

Sintesis Zeolit X dari Natrium Silikat dan Natrium Aluminat: Pengaruh pH dan Konsentrasi Natrium Aluminat Terhadap Kapasitas Tukar Kation

Syamsiar Hudawi Syukri, Elvara Rezkia Putri Ivanka, Dyah Suci Perwitasari*,
Sintha Soraya Santi, Caecilia Pujiastuti

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

*Koresponden email: saridyah05@gmail.com

Diterima: 1 Juli 2026

Disetujui: 6 Juli 2026

Abstract

This study evaluates the influence of pH and sodium aluminate concentration on the cation exchange capacity (CEC) and ion-exchange performance of aluminosilicate-based zeolites for the treatment of heavy metal wastewater from the electroplating industry. The zeolites were synthesized via a sol-gel method with pH values ranging from 8–12 and sodium aluminate concentrations of 1–3 M. Material characterization was conducted using Scanning Electron Microscopy (SEM) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), while ion-exchange performance was assessed using Ni^{2+} and Pb^{2+} ions as model contaminants. The results indicate that an increase in synthesis pH exhibits a direct correlation with CEC, with the maximum value achieved at pH 12. In contrast, variation in sodium aluminate concentration shows a nonlinear relationship with CEC, with an optimum at 1.5 M, yielding a CEC of 202.4144 meq/100 g. Morphological analysis confirms the formation of a characteristic zeolitic aluminosilicate framework with non-uniform particle aggregation. The zeolite synthesized under optimum conditions achieves removal efficiencies of 99.61% for Ni^{2+} and 99.00% for Pb^{2+} . These findings demonstrate that synthesis parameters govern the physicochemical properties and ion-exchange performance of zeolites in heavy metal removal applications.

Keywords: *Synthetic zeolite; cation exchange capacity; sodium aluminate; pH; ion exchange*

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh pH dan konsentrasi natrium aluminat terhadap kapasitas tukar kation (KTK) serta kinerja penukaran ion zeolit berbasis aluminosilikat untuk pengolahan limbah logam berat dari industri elektroplating. Zeolit disintesis melalui metode sol-gel dengan variasi pH 8–12 dan konsentrasi natrium aluminat 1–3 M. Karakterisasi material dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), sedangkan kinerja penukaran ion dianalisis terhadap ion Ni^{2+} dan Pb^{2+} . Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan pH sintesis berbanding lurus dengan nilai KTK, dengan nilai maksimum diperoleh pada pH 12. Variasi konsentrasi natrium aluminat menunjukkan hubungan nonlinier terhadap KTK, dengan kondisi optimum pada konsentrasi 1,5 M yang menghasilkan KTK sebesar 202,4144 meq/100 g. Analisis morfologi menunjukkan terbentuknya struktur aluminosilikat khas zeolit dengan agregasi partikel yang tidak seragam. Zeolit yang disintesis pada kondisi optimum menunjukkan efisiensi penurunan konsentrasi ion Ni^{2+} dan Pb^{2+} masing-masing sebesar 99,61% dan 99,00%. Hasil ini menunjukkan bahwa parameter sintesis berperan dalam menentukan karakteristik fisikokimia dan kinerja penukaran ion zeolit terhadap logam berat.

Kata Kunci: *zeolit sintesis; kapasitas tukar kation; natrium aluminat; pH; penukaran ion*

1. Pendahuluan

Zeolit alam kerap menunjukkan keterbatasan berupa kemurnian yang relatif rendah serta distribusi ukuran pori yang heterogen, sehingga kinerjanya dalam proses penukaran ion, khususnya terhadap ion logam berat, menjadi kurang optimal [1]. Kondisi ini mendorong pengembangan zeolit sintesis dengan struktur dan komposisi yang terkontrol. Zeolit tipe X merupakan salah satu material yang banyak dikaji karena tersusun atas kerangka aluminosilikat berbasis unit tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 dengan rasio Si/Al yang rendah [2]. Rasio Si/Al yang rendah berkorelasi dengan peningkatan jumlah situs pertukaran ion, sehingga berkontribusi terhadap KTK yang tinggi. Selain itu, konfigurasi kerangka zeolit X memberikan karakteristik yang relevan untuk aplikasi pemisahan dan penghilangan ion logam [3].

Sintesis zeolit umumnya memanfaatkan sumber silika dan alumina, yang masing-masing diperoleh dari natrium silikat dan natrium aluminat [4]. Metode hidrotermal merupakan pendekatan yang paling umum digunakan, dengan mekanisme kristalisasi yang berlangsung pada kondisi suhu dan tekanan terkontrol [3], [5]. Namun demikian, metode ini dikaitkan dengan kebutuhan energi yang tinggi, waktu sintesis yang panjang, serta keterbatasan dalam pengendalian morfologi akibat dinamika nukleasi dan pertumbuhan kristal yang tidak seragam. Sebagai alternatif, metode sol-gel menawarkan pendekatan berbasis pencampuran pada tingkat molekuler yang memberikan kendali terhadap ukuran partikel dan struktur pori. Proses ini berlangsung melalui transformasi larutan homogen menjadi jaringan gel tiga dimensi, dengan peran NaOH sebagai agen mineralizer dalam mengarahkan pembentukan kerangka aluminosilikat [6], [7].

Meskipun berbagai studi telah membahas sintesis zeolit melalui metode hidrotermal maupun sol-gel, kajian mengenai pengaruh parameter sintesis, khususnya pH dan konsentrasi natrium aluminat, terhadap sifat dan kualitas zeolit masih terbatas. Parameter tersebut berperan dalam menentukan mekanisme polimerisasi, laju nukleasi, serta distribusi situs aktif dalam struktur zeolit. Evaluasi kualitas zeolit mengacu pada KTK sebagai parameter utama, dengan standar minimal sebesar 1 meq/g sesuai SNI No. 13-3494-1994 [8]. Sebagai perbandingan, zeolit komersial seperti klinoptilolit dan mordenit memiliki KTK dalam rentang 0,7–1,37 meq/g [9], [10], sedangkan zeolit tipe X dilaporkan mencapai nilai hingga 5,96 meq/g [11]. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini difokuskan pada sintesis zeolit dari natrium silikat dan natrium aluminat melalui metode sol-gel dengan variasi pH dan konsentrasi natrium aluminat untuk mengidentifikasi kondisi sintesis yang menghasilkan KTK yang tinggi serta memenuhi standar mutu yang ditetapkan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa aluminium oksida (Al_2O_3), natrium silikat (Na_2SiO_3), natrium hidroksida (NaOH), asam klorida (HCl), aquadest, serta timbal (II) nitrat [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] sebagai prekursor larutan logam uji. Selain itu, limbah elektroplating dari industri “Sinar Permata” digunakan sebagai sampel aktual untuk evaluasi kinerja adsorpsi. Seluruh bahan yang digunakan memiliki tingkat kemurnian analitis dan digunakan tanpa perlakuan pemurnian lanjutan. Peralatan yang digunakan meliputi neraca analitik, beaker glass, erlenmeyer, gelas ukur, kaca arloji, batang pengaduk, pipet tetes, magnetic stirrer, botol PP, kertas pH, kertas saring, oven, alu dan mortar, dan corong kaca.

Sintesis zeolit dilakukan melalui metode sol-gel dengan memanfaatkan natrium silikat sebagai sumber silika dan natrium aluminat (NaAlO_2) sebagai sumber alumina. Larutan Na_2SiO_3 disiapkan dengan mengencerkan 15 mL natrium silikat menggunakan aquadest hingga volume total 50 mL, kemudian dihomogenkan. Larutan NaAlO_2 disiapkan melalui pelarutan Al_2O_3 dalam NaOH dengan variasi konsentrasi NaAlO_2 1; 1,5; 2; 2,5; dan 3 M dalam 50 mL aquadest, diikuti pemanasan pada suhu 50°C selama 1 jam dengan pengadukan konstan. Selanjutnya, larutan Na_2SiO_3 ditambahkan secara bertahap ke dalam larutan NaAlO_2 sambil diaduk pada kecepatan 300 rpm selama 2 jam hingga terbentuk campuran homogen. pH sistem kemudian diatur pada rentang 8; 9; 10; 11; 12 menggunakan larutan HCl 1 M. Campuran yang dihasilkan dipindahkan ke dalam botol PP dan mengalami proses pemanasan pada suhu 100°C selama 8 jam. Produk yang terbentuk disaring, kemudian dikeringkan pada suhu 110°C selama 6 jam.

Kinerja zeolit sintesis dalam proses pertukaran ion dievaluasi menggunakan larutan Pb dengan konsentrasi awal 420 ppm yang disiapkan dari pelarutan $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ dalam aquadest. Sebanyak 1 g zeolit ditambahkan ke dalam 500 mL larutan Pb, kemudian diaduk selama 40 menit pada kecepatan 300 rpm. Setelah proses kontak selesai, fase cair filtrasi dan dianalisis menggunakan spektrofotometer serapan atom (SSA) untuk menentukan konsentrasi akhir logam. Selanjutnya, nilai KTK dihitung menurut persamaan:

$$KTK = \frac{ppm \times n \times V}{Ar \text{ Pb} \times \text{bobot zeolit}} \times 100 = \frac{mg/L \times meq/mmol \times L}{mg/mmol \times gr} \times 100 = meq/100gr \text{ Zeolit} \quad [12]$$

Di mana:

ppm = Konsentrasi larutan (mg/L)

n = Jumlah mol ion hidrogen, mol elektron atau mol ekuivalen yang diberikan atau diikat oleh zat yang bereaksi (meq/mmol)

V = Volume larutan (L)

bobot = Massa zeolit dalam gram (gr)

Selain itu, pengujian juga dilakukan menggunakan limbah elektroplating dengan prosedur serupa untuk mengukur efisiensi penukaran ion, di mana 1,5 g zeolit ditambahkan ke dalam 250 mL limbah dan diaduk selama 40 menit. Konsentrasi logam sebelum dan sesudah perlakuan dianalisis menggunakan SSA.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh Kondisi Sintesis Zeolit Terhadap KTK

Tahap awal setelah proses sintesis zeolit adalah evaluasi kinerja material dalam proses pertukaran kation terhadap ion logam Pb. Pengujian dilakukan menggunakan larutan Pb dengan konsentrasi awal sebesar 420 ppm sebagai larutan model. Setelah mencapai kesetimbangan kontak antara zeolit dan larutan, konsentrasi residu Pb dalam fase cair dianalisis menggunakan SSA. Pengujian ini dirancang untuk mengkaji pengaruh variasi pH larutan selama proses pertukaran serta konsentrasi natrium aluminat pada tahap sintesis terhadap KTK zeolit yang dihasilkan. Nilai KTK dinyatakan sebagai parameter kuantitatif yang merepresentasikan jumlah kation yang dapat dipertukarkan oleh struktur zeolit per satuan massa material. Hasil pengukuran kapasitas tukar kation pada berbagai kondisi pH dan konsentrasi natrium aluminat disajikan pada **Tabel 1** sebagai dasar analisis hubungan antara kondisi sintesis dan performa pertukaran ion.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kapasitas Tukar Kation Zeolit

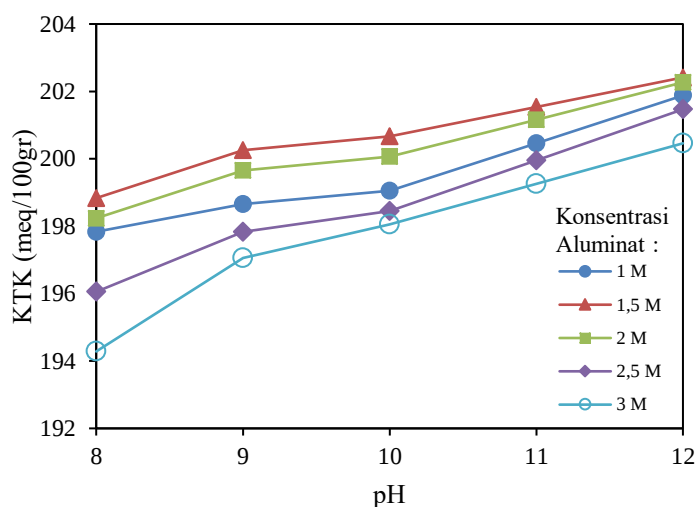
Konsentrasi Natrium Aluminat (M)	pH	Ion Pb Sisa (ppm)	Ion Pb Terserap (ppm)	KTK (meq/100gr)
1	8	10,4791	409.5209	197,8362
	9	8,7864	411.2136	198,6539
	10	7,9516	412.0484	199,0572
	11	5,0316	414.9684	200,4678
	12	2,1117	417.8883	201,8784
1,5	8	8,4141	411.5859	198,8338
	9	5,4719	414.5281	200,2551
	10	4,6294	415.3706	200,6621
	11	2,8158	417.1842	201,5383
	12	1,0022	418.9978	202,4144
2	8	9,6511	410.3489	198,2362
	9	6,7169	413.2831	199,6537
	10	5,8761	414.1239	200,0599
	11	3,5902	416.4098	201,1642
	12	1,3043	418.6957	202,2685
2,5	8	14,1669	405.8331	196,0546
	9	10,4854	409.5146	197,8331
	10	9,2002	410.7998	198,4540
	11	6,0809	413.9192	199,9609
	12	2,9615	417.0385	201,4679
3	8	17,8347	402.1653	194,2828
	9	12,0911	407.9089	197,0574
	10	10,0318	409.9682	198,0523
	11	7,5404	412.4597	199,2559
	12	5,0489	414.9511	200,4595

Sumber: Data Penelitian (2026)

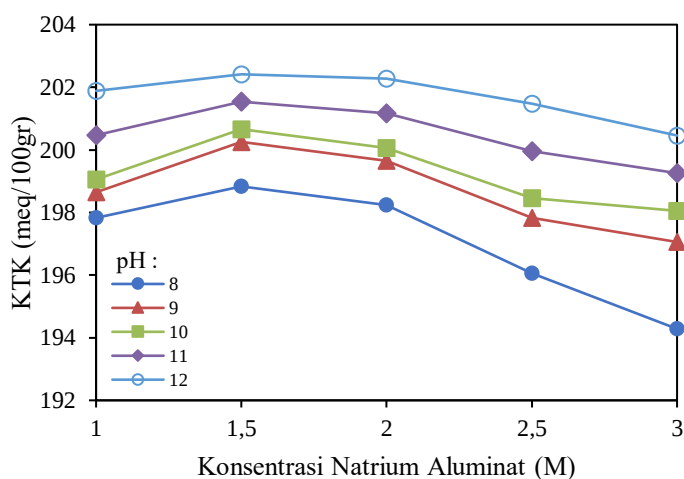
Berdasarkan **Gambar 1**, nilai KTK zeolit hasil sintesis menunjukkan hubungan yang jelas terhadap pH sistem. Pada seluruh rentang pH yang dikaji (8–12), KTK meningkat secara konsisten dengan kenaikan pH, dengan nilai maksimum sebesar 202,4144 meq/100 g pada pH 12 dan konsentrasi natrium aluminat 1,5 M, serta nilai minimum sebesar 194,2828 meq/100 g pada pH 8 dan konsentrasi 3 M. Peningkatan pH berkontribusi terhadap terjadinya deprotonasi gugus hidroksil permukaan, sehingga meningkatkan densitas muatan negatif pada kerangka aluminosilikat yang berperan sebagai situs pertukaran kation. Sebaliknya, pada kondisi pH rendah, keberadaan ion H^+ yang tinggi menyebabkan protonasi situs aktif dan menurunkan aksesibilitas kation terhadap situs pertukaran, sehingga KTK yang terukur menjadi lebih rendah [13].

Secara lebih spesifik, peningkatan KTK pada rentang pH 8 hingga 9 berlangsung signifikan akibat bertambahnya jumlah situs aktif terdeprotonasi dari gugus Si–OH dan Al–OH. Pada kondisi basa, peningkatan konsentrasi ion OH^- mendorong reaksi dengan proton terikat, sehingga menghasilkan pembentukan situs bermuatan negatif seperti Si–O $^-$ yang berperan dalam mekanisme pertukaran kation

[14]. Selain itu, keberadaan muatan negatif permanen akibat substitusi isomorfik Al^{3+} terhadap Si^{4+} dalam kerangka zeolit turut berkontribusi terhadap kapasitas pertukaran ion [15]. Namun, pada pH yang lebih tinggi (10–12), peningkatan KTK cenderung melambat karena kompetisi ion H^+ telah berkurang secara signifikan, sehingga perubahan jumlah situs aktif relatif tidak lagi dominan [16].



Gambar 1. Pengaruh pH Terhadap nilai KTK Zeolit
Sumber: Data Penelitian (2026)



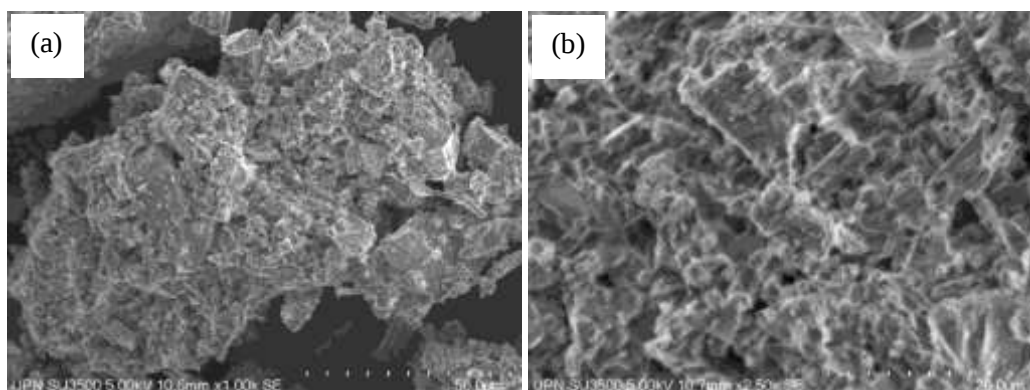
Gambar 2. Pengaruh Konsentrasi Natrium Aluminat Terhadap nilai KTK Zeolit
Sumber: Data Penelitian (2026)

Variasi konsentrasi natrium aluminat menunjukkan pengaruh non-linear terhadap KTK, yang ditunjukkan melalui pola kurva parabolik pada **Gambar 2**. Peningkatan konsentrasi dari 1 M hingga 1,5 M menghasilkan kenaikan KTK akibat meningkatnya ketersediaan spesies AlO_2^- yang berperan dalam pembentukan kerangka aluminosilikat melalui reaksi kondensasi dengan gugus silanol [17], [18]. Proses ini memperkuat terjadinya substitusi isomorfik Al dalam struktur tetrahedral, sehingga menghasilkan defisit muatan negatif yang lebih tinggi dan meningkatkan kapasitas pertukaran kation [19]. Kondisi optimum tercapai pada konsentrasi 1,5 M, yang menggambarkan keseimbangan antara ketersediaan prekursor dan pembentukan struktur kristalin yang efektif.

Pada konsentrasi natrium aluminat di atas 1,5 M, terjadi penurunan KTK yang berkaitan dengan perubahan fasa dan keterbatasan struktur pori. Rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang menurun pada konsentrasi tinggi mendorong pembentukan fasa sodalit yang memiliki struktur lebih kompak dengan ukuran pori terbatas, sehingga menghambat difusi kation ke dalam rongga internal [20], [21]. Selain itu, terbentuknya spesies *extra-framework aluminum* (EFAI) akibat kelebihan aluminat dalam medium alkali berkontribusi terhadap pembentukan fasa amorf yang dapat menutup sebagian saluran pori [22], [23]. Keberadaan fasa ini menurunkan aksesibilitas situs aktif, sehingga mengurangi efektivitas pertukaran kation dan berdampak pada penurunan nilai KTK yang terukur [24], [25], [26].

3.2. Analisis Karakteristik Zeolit dengan SEM

Analisa sampel menggunakan SEM dilakukan pada sampel zeolit hasil sintesis dengan variasi konsentrasi natrium aluminat 1,5 M dengan pH 12. Karakterisasi dengan menggunakan SEM bertujuan untuk mengetahui morfologi dari zeolit yang terbentuk. Pencitraan dengan menggunakan SEM pada zeolit dilakukan pembesaran 1000 $\times$ pada 50 μ m dan 2500 $\times$ pada 20 μ m dengan tegangan 5 kV.



Gambar 3. Hasil SEM zeolit sintesis dengan konsentrasi natrium aluminat 1,5M dengan pH 12 (a) perbesaran 1000 $\times$, (b) perbesaran 2500 $\times$; sumber: Data Penelitian (2026)

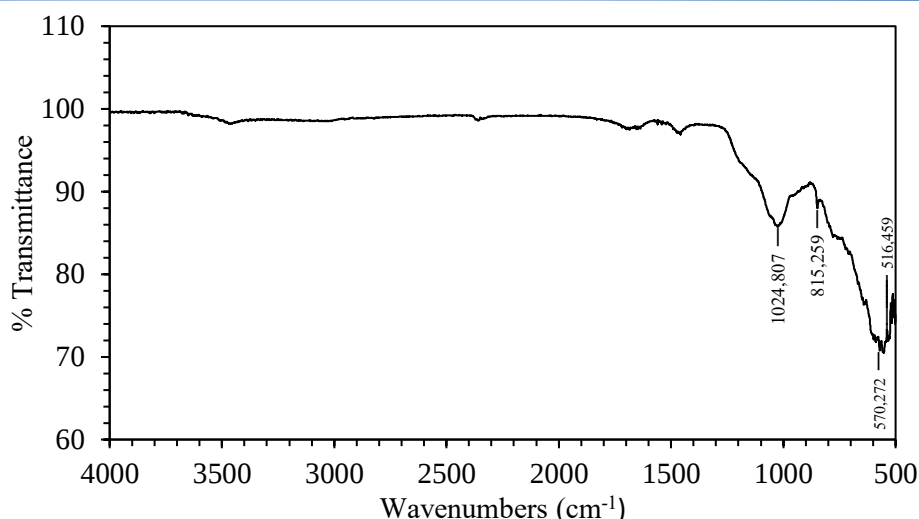
Morfologi zeolit hasil sintesis didominasi oleh agregat partikel dengan bentuk kristal yang tidak seragam dan cenderung mengalami aglomerasi (penggumpalan). Berdasarkan citra SEM pada berbagai tingkat perbesaran yang ditunjukkan pada **Gambar 3. a** dan **b**, permukaan zeolit memperlihatkan tekstur kasar disertai keberadaan pori, yang mengindikasikan perkembangan struktur internal selama proses sintesis. Karakteristik tersebut sejalan dengan temuan [27] yang melaporkan bahwa zeolit tersusun atas agregat dengan bentuk tidak beraturan serta distribusi ukuran partikel yang heterogen. Pada perbesaran 1000 $\times$, partikel zeolit tampak membentuk agregat yang menunjukkan bahwa pertumbuhan kristal berlangsung bersamaan dengan terjadinya aglomerasi. Fenomena ini merupakan karakter umum pada zeolit sintesis dan berkaitan dengan interaksi antarpartikel selama tahap nukleasi dan pertumbuhan kristal [28], [29]. Sementara itu, pada perbesaran 2500 $\times$, permukaan partikel tersusun atas unit-unit kristal berukuran lebih kecil yang terdistribusi secara tidak teratur, yang mengindikasikan terbentuknya struktur polikristalin [30].

Ketidakteraturan morfologi yang teramati berkorelasi dengan parameter sintesis, terutama konsentrasi natrium aluminat dan nilai pH sistem. Lingkungan dengan pH basa berperan dalam meningkatkan kinetika pembentukan kerangka aluminosilikat, tetapi pada saat yang sama mendorong terjadinya pertumbuhan kristal yang bersifat heterogen. Di sisi lain, penggunaan prekursor pada konsentrasi tinggi dapat meningkatkan laju nukleasi yang berdampak pada terbentuknya kristal berukuran lebih kecil dengan distribusi ukuran yang tidak seragam [31], [32], [33].

3.3. Analisis Gugus Fungsi Zeolit dengan FTIR

Karakterisasi gugus fungsi pada zeolit sintesis dilakukan menggunakan spektrofotometer FTIR untuk mengidentifikasi pola serapan pada rentang bilangan gelombang tertentu. Analisis ini menghasilkan spektrum inframerah yang merepresentasikan vibrasi ikatan kimia dalam struktur zeolit. Data yang diperoleh berasal dari sampel zeolit sintesis dengan konsentrasi natrium aluminat sebesar 1,5 M dan pH 12, yang diukur pada rentang bilangan gelombang 500–4000 cm^{-1} .

Pembentukan kerangka zeolit berbasis aluminosilikat teridentifikasi melalui karakteristik pita serapan pada spektra FTIR. Berdasarkan **Gambar 4**, kemunculan pita pada bilangan gelombang 1024,807 cm^{-1} yang berada dalam rentang 1200–300 cm^{-1} menunjukkan adanya struktur kerangka aluminosilikat. Rentang bilangan gelombang ini diakui sebagai indikator khas keberadaan jaringan aluminosilikat dalam material zeolit, sebagaimana dilaporkan oleh Jayana (2024). Pita serapan pada 1024,807 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi ulur ikatan Si-O-Si atau Si-O-Al, yang merepresentasikan keberadaan unit struktural penyusun kerangka zeolit [34]. Selain itu, temuan ini sejalan dengan laporan Byrappa & Suresh Kumar (2007) yang menyatakan bahwa daerah bilangan gelombang 1300–400 cm^{-1} merupakan wilayah serapan inframerah karakteristik zeolit, yang mencerminkan vibrasi fundamental kerangka tetrahedral ($\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$).



Gambar 4. Hasil Analisis FT-IR Zeolit Sintesis Variasi Konsentrasi Natrium Aluminat 1,5 M dengan pH 12
Sumber: Data Penelitian (2026)

Struktur aluminosilikat pada zeolit tersusun atas jaringan internal dan eksternal yang dapat diidentifikasi melalui karakteristik pita serapan inframerah. Jaringan internal zeolit ditunjukkan oleh pita serapan pada rentang bilangan gelombang 1250–950 cm^{-1} , 820–650 cm^{-1} , dan 540–440 cm^{-1} . Kemunculan pita serapan pada 516,459 cm^{-1} yang berada pada rentang 540–440 cm^{-1} merepresentasikan vibrasi tekuk Si–O/Al–O dalam kerangka aluminosilikat. Selanjutnya, pita serapan 815,259 cm^{-1} yang berada pada rentang 820–650 cm^{-1} berkaitan dengan vibrasi ulur simetri internal O–Si–O dan O–Al–O, panjang gelombang tersebut menunjukkan adanya Al tersubstitusi dalam bentuk tetrahedral dari kerangka silika. Sedangkan pita pada kisaran 1250–950 cm^{-1} mengindikasikan vibrasi ulur asimetri internal Si–O–Si dan Si–O–Al. Sementara itu, jaringan eksternal zeolit dicirikan oleh pita serapan pada rentang 650–500 cm^{-1} yang berkaitan dengan keberadaan struktur cincin ganda sebagai karakteristik khas kerangka zeolit [7], [36]. Spektra inframerah zeolit sintesis yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan keberadaan seluruh pita serapan yang menjadi indikator pembentukan struktur zeolit. Interpretasi lebih lanjut terhadap spektra tersebut disajikan pada **Tabel 2**, yang mengonfirmasi kesesuaian karakteristik spektral dengan struktur zeolit sintesis.

Tabel 2. Interpretasi Spektra Zeolit Sintesis

No.	Bil. Gelombang (cm^{-1}) Zeolit Sintesis [†]	Bil. Gelombang (cm^{-1}) Referensi*	Keterangan
1.	1024,807	1250 – 950	Vibrasi ulur asimetri internal Si-O-Si dan Si-O-Al
2.	815,259	820 – 650	Vibrasi ulur simetri internal O-Si-O dan O-Al-O
3.	570,272	650 – 500	Cincin ganda
4.	516,459	540 – 440	Vibrasi tekuk Si-O/Al-O

Sumber* : [7], [36]

Sumber[†] : Data Penelitian (2026)

3.4. Uji Efisiensi Penukaran Ion Zeolit Sintesis Terhadap Logam Berat Pada Limbah Elektroplating

Kemampuan zeolit dalam menukar ion logam berat pada limbah elektroplating dievaluasi melalui analisis menggunakan SSA. Metode SSA dipilih karena memiliki sensitivitas dan selektivitas tinggi dalam mendeteksi konsentrasi logam berat pada level jejak, sehingga sangat sesuai untuk mengevaluasi efektivitas zeolit dalam menukar ion-ion logam berat yang terkandung dalam limbah tersebut. Pengujian ini difokuskan pada zeolit dengan kondisi optimum, yaitu pada konsentrasi natrium aluminat 1,5 M dan pH 12, yang sebelumnya telah diidentifikasi sebagai variabel terbaik dalam meningkatkan KTK.

Berdasarkan **Tabel 3** hasil analisis awal menggunakan SSA, limbah elektroplating yang digunakan dalam penelitian ini mengandung logam berat utama berupa Ni^{2+} dan Pb^{2+} dengan konsentrasi awal masing-masing sebesar 339 ppm dan 83,82 ppm. Nilai tersebut mengindikasikan tingkat pencemaran yang signifikan, yang berkorelasi dengan potensi risiko toksisitas terhadap lingkungan perairan dan kesehatan

manusia. Komposisi ini sejalan dengan karakteristik umum limbah elektroplating yang umumnya mengandung berbagai logam berat akibat penggunaan larutan elektrolit selama proses pelapisan [37].

Tabel 3. Kemampuan penukaran ion zeolit sintesis terhadap logam berat pada limbah elektroplating

Logam	Konsentrasi (ppm)			Efisiensi Penyerapan (%)
	Awal	Akhir	Terserap	
Ni	339	1,3278	337,6722	99,61
Pb	83,82	0.8361	82,9839	99,00

Sumber: Data Penelitian (2026)

Hasil analisis menunjukkan bahwa zeolit sintetis pada kondisi optimum mampu menurunkan konsentrasi logam berat secara signifikan. Konsentrasi Ni^{2+} menurun dari 339 ppm menjadi 1,3278 ppm dengan jumlah ion terserap sebesar 337,6722 ppm, yang setara dengan efisiensi penyerapan sebesar 99,61%. Sementara itu, konsentrasi Pb^{2+} menurun dari 83,82 ppm menjadi 0,8361 ppm dengan jumlah ion terserap sebesar 82,9839 ppm, menghasilkan efisiensi sebesar 99,00%. Hasil ini menunjukkan bahwa zeolit memiliki kemampuan yang sangat tinggi dalam mengadsorpsi kedua jenis logam tersebut. Secara umum, kedua logam menunjukkan tingkat removal yang hampir sempurna (>99%), yang mengindikasikan bahwa pada kondisi optimum, zeolit mampu bekerja secara efektif bahkan dalam sistem limbah multikomponen.

Efisiensi penyerapan yang diperoleh dalam penelitian ini menunjukkan kinerja yang sangat kompetitif dibandingkan dengan studi sebelumnya. Penelitian lain melaporkan bahwa zeolit mampu mengadsorpsi logam berat seperti Pb^{2+} , Cu^{2+} , dan Cd^{2+} dengan efisiensi hingga sekitar 94–99% tergantung pada kondisi operasi dan massa adsorben [38]. Selain itu, studi terkait zeolit teraktivasi menunjukkan efisiensi rata-rata sekitar 99,15% dalam pengolahan limbah kimia [39]. Hasil dalam penelitian ini yang mencapai efisiensi hingga 99,61% menunjukkan bahwa zeolit sintetis yang digunakan memiliki performa yang sebanding dengan beberapa laporan sebelumnya.

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pH memiliki hubungan positif terhadap KTK dengan kondisi optimum pada pH 12. Sementara itu, pengaruh konsentrasi natrium aluminat terhadap KTK mengikuti tren nonlinier berbentuk kurva parabola, dengan nilai optimum pada konsentrasi 1,5 M yang kemudian menurun pada konsentrasi lebih tinggi hingga 3 M. Kondisi sintesis terbaik diperoleh pada kombinasi pH 12 dan konsentrasi natrium aluminat 1,5 M dengan nilai KTK sebesar 202,4144 meq/100 g. Zeolit yang dihasilkan melalui metode sol-gel dari natrium silikat dan natrium aluminat menunjukkan karakteristik spektrum inframerah pada rentang bilangan gelombang 1300–500 cm^{-1} yang konsisten dengan struktur khas zeolit, serta morfologi berupa agregasi partikel dengan distribusi ukuran kristal yang tidak seragam, di mana permukaan partikel tersusun atas unit kristal berukuran lebih kecil yang terdistribusi tidak teratur.

5. Referensi

- [1] F. N. Haliza, S. O. Sabrina, and S. N. L. Fitriyah, "Sintesis Zeolite Y dengan Menggunakan Metode Sol-Gel," *Jurnal MIPA dan Pembelajarannya*, vol. 3, no. 7, pp. 330–338, 2023.
- [2] I. El Bojaddayni *et al.*, "A review on synthesis of zeolites from natural clay resources and waste ash: Recent approaches and progress," *Miner. Eng.*, vol. 198, pp. 1–21, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108086.
- [3] V. K. Jha, M. Nagae, M. Matsuda, and M. Miyake, "Zeolite formation from coal fly ash and heavy metal ion removal characteristics of thus-obtained Zeolite X in multi-metal systems," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 8, pp. 2507–2514, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.jenvman.2009.01.009.
- [4] V. A. Patrikeev *et al.*, "Crystallization of X-type zeolite from concentrated sodium silicate and aluminate solutions," *Russian Journal of Applied Chemistry*, vol. 80, no. 3, pp. 498–500, Mar. 2007, doi: 10.1134/S1070427207030299.
- [5] G. Yao, J. Lei, X. Zhang, Z. Sun, and S. Zheng, "One-Step Hydrothermal Synthesis of Zeolite X Powder from Natural Low-Grade Diatomite," *Materials*, vol. 11, no. 6, May 2018, doi: 10.3390/ma11060906.
- [6] A. Khaleque *et al.*, "Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review," *Environmental Advances*, vol. 2, 2020, doi: 10.1016/j.envadv.2020.100019.
- [7] R. Jayana, I. Fadlilah, and O. Prasadi, "Karakteristik Sintesis Zeolit Dari Pemanfaatan Limbah Daun Nipah dan Alumunium Foil Bekas," *METANA*, vol. 20, no. 1, pp. 1–13, Jun. 2024, doi: 10.14710/metana.v20i1.56805.

- [8] M. Al-Jabri, "Penggunaan Mineral Zeolit Sebagai Pembenh Tanah Pertanian Dalam Hubungan Dengan Standardisasinya Dan Peningkatan Produksi Tanaman Pangan," *Jurnal Zeolit Indonesia*, vol. 9, no. 1, pp. 1–12, 2010.
- [9] W. Budianta, I. W. Warmada, and M. Nurudin, "Pengaruh Karakteristik Mineralogi Terhadap Kapasitas Tukar Kation Zeolit Alam Pacitan, Jawa Timur," *Kurvatek*, vol. 8, no. 1, pp. 93–98, Apr. 2023, doi: 10.33579/krvrtk.v8i1.4004.
- [10] N.- Nuryoto, H. Sulisty, W. Budi Sediawan, and I. Perdana, "Modifikasizeolit Alam Mordenit Sebagai Katalisator Ketalisasi Dan Esterifikasi," *Reaktor*, vol. 16, no. 2, pp. 72–80, 2016, doi: 10.14710/reaktor.16.2.72-80.
- [11] M. A. S. D. Barros, A. S. Zola, P. A. Arroyo, E. F. Sousa-Aguiar, and C. R. G. Tavares, "Binary Ion Exchange Of Metal Ions In Y And X Zeolites," *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 413–421, 2003.
- [12] N. Herawati, Alimin, and A. Z. Effendi, "Penurunan Ion Ca 2+ pada Air dari Sumber Mata Air Citta Kabupaten Soppeng dengan Menggunakan Zeolit Alam Toraja (Zeolit Mordenit).," *Jurnal Sainsmat*, vol. 4, no. 2, pp. 148–158, 2015.
- [13] N. Anggraini, T. E. Agustina, and F. Hadiah, "Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan Cd," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 20, no. 2, pp. 345–355, Apr. 2022, doi: 10.14710/jil.20.2.345-355.
- [14] M. A. Hamoud, S. F. Abo-Zahra, M. A. Attia, H. H. Someda, and M. R. Mahmoud, "Efficient adsorption of cesium cations and chromate anions by one-step process using surfactant-modified zeolite," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 18, pp. 53140–53156, Feb. 2023, doi: 10.1007/s11356-023-25644-y.
- [15] S. Mudaber and J. Batur, "Differences in Heavy Metals Adsorption on Natural, Modified, and Synthetic Zeolites-A Review," *JOTCSA*, vol. 10, no. 3, pp. 847–860, 2023.
- [16] M. Terzi and O. Özdemir, "Effects of Hydrochloric and Acetic Acid Modification on the HTAB and K⁺ Adsorption Characteristics of Natural Zeolites," *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, vol. 23, no. 69, pp. 1049–1056, 2021, doi: 10.21205/deufmd.2021236930.
- [17] N. Kordala and M. Wyszowski, "Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications," *Molecules*, vol. 29, no. 5, pp. 1–25, Feb. 2024, doi: 10.3390/molecules29051069.
- [18] F. Morante-Carballo, N. Montalván-Burbano, P. Carrión-Mero, and N. Espinoza-Santos, "Cation Exchange of Natural Zeolites: Worldwide Research," *Sustainability*, vol. 13, no. 14, pp. 1–26, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13147751.
- [19] C. Niamnuy, S. Sungsinchai, P. Jarernsamrit, S. Devahastin, and M. Chareonpanich, "Synthesis and characterization of aluminosilicate and zinc silicate from sugarcane bagasse fly ash for adsorption of aflatoxin B1," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–19, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-65158-2.
- [20] N. Pangan, S. Gallardo, P. Gaspillo, W. Kurniawan, H. Hinode, and M. Promentilla, "Hydrothermal Synthesis and Characterization of Zeolite A from Corn (Zea Mays) Stover Ash," *Materials*, vol. 14, no. 17, pp. 1–19, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14174915.
- [21] L. Cui, R. Han, L. Yang, Y. Wu, R. Pei, and F. Li, "Synthesis and characterization of mesoporous sodalite and investigation of the effects of inorganic salts on its structure and properties," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 306, pp. 1–30, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.micromeso.2020.110385.
- [22] E. V. Khramenkova, H. Venkatraman, V. Soethout, and E. A. Pidko, "Global optimization of extra framework ensembles in zeolites: structural analysis of extra framework aluminum species in MOR and MFI zeolites," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 44, pp. 27047–27054, 2022, doi: 10.1039/D2CP03603G.
- [23] J. L. Mancuso and V. Van Speybroeck, "The nature of extra framework aluminum species and Brønsted acid site interactions under catalytic operating conditions," *J. Catal.*, vol. 429, pp. 1–10, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.jcat.2023.115211.
- [24] E. Dib *et al.*, "Access to sodalite cages in ion-exchanged nanosized FAU zeolites probed by hyperpolarized ¹²⁹Xe NMR and DFT calculations," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 338, pp. 1–18, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.micromeso.2022.111965.
- [25] D. I. Lashchenko *et al.*, "Effect of the alumina binder content on the mechanical strength and the Si/Al ratio in the zeolite framework in the shaped γ -Al₂O₃-ZSM-5 composites," *Mater. Today Chem.*, vol. 46, p. 102735, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.mtchem.2025.102735.

- [26] N. Nikolopoulos, A. Wickramasinghe, G. T. Whiting, and B. M. Weckhuysen, "Alumina binder effects on the hydrothermal stability of shaped zeolite-based catalyst bodies," *Catal. Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 862–873, 2023, doi: 10.1039/D2CY01894B.
- [27] M. Rilyanti, E. Gita Silviana, B. Buhani, K. D. Pandiangan, and N. Luh Gede Ratna Juliasih, "Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Mordenit (Mor) Pori Hirarki Berbasis Silika Abu Ampas Tebu," *Analit: Analytical And Environmental Chemistry*, vol. 5, no. 02, pp. 178–191, Oct. 2020, doi: 10.23960/aec.v5.i2.2020.p178-191.
- [28] Z. Asgar Pour, Y. A. Alassmy, and K. O. Sebakhy, "A Survey on Zeolite Synthesis and the Crystallization Process: Mechanism of Nucleation and Growth Steps," *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 6, pp. 1–13, Jun. 2023, doi: 10.3390/cryst13060959.
- [29] Martínez, L. Marcela T., et al. "Synthesis and identification methods for zeolites and MOFs." *Zeolites and metal-organic frameworks*. Routledge, 2025. 25-52.
- [30] Lutz, Wolfgang. "Zeolite Y: Synthesis, modification, and properties - A case revisited." *Advances in Materials Science and Engineering* 2014.1 (2014): 724248.
- [31] D. P. Serrano and R. van Grieken, "Heterogenous events in the crystallization of zeolites," *J. Mater. Chem.*, vol. 11, no. 10, pp. 2391–2407, 2001, doi: 10.1039/b100818h.
- [32] R. F. Febrianti, T. A. Zahara, and A. Adhitiyawarman, "Sintesis Zeolit A Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Limbah PT. Indonesia Chemical Alumina (ICA) Menggunakan Metode Alkali Hidrotermal," *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, vol. 5, no. 1, pp. 28–39, Apr. 2022, doi: 10.26418/indonesian.v5i1.53072.
- [33] Z. Asgar Pour, Y. A. Alassmy, and K. O. Sebakhy, "A Survey on Zeolite Synthesis and the Crystallization Process: Mechanism of Nucleation and Growth Steps," *Crystals (Basel)*, vol. 13, no. 6, pp. 1–13, Jun. 2023, doi: 10.3390/cryst13060959.
- [34] A. S. Putra, R. A. Purba, I. S. Jahro, and L. Simatupang, "Synthesis of Zeolite from Fly Ash and Aluminum Can Waste as a Nickel (Ni) Adsorbent," *Journal of Chemical Science and Technology*, vol. 09, no. 1, pp. 116–121, 2026, [Online]. Available: <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/aromatika>
- [35] Byrappa, K., and BV Suresh Kumar. "Characterization of zeolites by infrared spectroscopy." *Asian journal of chemistry* 19.6 (2007): 4933.
- [36] M. K. Tsani, Q. I. Janah, Z. Fitri, A. A. Arifin, A. Agustina, and B. B. Rahayu, "Sintesis Zeolit Berbasis Silika dari Limbah Biomassa Sabut Kelapa (Cocos nucifera L.)," *Jurnal Ilmu Kimia Dan Pembelajaran*, vol. 7, no. 2, pp. 227–236, 2024.
- [37] J. Ayach et al., "Comparing Conventional and Advanced Approaches for Heavy Metal Removal in Wastewater Treatment: An In-Depth Review Emphasizing Filter-Based Strategies," *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 14, pp. 1–25, Jul. 2024, doi: 10.3390/polym16141959.
- [38] N. Elboughdiri, "The use of natural zeolite to remove heavy metals Cu (II), Pb (II) and Cd (II), from industrial wastewater," *Cogent Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–13, Jan. 2020, doi: 10.1080/23311916.2020.1782623.
- [39] S. Suyanta, S. Sunarto, S. Kristianungrum, and L. E. Pambayun, "The effect of zeolite activation and time variation of batch method on the adsorption effectiveness of iron metal ions," *Jurnal Penelitian Saintek*, vol. 31, no. 1, Apr. 2026, doi: 10.21831/jps.v30i1.91097.