



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pencemaran lingkungan akibat limbah cair yang mengandung logam berat masih menjadi permasalahan serius dalam bidang lingkungan dan industri. Industri elektroplating merupakan salah satu sumber pencemar tersebut karena menghasilkan limbah yang mengandung ion logam berat seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} , dan Cu^{2+} (Boguniewicz-Zabłocka et al., 2026; Z. Li & Du, 2025). Senyawa logam tersebut bersifat toksik dan memiliki kestabilan kimia tinggi, sehingga tidak mengalami degradasi secara alami dalam sistem perairan. Logam berat seperti Pb^{2+} memiliki karakteristik non-biodegradable dan menunjukkan kecenderungan untuk terakumulasi dalam jaringan organisme. Kondisi ini meningkatkan risiko gangguan fisiologis pada organisme akuatik maupun manusia melalui rantai makanan (Hama Aziz et al., 2023; Qasem et al., 2021; Yuna, 2016a). Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa keberadaan logam berat dalam sistem perairan industri berkorelasi dengan peningkatan potensi toksisitas lingkungan yang bersifat persisten dan sulit dihilangkan secara alami (Z. Li & Du, 2025). Oleh karena itu, diperlukan teknologi pengolahan limbah yang efektif, stabil, dan ekonomis, salah satunya melalui penggunaan material penukar ion seperti zeolit.

Zeolit merupakan material aluminosilikat berpori dengan struktur kerangka tiga dimensi yang tersusun atas tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 yang saling terhubung, sehingga menghasilkan muatan negatif permanen pada kerangka akibat substitusi isomorfik Si^{4+} oleh Al^{3+} (Dyer, 2007; J. Li et al., 2023). Muatan negatif ini diseimbangkan oleh kation alkali seperti Na^+ yang bersifat mudah dipertukarkan, sehingga zeolit memiliki karakteristik utama berupa kapasitas tukar kation (KTK) yang tinggi dan afinitas terhadap ion logam berat (Kordala & Wyszowski, 2024). Mekanisme utama pada zeolit melibatkan pertukaran ion dan interaksi elektrostatis antara permukaan bermuatan negatif dengan kation logam dalam larutan, yang menjadikannya material potensial untuk remediasi limbah cair industri berbasis logam berat (Dyer, 2007). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa zeolit X sintesis



mampu mengadsorpsi berbagai ion logam melalui mekanisme dominan pertukaran ion pada situs Na^+ dalam kerangka zeolit (Nakano et al., 2020).

Kinerja zeolit X sangat dipengaruhi oleh kondisi sintesis, khususnya rasio Si/Al, derajat kristalinitas, serta kondisi operasional seperti pH dan komposisi prekursor (Masoudian et al., 2013). Parameter pH berperan dalam mengendalikan spesiasi ion dalam larutan serta derajat deprotonasi gugus permukaan, yang pada akhirnya menentukan intensitas interaksi elektrostatis antara kation logam dan situs aktif zeolit. Pada kondisi pH tertentu, peningkatan pH dapat meningkatkan densitas muatan negatif permukaan dan memperkuat mekanisme pertukaran ion (Senila & Cadar, 2024). Selain itu, konsentrasi natrium aluminat sebagai sumber Al dalam sintesis sol-gel menentukan tingkat substitusi Al pada kerangka zeolit, yang secara langsung mengontrol jumlah muatan negatif permanen dan densitas situs pertukaran kation (Niamnuy et al., 2024).

Kajian terdahulu banyak berfokus pada optimasi kondisi hidrotermal, rasio Si/Al secara umum, serta aplikasi zeolit X dalam penghilangan berbagai ion logam, sementara studi yang secara sistematis mengisolasi pengaruh pH sintesis dan konsentrasi natrium aluminat terhadap kapasitas tukar kation masih terbatas (J. Li et al., 2023; Munthali et al., 2014; Yao et al., 2018). Sebagian penelitian juga cenderung menggunakan bahan baku silika dan alumina dari sumber alam atau limbah industri, yang berpotensi memperkenalkan variabilitas komposisi sehingga menyulitkan interpretasi hubungan kausal antara parameter sintesis dan sifat akhir material (Arnelli et al., 2018; Febrianti et al., 2022; Tsani et al., 2024). Dengan demikian, diperlukan pendekatan yang mampu meminimalkan variabel eksternal agar hubungan fundamental antara kondisi sintesis dan performa pertukaran ion dapat dianalisis secara lebih terkontrol.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menggunakan natrium silikat dan natrium aluminat dengan kemurnian tinggi sebagai bahan baku sintesis zeolit X melalui metode sol-gel. Penggunaan bahan murni bertujuan untuk menghilangkan pengaruh impuritas serta heterogenitas komposisi prekursor, sehingga perubahan sifat material dapat dikaitkan secara langsung dengan variabel proses, khususnya pH dan konsentrasi natrium aluminat. Pendekatan ini diarahkan



untuk membentuk sistem sintesis yang terkontrol, sehingga pengaruh masing-masing variabel terhadap pembentukan kerangka aluminosilikat dan perkembangan kapasitas tukar kation dapat dievaluasi secara sistematis. Evaluasi terhadap kinerja zeolit yang dihasilkan mengacu pada standar mutu SNI No. 13-3494-1994 yang mensyaratkan nilai kapasitas tukar kation (KTK) minimal sebesar 1 meq/g (Al-Jabri, 2010). Sementara itu, zeolit komersial seperti klinoptilolit dan mordenit umumnya memiliki nilai KTK berkisar antara 0,7 hingga 1,37 meq/g (Budianta et al., 2023; Nuryoto et al., 2016). Zeolit tipe X dilaporkan mampu mencapai kapasitas tukar kation (KTK) hingga 5,96 meq/g (Barros et al., 2003). Hal ini mengindikasikan kapasitasnya yang tinggi dalam proses pertukaran ion. Dengan demikian, penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh pH dan konsentrasi natrium aluminat terhadap kapasitas tukar kation zeolit X yang disintesis melalui metode sol-gel, sebagai upaya untuk memperoleh pemahaman kuantitatif mengenai hubungan antara kondisi sintesis dan performa ion exchange material tersebut.

I.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pH sintesis dan konsentrasi natrium aluminat terhadap nilai kapasitas tukar kation (KTK) zeolit X yang dihasilkan dari natrium silikat dan natrium aluminat serta mengetahui kesesuaian karakteristik zeolit X yang dihasilkan terhadap standar SNI 13-3494-1994 melalui analisis SSA, SEM, dan FTIR.

I.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memperluas pemahaman ilmiah mengenai pengaruh parameter sintesis, khususnya pH dan konsentrasi natrium aluminat, terhadap pembentukan struktur serta kinerja zeolit yang dinyatakan melalui kapasitas tukar kation (KTK). Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi landasan awal dalam pengembangan zeolit sintesis yang lebih efektif untuk aplikasi pengolahan limbah cair, khususnya dalam penghilangan ion logam berat, dengan pendekatan berbasis kontrol parameter proses.