampel kemudian dikalsinasi pada suhu 500 °C selama 2 jam untuk memperoleh adsorben zeolit terimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

Karakteristik adsorben setelah proses aktivasi dan impregnasi dievaluasi menggunakan analisis BET dan SEM-EDS untuk mengetahui perubahan luas permukaan, volume pori, diameter pori, dan komposisi unsur. Peningkatan kandungan Fe setelah impregnasi digunakan sebagai indikator perubahan komposisi unsur pada adsorben. Evaluasi kinerja adsorben difokuskan pada pengaruh variasi laju alir dan massa adsorben terhadap penyisihan kedua parameter pencemar.

2.4. Adsorpsi

Percobaan adsorpsi dilakukan menggunakan kolom adsorpsi aliran kontinu (fixed-bed column) dengan tinggi kolom 100 cm dan diameter 3 in. Limbah batik sebanyak 2 L dialirkan melalui kolom yang berisi adsorben $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ /zeolit. Variasi laju alir yang digunakan adalah 400, 650, 900, 1150, dan 1400 mL/menit, sedangkan variasi massa adsorben adalah 350, 400, 450, 500, dan 550 g. Adsorben yang digunakan memiliki ukuran partikel 100 mesh. Tinggi lapisan adsorben (bed height) untuk massa 350, 400, 450, 500, dan 550 g masing-masing sebesar 9,59; 10,96; 12,34; 13,71; dan 15,08 cm. Pada setiap perubahan laju alir maupun massa adsorben digunakan adsorben baru untuk menghindari

pengaruh penggunaan berulang dan kejenuhan adsorben terhadap hasil penelitian.

Pengambilan sampel dilakukan pada akhir proses adsorpsi untuk menentukan konsentrasi akhir Cr(VI) dan zat warna pada efluen. Pengambilan sampel secara berkala selama proses adsorpsi tidak dilakukan. Oleh karena itu, data penelitian digunakan untuk mengevaluasi perubahan konsentrasi akhir dan efisiensi penyisihan pada variasi kondisi operasi yang diuji, tetapi belum dapat digunakan untuk menyusun kurva breakthrough atau menentukan kapasitas adsorpsi dinamis.

Analisis Cr(VI) dilakukan menggunakan spektrofotometer UV-Visible berdasarkan SNI 6989.71:2009 tentang cara uji krom heksavalen (Cr(VI)) dalam contoh uji secara spektrofotometri. Pengukuran dilakukan pada panjang gelombang 530–540 nm sesuai prosedur standar. Analisis warna dilakukan berdasarkan SNI 6989.80:2011 tentang cara uji warna secara spektrofotometri, menggunakan panjang gelombang 450–465 nm dan larutan standar Pt-Co. Konsentrasi Cr(VI) dan warna ditentukan berdasarkan hasil pengukuran absorbansi dan kurva kalibrasi masing-masing parameter.

Efisiensi penyisihan Cr(VI) dan warna dihitung berdasarkan perbandingan konsentrasi awal dan konsentrasi akhir menggunakan persamaan:

$$\mu = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$

Dengan μ adalah efisiensi penyisihan (%), C_0 adalah konsentrasi awal, dan C_e adalah konsentrasi akhir setelah proses adsorpsi. Konsentrasi Cr(VI) dinyatakan dalam mg/L, sedangkan konsentrasi warna dinyatakan dalam Pt-Co.

3. Hasil Penelitian

Penelitian ini meliputi analisis terhadap bahan baku serta produk yang dihasilkan selama proses berlangsung. Bahan baku berupa zeolit, baik sebelum maupun sesudah aktivasi menggunakan larutan HCl 2 M, dianalisis dengan metode BET (Brunauer-Emmett-Teller) untuk menentukan luas permukaan

spesifik dan karakteristik porinya. Selain itu, zeolit baik sebelum maupun sesudah impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dianalisis menggunakan metode SEM-EDS (Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-Ray) untuk mengamati morfologi permukaan serta komposisi unsur yang terkandung. Produk hasil proses dianalisis menggunakan spektrofotometri UV-Vis untuk mengukur kadar logam berat Cr(VI) dan zat warna (Pt-Co). Dengan demikian, analisis ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan sifat adsorben dan efektivitas proses adsorpsi yang terjadi.

Tabel 1. Karakteristik Awal Limbah Batik

Parameter		Unit
Cr(VI)	3.69	mg/L
Zat Warna	978	Pt-Co

3.1. Analisis Luas Permukaan Zeolit dengan BET

Analisis luas permukaan zeolite dilakukan menggunakan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET). Karakterisasi BET dilakukan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik fisik zeolite setelah proses aktivasi sebagai tahap persiapan sebelum impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

Tabel 2. Hasil Analisis BET

Nama	Luas Permukaan (m^2/g)	Volume Pori (cm^3/g)	Diameter Pori (nm)
Sebelum Aktivasi	99.07	0.14	3.64
Sesudah Aktivasi	128.08	0.16	3.65
Persentase	29.28%	14.28%	0.27%

Hasil analisis BET pada Tabel 2 menunjukkan bahwa aktivasi zeolit menggunakan HCl 2 M meningkatkan luas permukaan spesifik dari 99,07 m^2/g menjadi 128,08 m^2/g atau sebesar 29,28%. Volume pori juga meningkat dari 0,14 cm^3/g menjadi 0,16 cm^3/g atau sebesar 14,28%. Peningkatan kedua parameter tersebut menunjukkan adanya perubahan karakteristik tekstural zeolit setelah aktivasi. Luas permukaan spesifik yang lebih besar menunjukkan bertambahnya luas permukaan yang dapat diakses oleh molekul

adsorbat, sedangkan peningkatan volume pori mengindikasikan perubahan pada ruang pori yang tersedia. Perubahan karakteristik ini berpotensi mendukung proses kontak antara adsorben dan polutan dalam limbah batik. Meskipun demikian, hasil BET belum dapat memastikan bahwa peningkatan tersebut secara langsung meningkatkan jumlah situs aktif atau menjadi penyebab utama peningkatan penyisihan Cr(VI) dan zat warna.

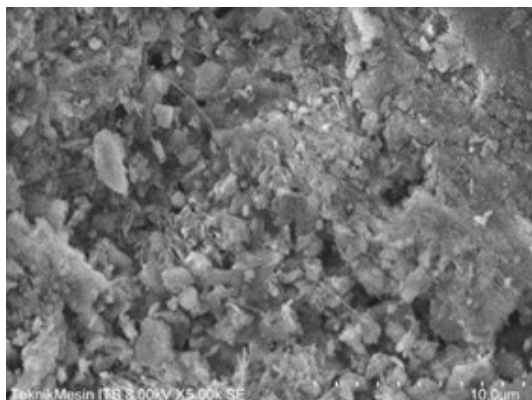
Diameter pori zeolit hanya mengalami perubahan kecil, dari 3,64 menjadi 3,65 nm, sehingga relatif tidak berubah setelah aktivasi dan tetap berada dalam rentang mesopori, yaitu 2–50 nm [23]. Karakteristik ini menunjukkan bahwa perubahan tekstural yang terukur terutama terlihat pada luas permukaan spesifik dan volume pori, sedangkan diameter pori rata-rata relatif stabil. Hasil tersebut relevan untuk mengevaluasi karakteristik adsorben sebelum impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, karena luas permukaan dan struktur pori merupakan parameter fisik yang dapat memengaruhi aksesibilitas adsorbat terhadap permukaan adsorben. Namun, aksesibilitas aktual juga dipengaruhi oleh karakteristik polutan dan kondisi operasi adsorpsi.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Hor (2016) yang menunjukkan bahwa perlakuan fisikokimia, termasuk aktivasi asam, dapat mengubah karakteristik permukaan zeolit dan memengaruhi kinerja adsorpsinya terhadap zat warna [24]. Penelitian lain mengenai zeolit alam teraktivasi asam juga melaporkan potensi penggunaannya untuk penyisihan Cr(VI) dari larutan berair [25]. Hasil penelitian tersebut mendukung penggunaan aktivasi asam sebagai tahap modifikasi awal adsorben. Akan tetapi, perubahan luas permukaan dan volume pori pada penelitian ini belum dapat digunakan untuk menyimpulkan keberhasilan impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ maupun membuktikan mekanisme interaksi antara besi, Cr(VI), dan zat warna. Evaluasi kontribusi impregnasi secara khusus memerlukan perbandingan kinerja adsorpsi zeolit tanpa perlakuan, zeolit teraktivasi, dan zeolit terimpregnasi pada kondisi operasi yang setara.

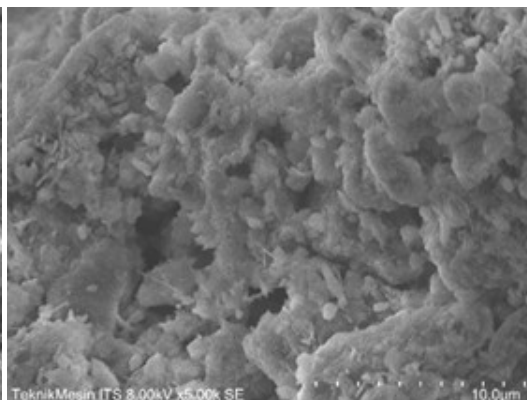
3.2. Analisis Struktur Zeolit dengan SEM-EDS

Karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM) dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan zeolit sebelum dan sesudah impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ pada perbesaran 5000 $\times$, sedangkan Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)

digunakan untuk mengidentifikasi komposisi unsur penyusun adsorben hasil impregnasi. Penggunaan SEM-EDS dipilih karena tidak hanya mampu memberikan informasi morfologi permukaan secara detail, tetapi juga dapat mendeteksi keberadaan dan distribusi unsur Fe yang terimpregnasi pada zeolit.



Gambar 2. Hasil SEM Zeolit Aktivasi



Gambar 3. Hasil SEM Zeolit Impregnasi

Berdasarkan Gambar 2, permukaan zeolit setelah aktivasi masih menunjukkan butiran kristal dengan pori yang terbuka, mengindikasikan bahwa aktivasi berhasil membersihkan permukaan dan meningkatkan akses menuju pori [26]. Setelah impregnasi pada Gambar 3, permukaan zeolit tampak lebih

kasar dan seragam akibat deposisi spesies besi yang menutupi sebagian permukaan dan pori. Meskipun demikian, struktur dasar kristal zeolit tetap terjaga, menunjukkan bahwa impregnasi tidak merusak morfologi zeolit, tetapi membentuk struktur amorf [27].

Tabel 3. Hasil Analisa EDS

Elemen	Weight %		Atomic %		Net Int.		Error %	
	Zeolit Aktivasi	Zeolit Impregnasi	Zeolit Aktivasi	Zeolit Impregnasi	Zeolit Aktivasi	Zeolit Impregnasi	Zeolit Aktivasi	Zeolit Impregnasi
O	53.96	57.86	68.31	72.96	247.45	247.45	8.15	8.15
Mg	0.92	3.82	0.77	3.17	7.60	7.60	14.92	14.92
Al	6.59	5.25	4.95	3.93	69.23	69.23	6.26	6.26
Si	32.54	21.31	23.47	15.31	4.58	384.93	4.58	4.58
K	0.76	0.51	0.39	0.26	17.71	6.29	17.71	17.71
Ca	1.50	2.13	0.76	1.07	10.92	11.06	10.92	10.92
Fe	3.73	9.12	1.35	3.29	7.70	16.28	7.70	7.70

Hasil analisis EDS pada Tabel 3 menunjukkan bahwa adsorben tersusun atas unsur O, Mg, Al, Si, K, Ca, dan Fe yang merupakan karakteristik material aluminosilikat. Setelah impregnasi, kandungan Fe meningkat dari 3,73 menjadi 9,12 wt%, atau meningkat sebesar 144,5% berdasarkan persentase berat. Peningkatan tersebut

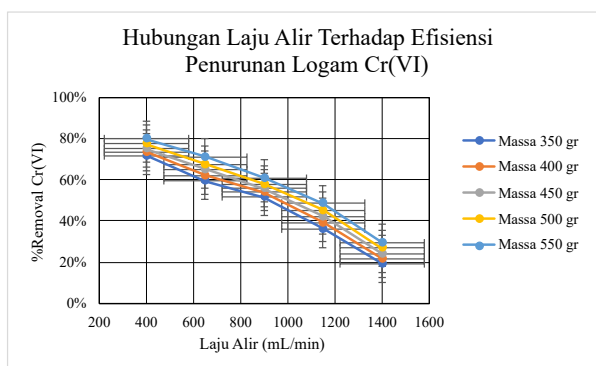
mengindikasikan adanya pengayaan unsur Fe pada material setelah impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ [28]. Namun, hasil EDS belum dapat memastikan bentuk senyawa besi yang terbentuk maupun mekanisme interaksinya dengan Cr(VI) dan zat warna. Oleh karena itu, hasil ini hanya mendukung adanya perubahan komposisi unsur setelah impregnasi dan belum

cukup untuk membuktikan peningkatan situs aktif atau kontribusi spesifik Fe terhadap kinerja adsorpsi.

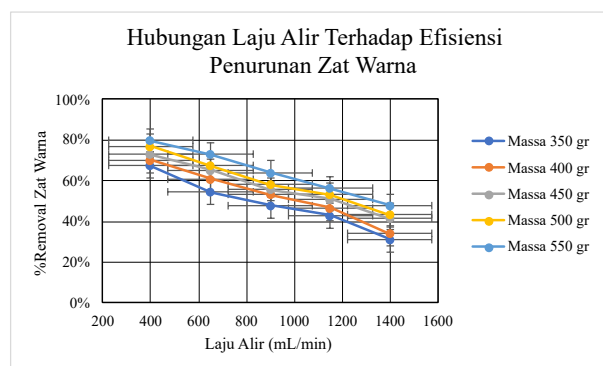
3.3. Analisis Kadar Logam Berat Cr(VI) dan Zat Warna

Kinerja adsorpsi zeolit terimpregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ pada sistem kolom kontinu dievaluasi melalui variasi laju alir dan massa adsorben. Parameter yang diamati meliputi perubahan konsentrasi Cr(VI) dan zat warna sebelum dan

sesudah proses adsorpsi untuk menentukan efisiensi penyisihan pada setiap kondisi operasi yang diuji. Selain itu, hasil pengujian digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan pengaruh laju alir dan massa adsorben terhadap kinerja penyisihan kedua parameter pencemar. Kondisi operasi terbaik ditentukan berdasarkan konsentrasi akhir Cr(VI) dan zat warna terendah yang diperoleh selama percobaan.



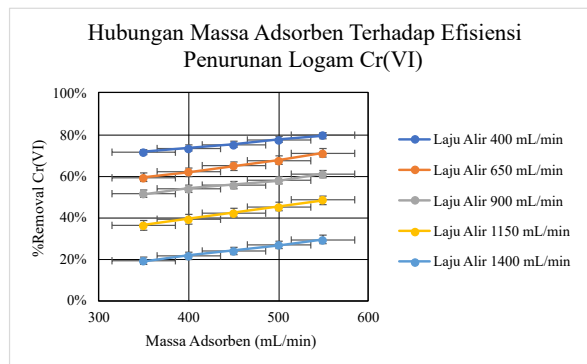
Gambar 4. Pengaruh Laju Alir terhadap Efisiensi Penurunan Kadar Cr(VI)



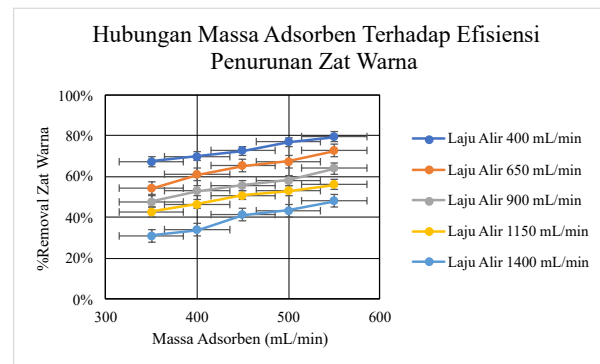
Gambar 5. Pengaruh Laju Alir terhadap Efisiensi Penurunan Zat Warna

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, peningkatan laju alir dari 400 menjadi 1400 mL/menit menurunkan persentase penyisihan Cr(VI) dan zat warna pada seluruh variasi massa adsorben. Penurunan ini berkaitan dengan berkurangnya waktu kontak antara limbah dan adsorben pada laju alir yang lebih tinggi, sehingga kesempatan terjadinya interaksi antara adsorbat dan permukaan adsorben menjadi lebih terbatas [20,21]. Pada kondisi pH awal limbah 3,45, Cr(VI)

diperkirakan dominan dalam bentuk HCrO_4^- [15], sedangkan zat warna Naphthol yang digunakan mengandung gugus sulfonat ($-\text{SO}_3^-$) [29]. Meskipun spesies tersebut berpotensi berinteraksi dengan permukaan adsorben, mekanisme pengikatannya belum dapat dipastikan berdasarkan data yang tersedia. Dengan demikian, penurunan efisiensi penyisihan pada laju alir yang lebih tinggi menunjukkan pentingnya waktu kontak dalam kinerja adsorpsi kolom kontinu.



Gambar 6. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Penurunan Logam Cr(VI)



Gambar 7. Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Penurunan Zat Warna

Berdasarkan Gambar 6 dan Gambar 7, peningkatan massa adsorben dari 350 menjadi 550 g meningkatkan persentase penyisihan Cr(VI) dan zat warna pada seluruh variasi laju alir. Peningkatan massa adsorben menambah jumlah material yang tersedia untuk kontak dengan limbah, sehingga berpotensi meningkatkan ketersediaan permukaan adsorpsi [21]. Pada penelitian ini, efisiensi penyisihan tertinggi diperoleh pada massa adsorben 550 g dan laju alir 400 mL/menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi massa adsorben yang lebih besar dan laju alir yang lebih rendah memberikan kinerja penyisihan terbaik dalam rentang kondisi yang diuji. Namun, karena pengujian perbandingan menggunakan zeolit tanpa aktivasi dan zeolit teraktivasi tidak dilakukan, peningkatan efisiensi tersebut belum dapat dikaitkan secara khusus dengan proses impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Selain itu, pengambilan sampel hanya dilakukan pada akhir proses dan setiap kondisi tidak dilengkapi pengulangan, sehingga kurva breakthrough, kapasitas adsorpsi dinamis, simpangan baku, dan signifikansi statistik tidak dapat ditentukan. Oleh karena itu, hasil ini terbatas pada perbandingan konsentrasi akhir dan efisiensi penyisihan berdasarkan variasi kondisi operasi yang diuji.

Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019, kadar maksimum Cr(VI) dan warna pada limbah industri tekstil masing-masing adalah 1 mg/L dan 200 Pt-Co.

Konsentrasi akhir Cr(VI) berada pada rentang 0,75–2,98 mg/L, sedangkan konsentrasi zat warna berkisar 198,8–673,1 Pt-Co. Kondisi terbaik diperoleh pada massa adsorben 550 g dan laju alir 400 mL/menit dengan konsentrasi Cr(VI) sebesar 0,75 mg/L dan zat warna 198,8 Pt-Co. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi laju alir terendah dan massa adsorben terbesar menghasilkan penyisihan polutan terbaik dalam rentang kondisi yang diuji. Sebaliknya, laju alir yang lebih tinggi memperpendek waktu kontak antara adsorbat dan adsorben sehingga proses adsorpsi belum berlangsung secara optimum [20], sedangkan massa adsorben yang rendah menyediakan lebih sedikit situs aktif untuk mengadsorpsi polutan [21].

Meskipun konsentrasi warna akhir sebesar 198,8 Pt-Co berada di bawah nilai acuan 200 Pt-Co, nilainya sangat dekat dengan batas tersebut. Oleh karena itu, hasil pengukuran ini belum cukup untuk memastikan pemenuhan baku mutu secara meyakinkan tanpa evaluasi ketidakpastian pengukuran. Selain itu, parameter yang dianalisis dalam penelitian ini adalah Cr(VI), sedangkan baku mutu dalam peraturan mengacu pada krom total. Dengan demikian, optimasi variabel operasi lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan penyisihan polutan dan memperoleh hasil pengolahan yang dapat memenuhi baku mutu yang berlaku.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, aktivasi zeolit menggunakan HCl 2 M meningkatkan

luas permukaan spesifik sebesar 29,28% dan volume pori sebesar 14,28%, sedangkan diameter pori relatif tidak berubah. Analisis SEM-EDS menunjukkan peningkatan kandungan Fe dari 3,73 menjadi 9,12 wt% setelah impregnasi $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan massa adsorben dan penurunan laju alir cenderung meningkatkan efisiensi penyisihan Cr(VI) dan zat warna. Kondisi operasi terbaik dalam rentang percobaan diperoleh pada massa adsorben 550 g dan laju alir 400 mL/menit, dengan konsentrasi akhir Cr(VI) sebesar 0,75 mg/L dan zat warna sebesar 198,8 Pt-Co. Meskipun menghasilkan penyisihan terbaik, konsentrasi warna akhir tersebut masih sangat mendekati batas maksimum baku mutu sebesar 200 Pt-Co. Oleh karena itu, optimasi variabel operasi lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan agar konsentrasi akhir polutan dapat memenuhi standar baku mutu.

5. Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan variasi konsentrasi larutan $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ pada proses impregnasi guna memperoleh jumlah situs aktif yang lebih optimum. Kajian mengenai kapasitas adsorpsi menggunakan model kinetika dan isotherm, serta analisis breakthrough curve pada sistem kolom tetap juga perlu dilakukan agar mekanisme adsorpsi dapat dipahami secara lebih mendalam.

6. Daftar Pustaka

- [1] N. M. Razi, F. Fildzah, D. N. Dhani, M. Nasir, A. Rizki, and F. Firdus, "Literatur review: Pencemaran logam berat di Pelabuhan Indonesia," *J. Laot Ilmu Kelaut.*, vol. 5, p. 48, 2023, doi: 10.35308/jlik.v5i1.7175.
- [2] M. Indah and W. Utami, "Identifikasi logam berat pada limbah cair batik menggunakan inductively coupled plasma-mass spectrometry: Kandungan logam berat dalam limbah batik," *JSSIT J. Sains dan Sains Terap.*, vol. 3, 2025, doi: 10.30631/jssit.v1i2.130.
- [3] Suhartini, A. K. Prodjosantoso, B. Octavia, and I. S. Yosephine Louise, "Eco-friendly bioremediation of batik dye waste using indigenous bacterial consortia," *Nat. Environ. Pollut. Technol.*, vol. 24, 2025, doi: 10.46488/NEPT.2025.v24i03.D1751.
- [4] T. T. Irianti, Kuswadi, S. Nuranto, and A. Budiyatni, *Logam Berat dan Kesehatan*. Yogyakarta, Indonesia: Grafika Indah, 2017.
- [5] Widowati, R. Sholikhah, Atika, Sudiyono, and K. Fidloiyah, "The effect of naphthol dyes composition on the results of shibori," in *Proc. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 700, 2021, Art. no. 012036, doi: 10.1088/1755-1315/700/1/012036.
- [6] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019*, 2019.
- [7] Yustinah, Hudzaifah, M. Aprilia, and Syamsudin, "Keseimbangan adsorpsi logam berat (Pb) dengan adsorben tanah diatomit secara batch," *Konversi*, vol. 9, pp. 17–28, 2019.
- [8] W. Laurentius, N. Safinatun, and I. Cahya, "Pembuatan adsorben berbahan baku tanah liat dari limbah industri pencucian pasir silika dengan perbedaan konsentrasi HCl dan waktu," *J. Res. Technol.*, vol. 6, pp. 10–15, 2020.
- [9] E. Kurniasih and Pardi, "Analisis pengaruh aktivasi zeolit alam Ujung Pancu terhadap peningkatan ester konten pada metil ester berbasis minyak sawit mentah," in *Proc. Semin. Nas. Politek. Negeri Lhokseumawe*, vol. 2, pp. 50–53, 2018.
- [10] N. Angraini, T. E. Agustina, and F. Hadiyah, "Pengaruh pH dalam pengolahan air limbah laboratorium dengan metode

- adsorpsi untuk penurunan kadar logam berat Pb, Cu, dan Cd," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 20, no. 2, pp. 345–355, 2022, doi: 10.14710/jil.20.2.345-355.
- [11] L. Velarde, M. S. Nabavi, E. Escalera, M. L. Antti, and F. Akhtar, "Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review," *Chemosphere*, vol. 328, Art. no. 138508, 2023, doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138508.
- [12] T. A. Zaharah, W. Aprilianti, and N. Wahyuni, "Adsorpsi ion besi pada lindi menggunakan zeolit alam teraktivasi asam klorida (HCl)," *J. Teknol. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 11, no. 2, pp. 571–578, 2023, doi: 10.26418/jtllb.v11i2.66164.
- [13] D. Guaya, C. Valderrama, A. Farran, and J. Cortina, "Modification of a natural zeolite with Fe(III) for simultaneous phosphate and ammonium removal from aqueous solutions," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 91, 2015, doi: 10.1002/jctb.4763.
- [14] G. Du *et al.*, "Cr(VI) retention and transport through Fe(III)-coated natural zeolite," *J. Hazard. Mater.*, vols. 221–222, pp. 118–123, 2012, doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.04.016.
- [15] M. Szabó *et al.*, "Equilibria and kinetics of chromium(VI) speciation in aqueous solution—A comprehensive study from pH 2 to 11," *Inorg. Chim. Acta*, vol. 472, pp. 295–301, 2018, doi: 10.1016/j.ica.2017.05.038.
- [16] C. P. Johnston and M. Chrysochoou, "Mechanisms of chromate adsorption on hematite," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 138, pp. 146–157, 2014, doi: 10.1016/j.gca.2014.04.030.
- [17] R. M. Cornell and P. W. Schindler, "Infrared study of the adsorption of hydroxycarboxylic acids on α -FeOOH and amorphous Fe(III) hydroxide," *Colloid Polym. Sci.*, vol. 258, pp. 1171–1175, 1980, doi: 10.1007/BF01382462.
- [18] J. Bandara, J. A. Mielczarski, and J. Kiwi, "Molecular mechanism of surface recognition: Azo dyes degradation on Fe, Ti, and Al oxides through metal sulfonate complexes," *Langmuir*, vol. 15, pp. 7670–7679, 1999, doi: 10.1021/la9900270.
- [19] P. K. Pandey and S. K. Sharma, "Removal of Cr(VI) and Pb(II) from wastewater by zeolite NaX in fixed bed column," *Water Conserv. Sci. Eng.*, vol. 2, pp. 61–65, 2017, doi: 10.1007/s41101-017-0026-2.
- [20] K. Nisak, R. D. N. Setyowati, and D. Suprayogi, "Perbedaan laju alir dan volume adsorben kulit pisang kepok terhadap penurunan logam timbal dalam reaktor kontinyu," *J. Rekayasa Lingkung.*, vol. 10, no. 3, pp. 232–241, 2022, doi: 10.26760/rekalingkungan.v10i3.232-241.
- [21] Amrutha, G. Jeppu, C. R. Girish, B. Prabhu, and K. Mayer, "Multi-component adsorption isotherms: Review and modeling studies," *Environ. Process.*, vol. 10, Art. no. 38, 2023, doi: 10.1007/s40710-023-00631-0.
- [22] Susilowati, A. W. W. Romadoni, D. A. Ramadhan, and J. Jimmy, "The effectiveness of ferric chloride (FeCl_3) and zeolite in reducing copper heavy metal and dye contaminants in batik industry wastewater treatment," *Rev. Gest. Soc. Ambient.*, vol. 19, Art. no. e011240, 2025, doi: 10.24857/rgsa.v19n2-032.
- [23] W. Huang, Y. Zhang, and D. Li, "Adsorptive removal of phosphate from water using mesoporous materials: A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 193, pp. 470–482, 2017, doi: 10.1016/j.jenvman.2017.02.030.
- [24] K. Y. Hor *et al.*, "Evaluation of physicochemical methods in enhancing the adsorption performance of natural zeolite as low-cost adsorbent of methylene blue

- dye from wastewater," *J. Clean. Prod.*, vol. 118, pp. 197–209, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.01.056.
- [25] Y. Neolaka, E. Kalla, G. Supriyanto, Suyanto, and N. N. Puspaningsih, "Adsorption of hexavalent chromium from aqueous solutions using acid activated natural zeolite collected from Ende-Flores, Indonesia," *Rasayan J. Chem.*, vol. 10, no. 2, pp. 606–612, 2017, doi: 10.7324/RJC.2017.1021710.
- [26] F. Cakicioglu-Ozkan and M. Becer, "Effect of the acid type on the natural zeolite structure," *J. Turk. Chem. Soc., Sect. B: Chem. Eng.*, vol. 2, pp. 69–74, 2019.
- [27] D. D. Anggoro, N. Hidayati, L. Buchori, and Y. Mundriyastutik, "Effect of Co and Mo loading by impregnation and ion exchange methods on morphological properties of zeolite Y catalyst," *Bull. Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 11, pp. 75–83, 2016.
- [28] M. Saifuddin, J. Bae, and K. S. Kim, "Role of Fe, Na and Al in Fe-zeolite-A for adsorption and desorption of phosphate from aqueous solution," *Water Res.*, vol. 158, pp. 246–256, 2019, doi: 10.1016/j.watres.2019.03.045.
- [29] Arifin, A. Karlina, and A. Khair, "Pengaruh dosis kitosan terhadap kadar warna limbah cair home industry Sasirangan 'Oriens Handicraft' Landasan Ulin," *J. Health Sci. Prev.*, vol. 1, pp. 58–67, 2017.