

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Kementerian Perindustrian Indonesia (2024) melaporkan bahwa sektor industri logam menempati peringkat pertama dalam realisasi investasi nasional. Perkembangan dunia perindustrian ini memberikan kontribusi positif terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia sebesar 5,11% dibandingkan tahun 2023 (Badan Pusat Statistik, 2024). Namun, selain dampak ekonomi yang positif, perkembangan industri juga berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan. Industri logam menghasilkan limbah yang berpotensi mencemari tanah dan perairan (Jadaa and Mohammed, 2023).

Data dari Badan Pusat Statistik (2024), menunjukkan bahwa indeks kualitas air sungai di Indonesia pada tahun 2015–2017 berada dalam kategori cukup baik, meningkat menjadi baik pada tahun 2018, tetapi menurun menjadi kurang baik pada tahun 2019. Hasil pemantauan Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan mengungkapkan bahwa kualitas air Sungai Jeneberang, Sulawesi Selatan, mengalami pencemaran dengan status sedang hingga berat sepanjang 2013–2020. Salah satu penyebab utama pencemaran ini adalah limbah industri yang mengandung logam berat (Prayoga et al., 2022; Yusufdillah et al., 2023).

Konsentrasi logam berat di perairan meningkat seiring dengan aktivitas industri dan antropogenik. Logam berat bersifat *non-degradable* sehingga dapat terakumulasi dalam lingkungan dan berpotensi membahayakan kesehatan manusia (Mitra et al., 2022; Nedjimi, 2021). Beberapa logam berat yang dominan dalam limbah cair industri logam adalah timbal (Pb) dan besi (Fe), yang umumnya ditemukan dalam bentuk ion Pb(II) dan Fe(III) (Das and Nandi, 2019; Matei et al., 2022).

Yusufdillah et al. (2023) melaporkan bahwa konsentrasi ion Pb(II) di Pantai Timur Sumatera mencapai 0,57 mg/L, sementara Fadlillah et al. (2023) menemukan kadar ion Pb(II) di sungai Winongo Yogyakarta adalah 0,155 mg/L. Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021, ambang batas ion Pb(II) dalam air sungai dan danau ditetapkan sebesar 0,03 mg/L, sehingga kadar yang dilaporkan telah melebihi batas yang ditetapkan. Ion Pb(II) merupakan polutan lingkungan yang bersifat toksik, bahkan dalam konsentrasi rendah (Shukla et al., 2018). Ion ini terutama memengaruhi sistem saraf dan ginjal, serta dapat



uan intelektual pada anak (Hou et al., 2013). Pada orang
jka panjang dikaitkan dengan peningkatan risiko hipertensi,
kular, dan kerusakan ginjal. Pada ibu hamil, paparan ion
nggi dapat menyebabkan keguguran, kelahiran prematur,
rendah (World Health Organization, 2023).

p(II), ion Fe(III) juga ditemukan di Sungai Winongo,
illah et al. (2023) melaporkan bahwa kadar ion Fe(III) di

perairan tersebut berkisar antara 0,54-1,44 mg/L, sedangkan Salami et al. (2025) melaporkan kandungan ion Fe(III) di area industri sungai Citarum sebesar 1,055 mg/L. Nilai ini jauh melebihi ambang batas 0,3 mg/L yang ditetapkan Peraturan Pemerintah No. 22 Tahun 2021. Ion Fe(III) merupakan mineral esensial yang berperan dalam berbagai proses biologis, termasuk fungsi enzim, transportasi oksigen, sistem imun, dan metabolisme energi (Piskin et al., 2022). Namun, akumulasi ion Fe(III) dalam tubuh dapat menimbulkan efek toksik, seperti iritasi kulit dan mata, kerusakan dinding usus, serta gangguan pernapasan. Paparan jangka panjang juga dikaitkan dengan risiko kanker (Ali et al., 2023). Akibat bahaya yang ditimbulkan oleh akumulasi ion Pb(II) dan Fe(III) dalam lingkungan perairan, pengolahan limbah cair industri yang mengandung ion logam berat perlu dilakukan untuk mencegah dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengolah dan memisahkan ion Pb(II) dan Fe(III) dari limbah cair. Adsorpsi merupakan teknik yang banyak digunakan dan dinilai efektif untuk menghilangkan ion logam tersebut dari lingkungan perairan (Thakur et al., 2022). Proses adsorpsi relatif sederhana, adsorbennya dapat didaur ulang, dan biaya operasional yang diperlukan lebih rendah dibandingkan metode lainnya (Nakamura et al., 2017; Yang et al., 2019). Efektivitas adsorpsi sangat dipengaruhi oleh jenis adsorben yang digunakan. Adsorben dengan luas permukaan yang besar dan kapasitas adsorpsi tinggi lebih disukai dalam pengolahan limbah (Xiao et al., 2020). Salah satu jenis adsorben yang banyak diteliti sebagai alternatif pengolahan limbah yang mengandung ion logam berat adalah zeolit (Velarde et al., 2023).

Zeolit merupakan aluminosilikat terhidrasi yang dapat diperoleh secara alami maupun disintesis di dalam laboratorium. Zeolit alam umumnya memiliki rasio Si/Al yang tinggi, namun mengandung sejumlah pengotor berupa oksida logam. Hal tersebut dapat mengurangi luas permukaan dan menurunkan kapasitas adsorpsi zeolit alam (Ngapa et al., 2018). Beberapa penelitian telah mengevaluasi penggunaan zeolit alam sebagai adsorben ion logam berat. Bakalár et al. (2020) melaporkan bahwa zeolit kliptolinotit memiliki kapasitas adsorpsi ion Fe(III) masing-masing sebesar 10,19 mg/g. Rakhym et al. (2020) menggunakan zeolit alam dari Kazakhstan untuk mengadsorpsi ion Pb(II) dengan kapasitas 14 mg/g. Fadiah et al. (2023) menggunakan zeolit alam Sukabumi sebagai adsorben ion Fe(III) dengan kapasitas adsorpsi 3,24 mg/g. Berdasarkan hasil tersebut, kapasitas adsorpsi zeolit alam relatif rendah, sehingga diperlukan upaya untuk menghasilkan jenis zeolit dengan efektivitas yang lebih tinggi. Salah satu pendekatan yang dapat dilakukan adalah sintesis



memiliki kemurnian tinggi serta keseragaman ukuran dibandingkan zeolit alam. Namun, biaya produksinya lebih mahal (Ali et al., 2023; Wang et al., 2013). Oleh karena itu, banyak penelitian yang berfokus pada sintesis zeolit dari bahan baku yang lebih ekonomis. Beberapa jenis zeolit telah berhasil disintesis dari mineral

alam dan diaplikasikan sebagai adsorben ion logam berat. Zeolit NaP1 yang disintesis dari abu layang mampu mengadsorpsi ion Pb(II) dengan kapasitas 192 mg/g (Ankrah et al., 2022). Zeolit CAN yang diperoleh dari kalsit kaolin memiliki efektivitas adsorpsi ion Pb(II) sebesar 99% (Esaifan et al., 2019), sementara zeolit Faujasit dari tanah liat menunjukkan efisiensi adsorpsi ion Pb(II) sebesar 98% (Joseph et al., 2021).

Mineral atau bahan alam yang baik digunakan untuk sintesis zeolit adalah yang kaya terhadap kandungan silika dan alumina (Akmaluddin et al., 2024). Sumber mineral ini umumnya ditemukan di daerah bekas aktivitas vulkanik yang mengandung endapan abu vulkanik (Król, 2020). Salah satu wilayah di Indonesia dengan potensi tersebut adalah Kabupaten Toraja Utara, Sulawesi Selatan (Kartawa and Kusumah, 2006). Desa Sangkaropi, yang dahulu merupakan gunung api bawah laut, memiliki batuan yang telah mengalami proses alterasi, menghasilkan mineral dengan komposisi beragam serta nilai ekonomis tinggi. Beberapa di antaranya kaya akan silika dan alumina, yang berpotensi digunakan sebagai bahan baku dalam sintesis zeolit. Kartawa & Kusumah (2006) melaporkan bahwa mineral alam dari wilayah Sangkaropi-Mendilla, Toraja Utara, memiliki komposisi utama berupa SiO_2 (62,69%–81,03%), dan Al_2O_3 (9,90%–19,82%). Selain itu, Antaria (2017) melaporkan bahwa kandungan kuarsa (SiO_2) dalam mineral Sangkaropi mencapai 91,7%.

Berdasarkan potensi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara menggunakan metode hidrotermal. Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu sintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara (Bab II) dan aplikasinya sebagai adsorben ion logam Pb(II) dan Fe(III) (Bab III). Oleh karena itu, pembahasan teori yang mendukung penelitian ini akan disajikan pada bagian berikutnya.

1.1.1 Sintesis Zeolit

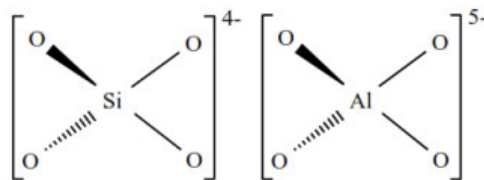
Zeolit tersusun dari kerangka aluminosilikat yang merupakan tetrahedral silikon dan aluminium yang dikelilingi oleh anion oksigen (Derbe et al., 2021). Susunan tetrahedral dan kerangka zeolit ditunjukkan pada **Gambar 1.1** dan **1.2**. Zeolit memiliki kisi kristal yang sangat stabil, molekul di pori-porinya tidak terikat kuat dan dapat dihilangkan tanpa merusak kerangka zeolit (Jha and Singh, 2012).

Berdasarkan cara pembentukannya, zeolit dibedakan menjadi zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit alam terbentuk secara alami melalui proses zeolitisasi, yaitu transformasi kimia dan fisika kompleks pada batuan vulkanik, sedimen, atau metamorf akibat interaksi dengan larutan hidrotermal, pelapukan, serta tekanan. Zeolit alam umumnya berasal dari endapan abu mengalami perubahan mineralogi. Beberapa jenis zeolit alam antara lain kabasit, klinoptilolit, dan mordenit

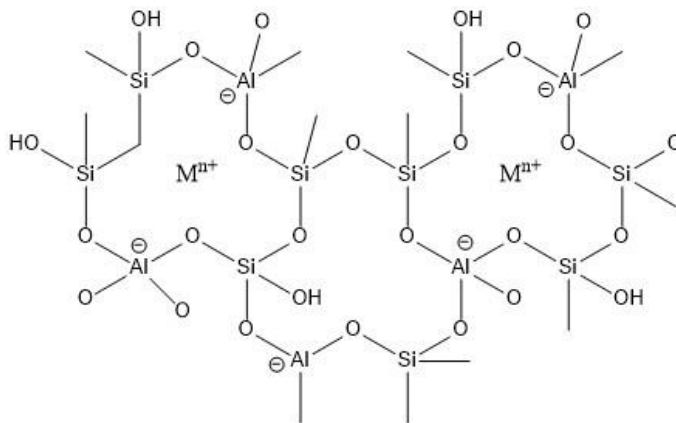


alah digunakan secara luas berkat potensinya dalam menukar ion seperti dalam pengolahan limbah. Zeolit alam

memiliki afinitas tinggi terhadap ion logam berat dan kation amonium, sehingga banyak digunakan untuk mengadsorpsi kontaminan dari limbah cair domestik maupun industri. Beberapa studi juga menunjukkan bahwa zeolit alam dapat dimanfaatkan dalam pengolahan limbah radioaktif, terutama dalam adsorpsi ion seperti cesium (Cs^+) dan strontium (Sr^{2+}). Meskipun demikian, penggunaan zeolit alam memiliki sejumlah keterbatasan. Komposisi kimianya yang bervariasi bergantung pada lokasi penambangan menyebabkan kualitasnya kurang konsisten. Selain itu, keberadaan mineral pengotor seperti oksida logam dapat menurunkan kemurnian serta efektivitas zeolit dalam aplikasi tertentu. Zeolit alam juga memiliki kapasitas tukar kation dan luas permukaan yang relatif rendah serta selektivitas yang kurang baik terhadap jenis ion tertentu. Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dilakukan upaya pengembangan zeolit di laboratorium yang dikenal dengan zeolit sintesis (Król, 2020).



Gambar 1.1 Susunan tetrahedral molekul SiO_4 dan AlO_4 membentuk satuan blok zeolite (Armbruster and Gunter, 2001).



Gambar 1.2 Gambaran kerangka zeolit secara dua dimensi, dimana M^{n+} menandakan kation kerangka ekstra (Valdés et al., 2006).



merupakan material hasil rekayasa yang diperoleh melalui memenuhi kebutuhan spesifik dalam berbagai aplikasi. Sifat sintesis bergantung pada rasio Si/Al dalam strukturnya. Sifat karakteristik zeolit sintesis adalah ukuran pori, muatan, dan sifat hidrofilik/hidrofobik. Beberapa jenis zeolit yang digunakan meliputi zeolit A atau Linde Type A (LTA), analisim A), *Zeolite Socony Mobile-5* (ZSM-5) dengan kerangka

Mordenite Framework Inverted (MFI), Faujasit X dan Y (FAU), serta Na-P dengan kerangka *Gismondine* (GIS). Zeolit tersebut dapat disintesis dari berbagai bahan baku (Nazir et al., 2020). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa zeolit sintesis memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi terhadap ion logam berat dibandingkan dengan zeolit alam (Król, 2020).

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk sintesis zeolit adalah metode hidrotermal. Metode ini melibatkan reaksi dalam media air pada suhu di atas titik didihnya dalam sistem tertutup, yang berfungsi untuk mencegah kehilangan pelarut selama pemanasan. Secara alami, kondisi hidrotermal juga berperan dalam pembentukan berbagai mineral (Namratha et al., 2022). Metode hidrotermal memiliki beberapa keunggulan, yaitu: (1) memungkinkan reaksi berlangsung pada suhu yang relatif rendah, (2) dapat menstabilkan senyawa dalam keadaan oksidasi yang tidak stabil melalui peningkatan suhu dan tekanan, serta (3) menghasilkan partikel dengan kristalinitas tinggi (Khaleque et al., 2020; Shin and Kim, 2024). Tahap awal sintesis zeolit berbasis mineral alam sering kali melibatkan aktivasi bahan baku untuk meningkatkan kemurnian silika dan alumina. Namun, proses ini membutuhkan biaya tinggi dan waktu yang relatif lama. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, sintesis zeolit dilakukan secara langsung dari mineral alam tanpa tahap aktivasi dan tanpa penambahan silika-alumina komersial.

1.1.2 Aplikasi zeolit sebagai adsorben ion logam

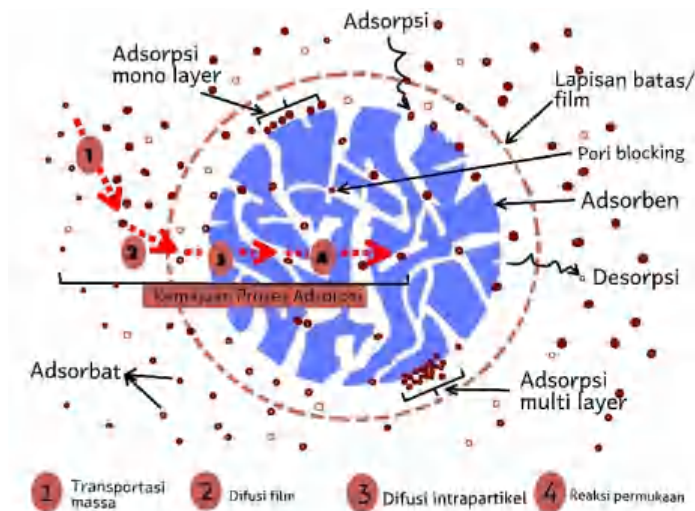
Logam berat merupakan polutan yang signifikan akibat aktivitas industri yang terus meningkat (Briffa et al., 2020). Limbah industri yang mengandung ion logam berat dapat mencemari lingkungan dan berkontribusi terhadap berbagai masalah kesehatan, termasuk kanker paru-paru, gangguan sistem pernapasan, kerusakan fungsi otak, serta gangguan pada sistem reproduksi, ginjal, kandung kemih, jantung, dan sistem imun (Singh et al., 2024). Dampak negatif tersebut dapat diatasi melalui berbagai metode yang telah dikembangkan dalam pengolahan air limbah. Beberapa metode yang umum digunakan antara lain koagulasi, presipitasi kimia, pertukaran ion, pemisahan membran, dan adsorpsi (Fei and Hu, 2023; Qasem et al., 2021; Vidu et al., 2020). Di antara metode yang tersedia, adsorpsi menjadi metode yang menjanjikan karena mampu menghilangkan polutan dalam konsentrasi rendah, memerlukan energi relatif kecil, serta bahan untuk membuat material adsorben tersedia dalam jumlah melimpah (Fiyadh et al., 2019).



Adsorpsi merupakan proses pemisahan yang terjadi ketika molekul fluida ke permukaan zat padat (adsorben) sebagai akibat dari gaya tarik-menarik molekul pada permukaan padatan. umumnya diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, fisisorpsi) dan adsorpsi kimia (kemisorpsi). Adsorpsi fisik si gaya van der Waals, interaksi dipol, dan ikatan hidrogen, berat berpindah dari larutan ke permukaan adsorben yang

memiliki muatan berlawanan. Sebaliknya, adsorpsi kimia melibatkan pembentukan ikatan kimia antara adsorbat dan adsorben, menghasilkan interaksi yang lebih kuat dan spesifik terhadap ion tertentu (Abin-Bazaine et al., 2022; Alaqarbeh et al., 2021; Huber et al., 2019).

Mekanisme utama adsorpsi ion logam berat menggunakan zeolit terjadi melalui pertukaran ion, dimana ion logam yang terdapat dalam larutan menggantikan kation yang telah ada di dalam struktur zeolit (Jiménez-Reyes et al., 2021). Interaksi ini terjadi karena muatan elektrostatik negatif yang dimiliki zeolit menarik ion logam bermuatan positif, sehingga memungkinkan terjadinya pertukaran ion antara kation awal dan ion logam target (Velarde et al., 2023). Selain itu, mekanisme lain yang berkontribusi terhadap proses adsorpsi meliputi interaksi elektrostatik, kompleksasi permukaan, dan difusi ion ke dalam pori (Eren et al., 2024). Menurut Krishna and van Baten (2020), adsorpsi berlangsung melalui beberapa tahap (**Gambar 1.3**), dimulai dengan transportasi massa, di mana adsorbat berpindah dari fase cair ke permukaan adsorben. Selanjutnya, adsorbat melewati lapisan batas melalui difusi intrapartikel sebelum memasuki pori adsorben. Setelah mencapai situs aktif, adsorpsi terjadi dalam bentuk monolayer atau multilayer, bergantung pada interaksi antar-molekul. Fenomena seperti *pori blocking*, yang menyebabkan penyumbatan pori akibat akumulasi adsorbat, serta desorpsi akibat perubahan pH, suhu, atau konsentrasi, turut mempengaruhi efisiensi adsorpsi.



isme umum proses adsorpsi (modifikasi Eren et al., 2024)

is adsorben merupakan faktor fundamental dalam dsorpsi. Adsorben yang ideal harus memiliki kapasitas dan adap adsorbat, kinetika adsorpsi dan desorpsi yang cepat, yang baik dalam regenerasi (Bădescu et al., 2018). Selain memiliki ketahanan struktural yang tinggi, harga yang

ekonomis, kemampuan digunakan secara berkelanjutan, serta ramah lingkungan (Krishna et al., 2023). Berbagai material telah digunakan sebagai adsorben untuk menghilangkan ion logam berat, seperti karbon aktif (Rofikoh et al., 2023), karbon *nanotube* (Baby et al., 2019), *graphene oxide* (Nirmala et al., 2022), silika mesopori (Taba et al., 2017), kerangka logam organik (Taleb et al., 2024), serta residu limbah industri (Aigbe et al., 2021). Di antara berbagai jenis adsorben tersebut, zeolit menjadi material yang menarik perhatian para peneliti karena karakteristik fisikokimia unggulnya, termasuk kemampuan pertukaran kation, pengayakan molekuler, katalisis, dan adsorpsi (Hong et al., 2019).

Efektivitas adsorpsi menggunakan zeolit tidak hanya ditentukan oleh sifat alamiahnya, tetapi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk komposisi kimia, ukuran dan distribusi pori, serta perlakuan pasca-sintesis seperti kalsinasi atau pertukaran ion (Bahmanzadegan and Ghaemi, 2024). Variasi struktur kristal zeolit juga menghasilkan perbedaan karakteristik dalam kapasitas adsorpsinya terhadap ion logam berat. Selain itu, kondisi operasional, seperti pH dan suhu, turut berperan penting dalam mengoptimalkan proses adsorpsi (Satyam and Patra, 2024). Jumlah ion yang dijerap oleh adsorben dalam proses adsorpsi dapat dihitung dengan mengukur konsentrasi ion sebelum dan sesudah proses adsorpsi. Nilai ini umumnya dinyatakan dalam satuan mg/g, yang menunjukkan jumlah ion yang dapat dijerap oleh setiap gram adsorben (Khamwicht et al., 2022) seperti ditunjukkan pada persamaan (1),

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)V}{m} \quad (1)$$

keterangan:

q_e : jumlah ion yang teradsorpsi per satuan massa adsorben (mg/g)

C_0 : konsentrasi awal ion dalam larutan (mg/L),

C_e : konsentrasi ion pada kesetimbangan setelah adsorpsi (mg/L),

V : volume larutan (L),

m : massa adsorben yang digunakan (g)

Pada kajian tentang adsorpsi, dikenal pula istilah kapasitas adsorpsi (q_e), yaitu jumlah maksimum zat terlarut yang dapat terikat pada adsorben dalam kondisi kesetimbangan. Parameter ini dianggap sebagai tolok ukur utama dalam menilai performa suatu adsorben (Silva et al., 2018). Adsorben dengan kapasitas adsorpsi yang tinggi umumnya dianggap lebih efisien dan ekonomis, terutama dalam aplikasi pengolahan limbah yang membutuhkan penghilangan ion logam berat secara efektif. Penentuan kapasitas adsorpsi biasanya dilakukan dengan



on atau molekul yang teradsorpsi pada permukaan material
bagai konsentrasi larutan. Data hasil adsorpsi ini kemudian
nggunakan model Isoterm adsorpsi.

sorpsi

upakan suatu fungsi konsentrasi yang menggambarkan

hubungan antara jumlah adsorbat yang dijerap oleh adsorben pada kondisi kesetimbangan dan suhu konstan (Al-Ghouti and Da'ana, 2020). Isoterm adsorpsi dapat digunakan untuk mempelajari mekanisme adsorpsi suatu zat. Isoterm adsorpsi berperan dalam menggambarkan interaksi antara adsorbat dan adsorben (Chen et al., 2022). Model isoterm adsorpsi yang dikembangkan ada beberapa, seperti isoterm adsorpsi Langmuir, Freundlich dan Sips.

Isoterm Langmuir menunjukkan proses adsorpsi monolayer yang diperoleh dari situs aktif yang diberikan pada permukaan zeolit (Waheed et al., 2021). Isoterm Freundlich menunjukkan proses adsorpsi multilayer pada permukaan heterogen yang ditandai dengan interaksi antara ion-ion yang teradsorpsi pada situs aktif di sekitarnya (Wang & Guo, 2020). Model isoterm Sips menggabungkan prinsip-prinsip dari model Langmuir dan Freundlich secara eksplisit digunakan untuk sistem adsorpsi pada permukaan heterogen (Almeida-Naranjo et al., 2021; Ebadi and Rafati, 2015).

Persamaan isoterm adsorpsi Langmuir linear dan nonlinear dapat dituliskan berturut-turut pada persamaan (2) dan (3),

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{q_e}{q_m} + \frac{1}{K_L q_m} \quad (2)$$

$$q_e = \frac{q_m K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

Keterangan:

q_e : jumlah adsorbat yang teradsorpsi per bobot adsorben (mg/g),

C_e : konsentrasi adsorbat dalam larutan pada kondisi kesetimbangan (mg/L)

K_L : konstanta Langmuir terkait dengan kapasitas adsorpsi

q_m : kapasitas adsorpsi maksimum (mg/g).

Interpretasi kondisi adsorpsi oleh isoterm adsorpsi Langmuir dapat ditentukan menggunakan konstanta tak berdimensi (R_L) (Akrawi et al., 2021) yang tuliskan pada persamaan (4),

$$R_L = \frac{1}{1 + K_L C_0} \quad (4)$$

Keterangan:

C_0 : konsentrasi awal adsorbat (mg/L)

K_L : konstanta Langmuir terkait dengan kapasitas adsorpsi

Persamaan isoterm adsorpsi Freundlich linear dan nonlinear dapat dituliskan persamaan (5) dan (6),

$$\log q_e = \log K_f + \frac{1}{n} \log C_e \quad (5)$$

$$q_e = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$



C_e : konsentrasi adsorbat dalam larutan pada kondisi kesetimbangan (mg/L)
 K_f : konstanta Freundlich terkait dengan kapasitas adsorpsi dan laju adsorpsi
 n : intensitas adsorpsi

Persamaan isoterm adsorpsi Sips linear dan nonlinear dapat dituliskan berturut-turut pada persamaan (7) dan (8)

$$\ln \frac{q_e}{q_m - q_e} = \ln K_s + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (7)$$

$$q_e = \frac{q_{ms} K_s C_e^{n_s}}{1 + K_s C_e^{n_s}} \quad (8)$$

Keterangan:

q_m : jumlah adsorbat maksimum yang teradsorpsi (mg/g),

C_e : konsentrasi adsorbat dalam larutan pada kondisi kesetimbangan (mg/L)

K_s : konstanta Sips ($L^{n_s} \cdot \text{mg} \cdot \text{g}^{-n_s}$)

n_s : konstanta Sips

1.1.2.2 Kinetika Adsorpsi

Kinetika adsorpsi merupakan laju adsorpsi dari suatu adsorben terhadap adsorbat yang digambarkan sebagai fungsi waktu (Musah et al., 2022). Studi kinetika adsorpsi sangat penting untuk memahami laju adsorpsi pada permukaan partikel adsorben, karena model kinetika dapat menggambarkan pengaruh berbagai kondisi terhadap laju proses adsorpsi (Al-Harby et al., 2021). Penelitian ini mengkaji kinetika adsorpsi ion logam dengan menggunakan model kinetika orde satu semu dan orde dua semu linear. Formulasi matematis dari kedua model tersebut dituliskan dalam persamaan (9) dan (10),

$$\ln (q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (9)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{t}{q_e} + \frac{1}{k_2 q_e^2} \quad (10)$$

Keterangan:

q_t : jumlah adsorbat yang teradsorpsi oleh adsorben pada waktu t (mg/g)

q_e : jumlah adsorbat yang teradsorpsi pada saat kesetimbangan (mg/g)

k_1 : konstanta orde satu semu ($\text{g/mg} \cdot \text{menit}$),



Desorpsi adalah suatu metode yang digunakan untuk melepaskan kembali diadsorpsi. Desorpsi dapat dilakukan untuk memulihkan adsorbat yang telah teradsorpsi. Desorpsi dapat digunakan lebih lanjut (Vakili et al., 2019). Proses

desorpsi dilakukan dengan memberikan suatu pelarut yang cocok untuk adsorbat yang biasa disebut eluen (Patel, 2021). Menurut Kocadagistan (2022), rumus untuk mengetahui efisiensi desorpsi dan jumlah zat yang terdesorpsi oleh suatu adsorben dapat dituliskan pada persamaan (11) dan (12).

$$\text{Efisiensi desorpsi (\%)} = \frac{C_{des}}{C_{ads}} \times 100\% \quad (11)$$

$$\text{Jumlah yang terdesorpsi (mg/g)} = \frac{C_{des}}{m} \times V \quad (12)$$

Keterangan:

C_{des} : konsentrasi adsorbat yang terdesorpsi (mg/g)

C_{ads} : konsentrasi adsorbat yang teradsorpsi (mg/g)

m : massa adsorben (m)

V : volume larutan pendesorpsi (L)

1.1.2.4 Selektivitas adsorpsi

Selektivitas adsorpsi merupakan salah satu parameter penting dalam proses pemisahan ion logam menggunakan adsorben seperti zeolit. Selektivitas ini merujuk pada kemampuan zeolit untuk mengadsorpsi ion logam tertentu secara lebih dominan dibandingkan ion-ion lain, baik dalam larutan tunggal maupun larutan campuran (Krishna and van Baten, 2020). Zeolit, sebagai material berpori dengan struktur kristalin yang teratur dan bermuatan negatif, memiliki afinitas tinggi terhadap kation logam. Sifat ini menjadikannya efektif dalam aplikasi pemurnian air dan pengolahan limbah cair yang mengandung ion logam berat (Priyadi et al., 2016).

Beberapa faktor utama yang memengaruhi selektivitas adsorpsi ion logam menggunakan zeolit antara lain ukuran dan muatan ion, energi hidrasi, struktur dan komposisi zeolit, nilai pH larutan, serta adanya kompetisi antar ion dalam sistem multi-komponen. Ion logam dengan muatan lebih tinggi dan jari-jari ion yang sesuai dengan diameter pori zeolit cenderung lebih baik teradsorpsi. Selain itu, ion yang memiliki energi hidrasi lebih rendah mudah melepaskan molekul air terikat, sehingga dapat berinteraksi lebih efektif dengan situs aktif pada permukaan zeolit (Bahmanzadegan and Ghaemi, 2024; Fan et al., 2021).

Evaluasi selektivitas adsorpsi umumnya dilakukan dengan membandingkan kapasitas adsorpsi masing-masing ion dalam kondisi bersamaan atau melalui perhitungan koefisien selektivitas berdasarkan data kesetimbangan adsorpsi (Nguyen et al., 2024). Pada sistem multikomponen,



logam untuk menempati situs aktif yang tersedia. Zeolit adsorpsi ion dengan afinitas tertinggi, yang ditentukan oleh ukuran pori, muatan permukaan, dan interaksinya dengan permukaan zeolit (Castro-Pedraza et al., 2024). Pemahaman terhadap mekanisme selektivitas adsorpsi penting untuk optimalisasi penggunaan zeolit dalam sistem pemisahan logam berat. Penelitian ini akan dilakukan pada skala laboratorium maupun industri.

Menurut Seidou et al., (2022), nilai selektivitas adsorpsi (K_d) dihitung dengan menggunakan persamaan (13),

$$K_d = \frac{C_o - C_e}{C_e} \times \frac{V}{m_s} \quad (13)$$

dimana C_o dan C_e yaitu konsentrasi awal dan konsentrasi akhir (mg/L), V yaitu volume larutan (L) dan m_s yaitu massa adsorben (g).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. bagaimana karakteristik zeolit sintesis dari mineral alam Toraja Utara?
2. bagaimana kondisi optimum (waktu dan pH) adsorpsi ion logam Pb(II) dan Fe(III) oleh zeolit sintesis?
3. berapa kapasitas adsorpsi dan model isoterm adsorpsi apakah yang sesuai untuk adsorpsi ion logam Pb(II) dan Fe(III) oleh zeolit sintesis?
4. bagaimana kinetika adsorpsi ion logam Pb(II) dan Fe(III) oleh zeolit sintesis?
5. larutan pendesorpsi apa yang efektif antara HNO_3 , Na_2EDTA dan H_2O yang digunakan sebagai agen pendesorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) dari zeolit sintesis, serta berapa persen desorpsinya?
6. bagaimana selektivitas adsorpsi ion logam Pb(II) dan Fe(III) dalam sistem tunggal, bilogam dan multilogam oleh zeolit sintesis?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukan penelitian ini, sebagai berikut:

1. menganalisis karakteristik zeolit sintesis dari mineral alam Toraja Utara.
2. menentukan kondisi optimum (waktu dan pH) pada adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) menggunakan zeolit sintesis.
3. menentukan kapasitas adsorpsi dan model isotermal adsorpsi yang sesuai untuk ion Pb(II) dan Fe(III) menggunakan zeolit sintesis.
4. menganalisis model kinetika adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) dengan menggunakan zeolit sintesis.
5. menentukan larutan pendesorpsi yang efektif antara HNO_3 , Na_2EDTA dan H_2O ntuk digunakan sebagai agen pendesorpsi dari zeolit sintesis.
6. menilai selektivitas adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) menggunakan zeolit sintesis.



elitian

kan dapat memberikan manfaat, sebagai berikut:
 1. Informasi terkait metode sintesis zeolit dari mineral alam dan
 2. nya terhadap ion logam berat.

2. memberikan solusi untuk pengolahan limbah yang mengandung ion logam berat sehingga dapat mengurangi pencemaran lingkungan.

1.5 Kerangka Pikir

Industri logam mengalami perkembangan yang pesat. Namun, industri ini menimbulkan dampak negatif dengan menghasilkan limbah cair yang mengandung ion logam berat, seperti ion $Pb(II)$ dan $Fe(III)$. Ion $Pb(II)$ bersifat toksik bagi tubuh manusia meski dalam konsentrasi rendah, sedangkan ion $Fe(III)$ berperan bagi tubuh dalam pembentukan hemoglobin. Namun, akumulasi ion $Fe(III)$ dalam jumlah berlebih dapat bersifat toksik bagi tubuh. Keberadaan kedua ion tersebut dalam lingkungan perairan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan organisme akuatik. Oleh karena itu, diperlukan upaya pengolahan limbah cair yang efektif untuk menurunkan konsentrasi ion logam berat guna meminimalkan risiko pencemaran lingkungan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengatasi permasalahan pencemaran limbah cair yang berasal dari industri berbasis logam. Salah satu metode yang dinilai efektif dan banyak digunakan dalam penanganan limbah cair tersebut adalah adsorpsi. Metode ini menawarkan keunggulan dalam hal kesederhanaan operasi, efisiensi yang tinggi, serta kemampuan untuk menghilangkan ion logam berat dalam konsentrasi rendah. Salah satu jenis material yang berpotensi digunakan sebagai adsorben adalah zeolit. Zeolit memiliki sejumlah keunggulan, antara lain kestabilan kimia dan termal, ramah lingkungan, efisiensi adsorpsi yang tinggi, serta kemampuan selektif dalam mengikat ion logam melalui pertukaran ion maupun interaksi permukaan.

Zeolit dapat diperoleh secara alami, namun zeolit alam umumnya mengandung pengotor seperti oksida logam dan mineral lain seperti lempung, atau silika bebas, yang dapat menurunkan efisiensi adsorpsi. Kehadiran pengotor ini mengurangi kinerja zeolit alam sebagai adsorben. Hal tersebut dapat diatasi menggunakan zeolit sintesis sebagai alternatif yang menjanjikan karena memiliki kemurnian yang lebih tinggi, keseragaman ukuran partikel lebih baik, serta struktur pori yang lebih terkontrol dibandingkan zeolit alam. Meski demikian, sintesis zeolit secara umum memerlukan biaya produksi yang relatif tinggi, terutama apabila menggunakan bahan kimia komersial sebagai prekursor. Oleh karena itu, upaya untuk menekan biaya sintesis dapat dilakukan dengan memanfaatkan bahan baku alternatif yang murah dan mudah diperoleh, seperti mineral alam yang kaya akan kandungan aluminosilikat.

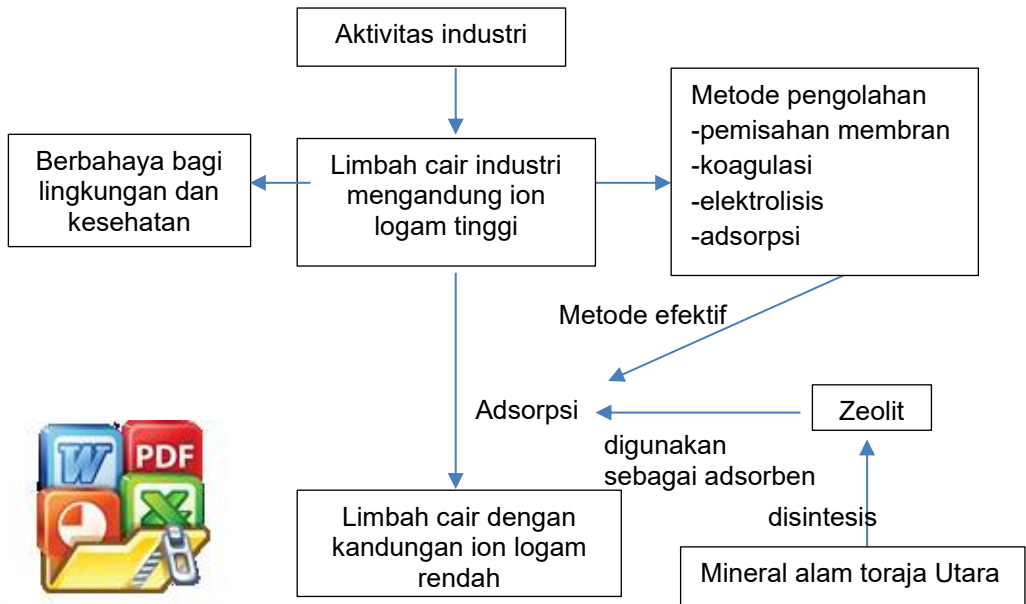


Berbagai penelitian telah dilakukan mengenai sintesis zeolit dari mineral alami (Vidi et al. (2021) yang mensintesis zeolite ZK-14 dari batu bok. Sintesis X-zeolit dari limbah serbuk basal di Tiongkok (Al. (2019). Sintesis zeolit sodalit dari batu padas di daerah (Saputra et al. (2016). Amin et al. (2023) telah mensintesis zeolit A dan CAN dari batuan feldspar Mesawa. Sintesis zeolit dari bahan baku alami biasanya dilakukan dengan menggunakan

metode hidrotermal dan penambahan alkali dengan konsentrasi tertentu yang berperan sebagai agen mineralisasi. Hal ini didasarkan oleh penelitian sebelumnya yang dilakukan (Amin et al., 2023; Esaifan et al., 2019; Koshlak, 2023; H. Wang et al., 2024), bahwa penambahan NaOH dapat memfasilitasi pembentukan unit primer tetrahedral zeolit.

Berdasarkan sejumlah penelitian, mineral alam menunjukkan potensi yang besar sebagai bahan baku dalam sintesis zeolit, khususnya apabila mengandung komponen aluminosilikat. Kandungan aluminosilikat tersebut memungkinkan terbentuknya berbagai jenis zeolit, bergantung pada karakteristik mineral bahan baku dan kondisi sintesis yang diterapkan, seperti suhu, waktu reaksi, serta jenis larutan alkali yang digunakan. Salah satu wilayah yang diketahui memiliki sumber daya mineral alam yang melimpah dengan kandungan aluminosilikat yang tinggi adalah daerah Toraja Utara. Wilayah ini merupakan kawasan bekas aktivitas vulkanik, sehingga banyak mengandung jenis mineral alam dengan komposisi silika dan alumina yang signifikan.

Beberapa laporan menunjukkan bahwa mineral alam dari Toraja Utara telah dimanfaatkan secara tradisional maupun ilmiah untuk berbagai keperluan, termasuk dalam bidang penjernihan air (Antaria, 2017; Efendy & Herawati, 2016). Namun, pemanfaatan mineral tersebut sebagai bahan baku dalam sintesis zeolit masih relatif jarang dilaporkan dalam literatur ilmiah. Oleh karena itu, eksplorasi lebih lanjut terhadap potensi mineral alam Toraja Utara sebagai prekursor dalam sintesis zeolit menjadi penting untuk dikaji. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mensintesis zeolit berbasis mineral alam Toraja Utara, yang selanjutnya digunakan sebagai adsorben dalam aplikasi pengolahan limbah cair yang mengandung ion logam berat.



Gambar 1.4 Kerangka pikir penelitian

1.6 Hipotesis

Hipotesis yang dapat diajukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. zeolit hasil sintesis dari mineral alam memiliki karakteristik masing-masing berdasarkan variasi konsentrasi NaOH yang digunakan.
2. adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) dapat dilakukan dalam kondisi optimum.
3. model isoterm adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) oleh zeolit mengikuti model isoterm Langmuir dengan kapasitas adsorpsi cukup besar.
4. kinetika adsorpsi ion Pb(II) dan Fe(III) oleh zeolit mengikuti model kinetika orde dua semu.
5. agen pendesorpsi HNO₃ efektif untuk menarik kembali ion Pb(II) dan Fe(II) dari zeolit sintesis.
6. selektivitas adsorpsi ion Pb(II) lebih besar dibanding ion Fe(III) dalam sistem tunggal dan multilogam.

1.7 Daftar Pustaka

Abin-Bazaine, A., Campos Trujillo, A., Olmos-Marquez, M., 2022. Adsorption Isotherms: Enlightenment of the Phenomenon of Adsorption, in: Wastewater Treatment. IntechOpen. 2, 1-5.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.104260>

Aigbe, U.O., Ukhurebor, K.E., Onyancha, R.B., Osibote, O.A., Darmokoesoemo, H., Kusuma, H.S., 2021. Fly ash-based adsorbent for adsorption of heavy metals and dyes from aqueous solution: a review. J. Mater. Res. Technol., 14, 2751–2774. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.140>

Akmaluddin, A., Nurmasitoh, N., Muhdarina, M., 2024. Maredan Natural Clay as Raw Material for Zeolite Synthesis. Elkawnie, 10(1), 63-74.
<https://doi.org/10.22373/ekw.v10i1.15626>

Akrawi, H.S.Y., Al-Obaidi, M.A., Abdulrahman, C.H., 2021. Evaluation of Langmuir and Freundlich isotherm equation for Zinc Adsorption in some calcareous soil of Erbil province north of Iraq. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., 761(1), 1-10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/761/1/012017>

Al-Ghouti, M.A., Da'ana, D.A., 2020. Guidelines for the use and interpretation of adsorption isotherm models: A review. J. Hazard. Mater., 393, 1-22.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122383>

Al-Harby, N.F., Albahly, E.F., Mohamed, N.A., 2021. Kinetics, Isotherm and : Studies for Efficient Adsorption of Congo Red Dye from tion onto Novel Cyanoguanidine-Modified Chitosan mers (Basel), 13(24), 1-32.
<https://doi.org/10.3390/polym13244446>



Optimized using
trial version
www.balesio.com

Abdullah, H. Bin, 2021. Adsorption Phenomena: Definition, and Adsorption Types: Short Review. RHAZES Green Appl. 1. <https://doi.org/10.48419/IMIST.PRSM/rhazes-v13.28283>

- Ali, A., Nazar, M., Mustafa, R., Hussein, S., Qurbani, K., Ahmed, S., 2023. Impact of heavy metals on breast cancer (Review). *World Acad. Sci. J.*, 6(4), 1-12. <https://doi.org/10.3892/wasj.2023.219>
- Almeida-Naranjo, C.E., Aldás, M.B., Cabrera, G., Guerrero, V.H., 2021. Caffeine removal from synthetic wastewater using magnetic fruit peel composites: Material characterization, isotherm and kinetic studies. *Environ. Challenges*, 5(100343), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100343>
- Amin, I.I., Wahab, A.W., Mukti, R.R., Taba, P., 2023. Synthesis and characterization of zeolite type ANA and CAN framework by hydrothermal method of Mesawa natural plagioclase feldspar. *Appl. Nanosci.*, 13(8), 5389–5398. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02756-4>
- Ankrah, A.F., Tokay, B., Snape, C.E., 2022. Heavy Metal Removal from Aqueous Solutions Using Fly-Ash Derived Zeolite NaP1. *Int. J. Environ. Res.*, 16(17), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s41742-022-00395-9>
- Antaria, S., 2017. The Ability of Natural Zeolite Toraja South Sulawesi as Absorbent Heavy Metal Copper (Cu). *Asian J. Appl. Sci.*, 5(5), 1083–1086.
- Armbruster, T., Gunter, M.E., 2001. Crystal Structures of Natural Zeolites. *Rev. Mineral. Geochemistry*, 45(1), 1–67. <https://doi.org/10.2138/rmg.2001.45.1>
- Baby, R., Saifullah, B., Hussein, M.Z., 2019. Carbon Nanomaterials for the Treatment of Heavy Metal-Contaminated Water and Environmental Remediation. *Nanoscale Res. Lett.*, 14(341), 1-17. <https://doi.org/10.1186/s11671-019-3167-8>
- Badan Pusat Statistik. 2024. Ekonomi Indonesia Triwulan II-2023 Tumbuh 5,17 Persen. Jakarta. Diakses pada 9 Juli 2024 dari <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2024/05/06/2380>.
- Bădescu, I.S., Bulgariu, D., Ahmad, I., Bulgariu, L., 2018. Valorisation possibilities of exhausted biosorbents loaded with metal ions – A review. *J. Environ. Manage.* 224, 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.066>
- Bahmanzadegan, F., Ghaemi, A., 2024. Exploring the effect of zeolite's structural parameters on the CO₂ capture efficiency using RSM and ANN methodologies. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 9 (100595), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100595>



vá, M., Girová, A., Pavolová, H., Hromada, R., Hajduová, cterization of Fe(III) Adsorption onto Zeolite and Bentonite. *Res. Public Health*, 17(16), 1-13. [0.3390/ijerph17165718](https://doi.org/10.3390/ijerph17165718)

Blundell, R., 2020. Heavy metal pollution in the environment logical effects on humans. *Heliyon*, 6(9), 1-26.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>

Chen, X., Hossain, M.F., Duan, C., Lu, J., Tsang, Y.F., Islam, M.S., Zhou, Y., 2022. Isotherm models for adsorption of heavy metals from water - A review. *Chemosphere*, 307(135545), 1-14.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135545>

Das, D., Nandi, B.K., 2019. Removal of Fe (II) ions from drinking water using Electrocoagulation (EC) process: Parametric optimization and kinetic study. *J. Environ. Chem. Eng.*, 7(3), 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103116>

Castro-Alves, D.L., Yáñez-Vilar, S., González-Gómez, M.A., Garcia-Acevedo, P., Arnosa-Prieto, Á., Piñeiro-Redondo, Y., Rivas, J., 2024. Understanding adsorption mechanisms and metal ion selectivity of superparamagnetic beads with mesoporous CMK-3 carbon and commercial activated carbon. *Microporous Mesoporous Mater.*, 374(113159), 1-15.

<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2024.113159>

Derbe, T., Temesgen, S., Bitew, M., 2021. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 1, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2021/6637898>

Ebadi, A., Rafati, A.A., 2015. Preparation of silica mesoporous nanoparticles functionalized with β -cyclodextrin and its application for methylene blue removal. *J. Mol. Liq.*, 209, 239–245.

<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.06.009>

Efendy, A.Z., Netti Herawati, A., 2016. Penurunan Ca^{2+} pada Air Sumber Mata Air Citta Kabupaten Soppeng dengan Menggunakan Zeolit Alam Toraja (Zeolit Mordenit). *J. Chem.*, 17(1), 44-49

Eren, S., Türk, F.N., Arslanoğlu, H., 2024. Synthesis of zeolite from industrial wastes: a review on characterization and heavy metal and dye removal. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 31(29), 41791–41823.

<https://doi.org/10.1007/s11356-024-33863-0>

Esaifan, M., Warr, L.N., Grathoff, G., Meyer, T., Schafmeister, M.-T., Kruth, A., Testrich, H., 2019. Synthesis of Hydroxy-Sodalite/Cancrinite Zeolites from Calcite-Bearing Kaolin for the Removal of Heavy Metal Ions in Aqueous Media. *Minerals*, 9(8), 1-13. <https://doi.org/10.3390/min9080484>



Pratiwi, R., Aryanto, R., Putri, T.W., 2023. Analysis the Effect ural Zeolites for Fe Metal Adsorption. *Walisongo J. Chem.*, <https://doi.org/10.21580/wjc.v6i2.17291>

S., Rachmawati, A.A., Jayanto, G.D., Widyastuti, M., 2023. and source identifications of heavy metals contamination in surface sediments from anthropogenic impacts of urban river, *on*, 9(4), 1-13.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15485>

Fan, X., Liu, H., Anang, E., Ren, D., 2021. Effects of Electronegativity and Hydration Energy on the Selective Adsorption of Heavy Metal Ions by Synthetic NaX Zeolite. *Materials (Basel)*, 14(15), 1-16.

<https://doi.org/10.3390/ma14154066>

Fei, Y., Hu, Y.H., 2023. Recent progress in removal of heavy metals from wastewater: A comprehensive review. *Chemosphere*, 335, 1-19.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139077>

Fiyadh, S.S., AlSaadi, M.A., Jaafar, W.Z., AlOmar, M.K., Fayaed, S.S., Mohd, N.S., Hin, L.S., El-Shafie, A., 2019. Review on heavy metal adsorption processes by carbon nanotubes. *J. Clean. Prod.*, 230, 783–793.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.154>

Gu, S., Kang, J., Lee, T., Shim, J., Choi, J.-W., Suh, D.J., Lee, H., Yoo, C., Baik, H., Choi, J., Ha, J.-M., 2023. Na₂WO₄/Mn supported on all-silica delaminated zeolite for the optimal oxidative coupling of methane via the effective stabilization of tetrahedral WO₄: Elucidating effects of support precursors with different crystal structures, Al-addition, and morphologies. *Chem. Eng. J.*, 457(141057), 1-12.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141057>

Hong, M., Yu, L., Wang, Y., Zhang, J., Chen, Z., Dong, L., Zan, Q., Li, R., 2019. Heavy metal adsorption with zeolites: The role of hierarchical pore architecture. *Chem. Eng. J.*, 359, 363–372.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.11.087>

Hou, S., Yuan, L., Jin, P., Ding, B., Qin, N., Li, L., Liu, X., Wu, Z., Zhao, G., Deng, Y., 2013. A clinical study of the effects of lead poisoning on the intelligence and neurobehavioral abilities of children. *Theor. Biol. Med. Model*, 10(1), 1-9.

<https://doi.org/10.1186/1742-4682-10-13>

Huber, F., Berwanger, J., Polesya, S., Mankovsky, S., Ebert, H., Giessibl, F.J., 2019. Chemical bond formation showing a transition from physisorption to chemisorption. *Science*, 366(6462), 235–238.

<https://doi.org/10.1126/science.aay3444>

Jadaa, W., Mohammed, H.K., 2023. Toxic Heavy Metals Elimination from Contaminated Effluents Utilizing Various Adsorbents: Critical Mini-Review. *J. Biomed. Res. Environ. Sci.*, 4(2), 281–296.

<https://doi.org/10.37871/jbres1673>



., 2012. ChemInform Abstract: A Review on Synthesis, and Industrial Applications of Flyash Zeolites. *ChemInform*, 43(25), 1-69.

<https://doi.org/10.1002/chin.201225227>

Optimized using
trial version
www.balesio.com

Almazán-Sánchez, P.T., Solache-Ríos, M., 2021. Wastewater treatments by using zeolites. A short review. *J. Environ. Chem. Eng.*, 9(1), 103111.

- Radioact., 233 (106610), 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106610>
- Joseph, I. V., Tosheva, L., Miller, G., Doyle, A.M., 2021. FAU-Type Zeolite Synthesis from Clays and Its Use for the Simultaneous Adsorption of Five Divalent Metals from Aqueous Solutions. *Materials (Basel)*, 14(13), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/ma14133738>
- Kartawa, W., Kusumah, K.D., 2006. Potensi Zeolit di Daerah Sangkaropi-Mendila, Tana Toraja, Sulawesi Selatan. *J. Geol. dan Sumberd. Miner.*, 16(6), 371–386.
- Ke, G., Shen, H., Yang, P., 2019. Synthesis of X-Zeolite from Waste Basalt Powder and its Influencing Factors and Synthesis Mechanism. *Materials (Basel)*, 12(23), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ma12233895>
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. 2024. Jadi Penggerak Ekonomi, Kontribusi Manufaktur Masih Tertinggi. Diakses pada 9 Juli 2024 dari <https://kemenperin.go.id/artikel/24240>
- Khaleque, A., Alam, M.M., Hoque, M., Mondal, S., Haider, J. Bin, Xu, B., Johir, M.A.H., Karmakar, A.K., Zhou, J.L., Ahmed, M.B., Moni, M.A., 2020. Zeolite synthesis from low-cost materials and environmental applications: A review. *Environ. Adv.*, 2(100019), 1-24.
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>
- Khamwichit, A., Dechapanya, Wipawee, Dechapanya, Wipada, 2022. Adsorption kinetics and isotherms of binary metal ion aqueous solution using untreated venus shell. *Heliyon*, 8(6), 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09610>
- Kocadagistan, B., 2022. Desorption in heavy metal adsorption : A review. *IOSR*, 16(11), 57–64. <https://doi.org/10.9790/2402-1611025764>
- Koshlak, H., 2023. Synthesis of Zeolites from Coal Fly Ash Using Alkaline Fusion and Its Applications in Removing Heavy Metals. *Materials (Basel)*, 16(13), 1-20. <https://doi.org/10.3390/ma16134837>
- Krishna, R., van Baten, J.M., 2020. Elucidation of Selectivity Reversals for Binary Mixture Adsorption in Microporous Adsorbents. *ACS Omega* 5(15), 9031–9040. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01051>



ndraprabha, M.N., Samrat, K., Krishna Murthy, T.P., Kumar, S.G., 2023. Carbon nanotubes and graphene-for adsorptive removal of metal ions – A review on surface and related adsorption mechanism. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100431>

- Kurniawidi, D.W., Alaa, S., Mulyani, S., Rahayu, S., 2021. Sintesis Zeolit dari Batu Apung (Pumice) Daerah Ijobalit Lombok Timur sebagai Adsorben Logam Fe. *Orbita J. Pendidik. dan Ilmu Fis.*, 7(2), 313-317. <https://doi.org/10.31764/orbita.v7i2.6010>
- Matei, E., Predescu, A.M., Șăulean, A.A., Râpă, M., Sohaciu, M.G., Coman, G., Berbecaru, A.-C., Predescu, C., Văju, D., Vlad, G., 2022. Ferrous Industrial Wastes—Valuable Resources for Water and Wastewater Decontamination. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19(21), 1-25. <https://doi.org/10.3390/ijerph192113951>
- Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T. Bin, Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal-Gandara, J., 2022. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *J. King Saud Univ. - Sci.*, 34(3), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- Nazir, L.S.M., Yeong, Y.F., Chew, T.L., 2020. Controlled growth of Faujasite zeolite with NaX topology by manipulating solution aging and Na₂O/Al₂O₃ ratios. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, 600(124803), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124803>
- Musah, M., Azeh, Y., Mathew, J., Umar, M., Abdulhamid, Z., Muhammad, A., 2022. Adsorption Kinetics and Isotherm Models: A Review. *Caliphate J. Sci. Technol.*, 4(1), 20–26. <https://doi.org/10.4314/cajost.v4i1.3>
- Nakamura, A., Sugawara, K., Nakajima, S., Murakami, K., 2017. Adsorption of Cs ions using a temperature-responsive polymer/magnetite/zeolite composite adsorbent and separation of the adsorbent from water using high-gradient magnetic separation. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, 527, 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.05.032>
- Namratha, K., Nayan, M.B., Darshan, M.S., Basavarajappa, H.T., Madesh, P., Byrappa, K., 2022. Hydrothermal – From Geology to Technology (Part 1). *J. Geol. Soc. India*, 98(3), 353–362. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-1987-0>
- Nedjimi, B., 2021. Phytoremediation: a sustainable environmental technology for heavy metals decontamination. *SN Appl. Sci.*, 3(286), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04301-4>
- Ngapa, Y.D., Sugiarti, S., Abidin, Z., 2018. Hydrothermal Transformation of Iron Endo-NTT and Its Application as Adsorbent of Cationic . *Chem.*, 16(2), 138-143. <https://doi.org/10.22146/ijc.21156>
- Nguyen, L.T., Nguyen, H.T.T., Le, T.-H., 2024. Adsorption of Heavy Metal Ions (Cs⁺, Sr²⁺, and Co²⁺) from Water Using ZnO Nanoparticles (Zn-Fe₃O₄ NPs). *Inorganics*, 12(11), 1-15. <https://doi.org/10.3390/inorganics12110276>



- Nirmala, N., Shriniti, V., Aasresha, K., Arun, J., Gopinath, K.P., Dawn, S.S., Sheeladevi, A., Priyadharsini, P., Birindhadevi, K., Chi, N.T.L., Pugazhendhi, A., 2022. Removal of toxic metals from wastewater environment by graphene-based composites: A review on isotherm and kinetic models, recent trends, challenges and future directions. *Sci. Total Environ.*, 840(156564), 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156564>
- Patel, H., 2021. Review on solvent desorption study from exhausted adsorbent. *J. Saudi Chem. Soc.*, 25(8), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101302>
- Piskin, E., Cianciosi, D., Gulec, S., Tomas, M., Capanoglu, E., 2022. Iron Absorption: Factors, Limitations, and Improvement Methods. *ACS Omega*, 7(24), 20441–20456. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c01833>
- Prayoga, G., Utomo, B.A., Effendi, H., 2022. Heavy Metals Contamination and Water Quality Parameter Conditions in Jatiluhur Reservoir, West Java, Indonesia. *Biotropia (Bogor)*, 29(1), 7-17
<https://doi.org/10.11598/btb.2022.29.1.1443>
- Priyadi, Iskandar, Suwardi, Mukti, R.R., 2016. Characteristics of Heavy Metals Adsorption Cu, Pb and Cd Using Synthetics Zeolite ZSM-5. *J. Trop. Soils* 20(2), 77-83. <https://doi.org/10.5400/jts.2015.v20i2.77-83>
- Qasem, N.A.A., Mohammed, R.H., Lawal, D.U., 2021. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, 4(1), 1-15. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Rakhym, A.B., Seilkhanova, G.A., Kurmanbayeva, T.S., 2020. Adsorption of lead (II) ions from water solutions with natural zeolite and chamotte clay. *Mater. Today Proc.*, 31, 482–485. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.672>
- Rofikoh, V., Zaman, B., Samadikun, B.P., 2023. The Potential of Commercial Biomass-Based Activated Carbon to Remove Heavy Metals in Wastewater – A Review. *J. Ilmu Lingkungan*, 22(1), 132–141.
<https://doi.org/10.14710/jil.22.1.132-141>
- Salami, I.R.S., Thufailah, N.A., Fahimah, N., Roosmini, D., 2025. Health risk assessment of physicochemical and heavy metals exposures of the usage of shallow groundwater located at the proximity to Citarum River, Indonesia. *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, 11(101153), 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.csee.2025.101153>



rti, L., Nurlina. 2016. Zeolit Sintesis Berbahan Dasar Batu
 ukaharja Kecamatan Singkup. *Jurnal Kimia Khatulistiwa*,

., 2024. Innovations and challenges in adsorption-based
 irradiation: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(9), 1-24.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29573>

Seidou, C.D., Wang, T., Espoire, M.M.R.B., Dai, Y., Zuo, Y., 2022. A Review of the Distribution Coefficient of Some Selected Heavy Metals over the Last Decade (2012-2021). *J. Geosci. Environ. Prot.*, 10(08), 199–242.

<https://doi.org/10.4236/gep.2022.108014>

Shin, S., Kim, M.J., 2024. Hydrothermal synthesis of zeolites from residual waste generated via indirect carbonation of coal fly ash. *Sustain. Environ. Res.* 34(1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00206-6>

Shukla, V., Shukla, P., Tiwari, A., 2018. Lead poisoning. *Indian J. Med. Spec.*, 9(3), 146–149. <https://doi.org/10.1016/j.injms.2018.04.003>

Silva, C.P., Jaria, G., Otero, M., Esteves, V.I., Calisto, V., 2018. Waste-based alternative adsorbents for the remediation of pharmaceutical contaminated waters: Has a step forward already been taken? *Bioresour. Technol.*, 250, 888–901. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.102>

Singh, V., Ahmed, G., Vedika, S., Kumar, P., Chaturvedi, S.K., Rai, S.N., Vamanu, E., Kumar, A., 2024. Toxic heavy metal ions contamination in water and their sustainable reduction by eco-friendly methods: isotherms, thermodynamics and kinetics study. *Sci. Rep.* 14(1), 1-13.

<https://doi.org/10.1038/s41598-024-58061-3>

Taba, P., Budi, P., Puspitasari, A.Y., 2017. Adsorption of heavy metals on amine-functionalized MCM-48. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 188(012015), 1-9.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/188/1/012015>

Taleb, M.A., Kumar, R., Barakat, M.A., Almeelbi, T., Seliem, M.K., Ahmad, A., 2024. Recent advances in heavy metals uptake by tailored silica-based adsorbents. *Sci. Total Environ.* 955(177093), 1-22.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.177093>

Thakur, A.K., Singh, R., Teja Pullela, R., Pundir, V., 2022. Green adsorbents for the removal of heavy metals from Wastewater: A review. *Mater. Today Proc.*, 57, 1468–1472. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.373>

Vakili, M., Deng, S., Cagnetta, G., Wang, W., Meng, P., Liu, D., Yu, G., 2019. Regeneration of chitosan-based adsorbents used in heavy metal adsorption: A review. *Sep. Purif. Technol.*, 224, 373–387.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.05.040>



Optimized using
trial version
www.balesio.com

:-Cordoves, A.I., Díaz-García, M.E., 2006. Zeolites and aterials in analytical chemistry. *TrAC Trends Anal. Chem.*, [tps://doi.org/10.1016/j.trac.2005.04.016](https://doi.org/10.1016/j.trac.2005.04.016)

Λ.S., Escalera, E., Antti, M.-L., Akhtar, F., 2023. Adsorption on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, 328(138508), [org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138508)

- Vidu, R., Matei, E., Predescu, A.M., Alhalaili, B., Pantilimon, C., Tarcea, C., Predescu, C., 2020. Removal of Heavy Metals from Wastewaters: A Challenge from Current Treatment Methods to Nanotechnology Applications. *Toxics* 8(4), 1-37. <https://doi.org/10.3390/toxics8040101>
- Waheed, A., Baig, N., Ullah, N., Falath, W., 2021. Removal of hazardous dyes, toxic metal ions and organic pollutants from wastewater by using porous hyper-cross-linked polymeric materials: A review of recent advances. *J. Environ. Manage.*, 287(112360), 1-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112360>
- Wang, C., Li, J., Sun, Xia, Wang, L., Sun, Xiuyun, 2009. Evaluation of zeolites synthesized from fly ash as potential adsorbents for wastewater containing heavy metals. *J. Environ. Sci.*, 21(1), 127–136. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60022-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60022-X)
- Wang, H., Zhang, F., Ang, R., Ren, D., 2024. Hydrothermal Synthesis of Cancrinite from Coal Gangue for the Immobilization of Sr. *Materials (Basel)*, 17(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/ma17030573>
- Wang, J., Guo, X., 2020. Adsorption kinetic models: Physical meanings, applications, and solving methods. *J. Hazard. Mater.*, 390(122156), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122156>
- Wang, Q., Wang, J., Zhou, Y., Lin, X., 2013. Synthesis of framework-substituted Co-mordenite by dry gel conversion. *J. Porous Mater.*, 20(6), 1519–1523. <https://doi.org/10.1007/s10934-013-9738-7>
- World Health Organization. 2023. Lead Poisoning. Diakses pada 26 Agustus 2023 dari <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>.
- Xiao, W., Garba, Z.N., Sun, S., Lawan, I., Wang, L., Lin, M., Yuan, Z., 2020. Preparation and evaluation of an effective activated carbon from white sugar for the adsorption of rhodamine B dye. *J. Clean. Prod.* 253(119989), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119989>
- Yang, X., Wan, Y., Zheng, Y., He, F., Yu, Z., Huang, J., Wang, H., Ok, Y.S., Jiang, Y., Gao, B., 2019. Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review. *Chem. Eng. J.*, 366, 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.119>



Saputri, R., Edelwis, T.W., Pardi, H., 2023. Heavy Metal nesian Waters. *Bio Web Conf.* 79(04001), 1-9. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20237904001>

BAB II

TOPIK PENELITIAN I

SINTESIS DAN KARAKTERISASI ZEOLIT DARI MINERAL ALAM TORAJA UTARA

2.1 Abstrak

Latar belakang. Zeolit merupakan material alternatif yang memiliki berbagai manfaat, terutama dalam aplikasi adsorpsi, katalisis, dan penukaran ion. Zeolit sintesis memiliki keunggulan berupa kemurnian tinggi dan keseragaman ukuran partikel, sehingga menarik perhatian banyak peneliti dalam upaya sintesisnya. Salah satu pendekatan yang digunakan adalah sintesis berbasis mineral alam sebagai sumber aluminosilikat, yang dapat menghasilkan variasi struktur zeolit bergantung pada kondisi sintesis. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis dan mengarakterisasi zeolit dengan sumber aluminosilikat berasal dari mineral alam Toraja Utara. **Metode.** Sintesis dilakukan menggunakan metode hidrotermal pada suhu 170 °C melalui rekristalisasi mineral alam dengan variasi konsentrasi NaOH dan waktu reaksi. Produk hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDX, dan SAA. **Hasil.** Karakterisasi awal menunjukkan bahwa mineral alam Toraja Utara yang digunakan merupakan bentonit dengan kandungan utama montmorillonit. Reaksi dengan NaOH menghasilkan zeolit analsim (ANA) dan kankrinit (CAN). Hasil analisis XRD mengidentifikasi ANA dengan struktur kristal tetragonal dan CAN dengan struktur heksagonal. Rasio molar Si/Al yang diperoleh dari analisis EDX adalah 2,40 untuk ANA dan 1,27 untuk CAN. Spektra FTIR menunjukkan pita serapan khas zeolit, dengan peningkatan intensitas yang diamati pada konsentrasi NaOH yang lebih tinggi. Zeolit ANA menampilkan pita serapan khas di bawah 650 cm⁻¹ yang berkaitan dengan getaran cincin ganda dalam strukturnya, sementara pita triplet pada 676, 622, dan 565 cm⁻¹ mengonfirmasi struktur khas CAN. Analisis SEM menunjukkan bahwa kristal ANA berbentuk trapezium dengan ukuran rata-rata 24 µm, sedangkan kristal CAN berbentuk batang dengan panjang rata-rata 1,66 µm. Hasil analisis SAA menunjukkan bahwa zeolit ANA dan CAN termasuk dalam kategori material mesopori. Zeolit ANA memiliki ukuran pori rata-rata 4,97 nm dengan luas permukaan spesifik sebesar 75,49 m²/g. Zeolit CAN memiliki ukuran pori rata-rata berkisar antara 6,84 dan 5,38 nm dengan luas permukaan spesifik sebesar 43,03 dan 51,97 m²/g. **Kesimpulan.** Terbentuknya zeolit ANA dan CAN menunjukkan bahwa mineral alam Toraja Utara mengandung unit bangunan sekunder zeolit, sehingga mineral tersebut berpotensi untuk membentuk berbagai jenis zeolit yang bergantung pada kondisi reaksi.

Kata kunci: Mineral Alam, Toraja Utara, Analsim, Kankrinit, Metode Hidrotermal



Optimized using
trial version
www.balesio.com

enyawa aluminosilikat terhidrasi yang tersusun atas unit AlO_4 . Unit tersebut saling terhubung melalui atom oksigen a tiga dimensi berpori khas zeolit (Li et al., 2023). Atom Si at tetrahedral, sedangkan atom O menempati posisi sudut. tatan dengan O^{2-} menghasilkan muatan negatif yang

dinetralkan oleh ikatan dengan kation tambahan seperti Na^+ , K^+ , Ca^{2+} dan Mg^{2+} (Jha and Singh, 2012). Kation tersebut mudah dipertukarkan, sehingga berperan penting dalam kemampuan pertukaran kation, adsorpsi dan stabilitas termal zeolit. Selain jenis kation, karakteristik zeolit juga dipengaruhi oleh rasio Si/Al dalam kerangka zeolit. Zeolit dengan rasio Si/Al rendah (sekitar 1–3) memiliki banyak muatan negatif dalam kerangkanya, sehingga lebih efektif dalam aplikasi adsorpsi ion logam. Sebaliknya, zeolit dengan rasio Si/Al tinggi (>5) cenderung bersifat lebih hidrofobik, stabil secara kimia dan termal, namun memiliki kapasitas pertukaran ion yang lebih rendah, sehingga cenderung ideal untuk adsorpsi senyawa organik, pemisahan gas dan katalisis (Castillo et al., 2013; Jiang et al., 2018; Wang et al., 2019).

Zeolit dapat diperoleh dari alam maupun melalui proses sintesis menggunakan pereaksi kimia. Zeolit alam terbentuk secara geologis melalui proses alterasi hidrotermal pada batuan vulkanik dan endapan silikat, namun cenderung mengandung pengotor seperti oksida logam yang dapat menurunkan kualitas aplikatifnya (Ngapa et al., 2018). Zeolit sintesis menawarkan kemurnian dan keseragaman ukuran partikel yang lebih tinggi dari zeolit alam, serta komposisi kimia yang dapat dikontrol sesuai dengan kebutuhan. Meskipun demikian, proses sintesis zeolit memerlukan biaya yang relatif tinggi (Gu et al., 2023), sehingga mendorong upaya penelitian untuk mengembangkan metode sintesis berbasis bahan alam yang murah dan melimpah.

Mineral alam yang kaya akan kandungan silika dan alumina merupakan material yang berpotensi sebagai prekursor sintesis zeolit. Mineral ini banyak ditemukan pada daerah pegunungan vulkanik, seperti daerah Toraja dan Mamasa, Sulawesi Selatan. Daerah dengan aktivitas vulkanik umumnya menghasilkan endapan mineral yang mengandung fasa pembentuk kerangka zeolit meskipun dalam bentuk tidak murni (Kartawa and Kusumah, 2006).

Beragam jenis mineral alam telah dilaporkan sebagai bahan baku sintesis zeolit karena kandungan Si dan Al yang memadai. Misalnya, batu apung telah berhasil digunakan dalam sintesis zeolit Na-P1 melalui proses sederhana dengan penambahan NaOH (Prajaputra et al., 2019). Limbah serbuk basal, yang merupakan produk samping dari industri pengolahan dan konstruksi batu alam, telah dimanfaatkan sebagai bahan baku yang ekonomis untuk sintesis zeolit X karena ketersediaannya yang melimpah (Ke et al., 2019). Batu padas (Outram et al., 2023) dan feldspar Mesawa (Amin et al., 2023), mengandung rasio Si/Al rendah, sehingga sesuai untuk sintesis zeolit dengan Si/Al rendah. Kaolin, sebagai mineral filosilikat, menunjukkan reaktivitas kimia yang tinggi setelah



jadi metakaolin, yang kemudian dapat berinteraksi secara n alkali membentuk struktur zeolit (Joseph et al., 2021; neno, 2021). Selain itu, abu layang batubara yang ari 50% Al_2O_3 , telah banyak dimanfaatkan dalam sintesis arena komposisi kimianya yang sesuai dengan kebutuhan mbentukan kerangka zeolit (Teng et al., 2022).

Salah satu bentuk zeolit yang banyak disintesis dari mineral alam karena mudah terbentuk dan dapat diidentifikasi dengan baik adalah zeolit ANA. Zeolit ini tergolong sebagai zeolit silika rendah, dengan rasio Si/Al berada pada rentang 1,8-2,8. Rumus molekul zeolit ANA adalah $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dengan rongga yang ditempati oleh ion Na^+ yang dapat dipertukarkan dengan kation lain. Zeolit ini umumnya terbentuk bersama dengan zeolit CAN, yang juga merupakan zeolit silika rendah dengan rasio Si/Al sekitar 1. Rumus molekul zeolit CAN adalah $\text{Na}_6[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}] \cdot 2\text{NaX} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dimana X dapat berupa anion OH^- , NO_3^- , $1/2\text{CO}_3^{2-}$ atau $1/2\text{SO}_4^{2-}$.

Zeolit ANA dan CAN telah banyak diaplikasikan dalam bidang pengolahan limbah. Zeolit ANA digunakan sebagai adsorben (Salek Gilani et al., 2024), katalis (Azizi et al., 2014), penukar ion (Tangkawanit et al., 2005), serta material untuk pengolahan limbah cair (VMencia et al., 2020). Zeolit CAN efektif sebagai adsorben ion logam Pb, Cu, Zn dan Ni, sebagaimana dilaporkan Esaifan et al. (2019), serta untuk menghilangkan ion nitrat dari air tanah berkat kapasitas tukar kationnya yang tinggi (Abdul-Moneim et al., 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit dengan menggunakan mineral alam yang berasal dari Toraja Utara (Sulawesi Selatan). Mineral alam Toraja Utara telah lama dimanfaatkan oleh masyarakat setempat, baik secara langsung maupun setelah melalui aktivasi. Efendy dan Netti Herawati (2016) menggunakan mineral alam Toraja untuk menurunkan kadar ion Ca^{2+} pada sumber air. Kartawa & Kusumah (2006) juga melaporkan bahwa mineral alam Toraja Utara digunakan dalam bidang perikanan (budi daya udang), pertanian, penyerapan limbah, dan bidang industri lainnya. Di sisi lain, pemanfaatan mineral alam Toraja sebagai bahan baku untuk sintesis zeolit melalui pendekatan transformasi dan rekristalisasi masih jarang dilaporkan. Uji pendahuluan menunjukkan bahwa mineral alam Toraja Utara memiliki kandungan montmorillonit, sejumlah kuarsa dan feldspar. Ketiga komponen tersebut mengandung silika dan alumina yang dapat digunakan sebagai bahan baku alternatif untuk sintesis zeolit.

Sintesis zeolit dalam penelitian ini dilakukan dengan metode hidrotermal, pendekatan *direct synthesis*, tanpa menggunakan templat organik dalam prekursor zeolit. Metode ini terbilang mudah, singkat dan ramah lingkungan dengan ditiadakannya templat organik yang harus dihilangkan setelah proses sintesis. Sintesis ini disebut rekristalisasi zeolit alam (Amin et al., 2023). Karakteristik dari zeolit yang telah disintesis dapat dikaji dengan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan *Scanning Electron Microscope Energy Dispersive*



Selain itu, gugus fungsi dalam unit fungsional zeolit dapat menggunakan spektrofotometer *Fourier Transform Infra Red* (FTIR) untuk analisis. Porositas zeolit, luas permukaan spesifik dan distribusi ukuran pori dapat dihitung menggunakan Surface Area Analyzer (SAA) dengan metode Brunauer-Emmett-Joyner-Halenda (BJH).

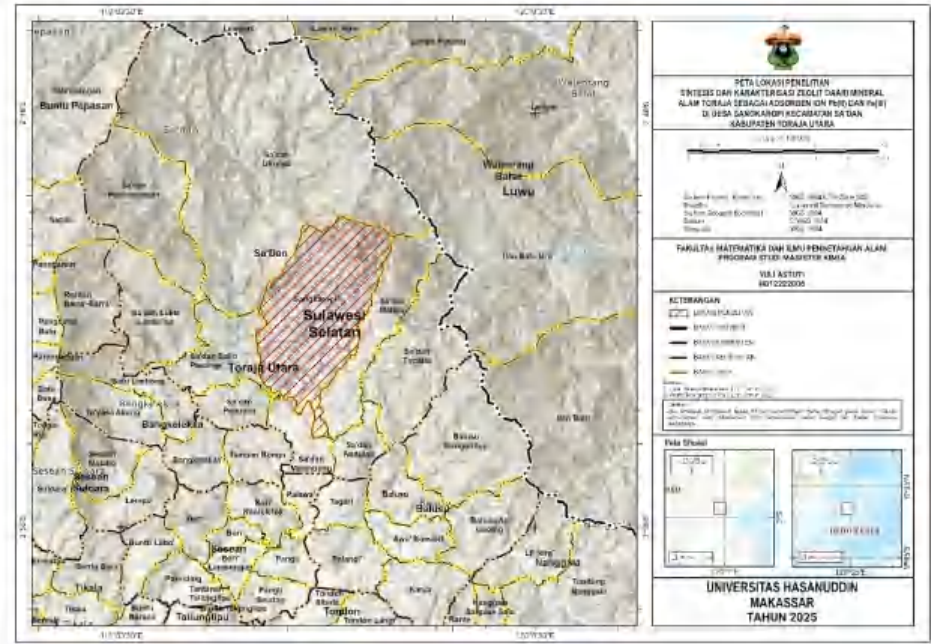
2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus-Desember 2024. Pengambilan sampel mineral alam dilakukan di Desa Sangkaropi, Kecamatan Sada'an, Kabupaten Toraja Utara, Sulawesi Selatan (**Gambar 2.1**). Preparasi sampel dilakukan di Laboratorium Kimia Fisika FMIPA, Laboratorium Analisis dan Pengolahan Bahan Galian Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

2.3.2 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah mineral alam dari Toraja Utara. Sampel mineral alam diperoleh melalui kerja sama dengan ahli pertambangan yang melakukan pengambilan sampel di Desa Sangkaropi, Kecamatan Sa'dan, Kabupaten Toraja Utara, Sulawesi Selatan. Mineral alam tersebut merupakan batuan breksi gunung api bawah laut yang bersifat basa-intermediet dan telah mengalami proses alterasi. NaOH pa (kemurnian 99%, Merck), akuabides (*OneMed*), kertas saring *Whatmann* No. 42, kertas pH universal, tissu, kertas label, aluminium foil, dan masker.



okasi pengambilan sampel mineral alam Toraja Utara

kan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas yang umum
ca analitik (Ohaus), *jaw crusher*, botol vial, botol semprot,
autoklaf, pompa vakum, penyaring Buchner, dan desikator.

2.3.4 Prosedur Kerja

2.3.4.1 Preparasi Mineral Alam Toraja Utara

Sampel mineral alam dibersihkan, dikeringkan dan dihaluskan dengan menggunakan *jaw crusher* dan diayak dengan saringan 100 dan 200 mesh. Sampel yang lolos ayakan 100 mesh dan tidak lolos ayakan 200 mesh digunakan dalam penelitian ini. Selanjutnya, mineral alam yang diperoleh dikarakterisasi kandungannya menggunakan XRF, XRD dan FTIR sebagai uji awal (Yulianis et al., 2017).

2.3.4.2 Sintesis Zeolit dari Mineral Alam Toraja Utara

Sintesis zeolit melalui prinsip rekristalisasi mineral alam dilakukan dengan variasi konsentrasi NaOH dan waktu reaksi. Konsentrasi NaOH divariasikan pada 1,2 M, 2,5 M, dan 5 M dengan waktu reaksi 72 jam. Selain itu, percobaan juga dilakukan pada konsentrasi NaOH 2 M, 3 M, dan 5 M dengan waktu reaksi 24 jam. Khusus untuk konsentrasi NaOH 5 M, reaksi diulangi dengan waktu 12 jam untuk evaluasi lebih lanjut. Proses sintesis dilakukan dengan menggunakan metode hidrotermal. Ilustrasi prosedur sintesis zeolit ditunjukkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2. 2 Prosedur sintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara

Larutan NaOH disiapkan dengan menambahkan 18 g air ke dalam 0,8585 g NaOH (1,2 M). Selanjutnya, 0,7543 g sampel mineral alam (4% dari total massa NaOH dan akuabides) ditambahkan ke dalam larutan NaOH. Campuran diaduk



nudian dimasukkan ke dalam autoklaf, ditutup rapat, dan tanur pada 170 °C selama 72 jam. Setelah proses an hasil reaksi difiltrasi menggunakan pompa vakum, gan akuabides hingga pH filtrat mendekati netral. Padatan utnya dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 24 dilakukan dengan mengikuti prosedur yang sama, namun ineral alam disesuaikan dengan variasi konsentrasi yang

telah ditentukan sebelumnya. Produk akhir yang dihasilkan kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD, FTIR, SEM-EDX dan SAA.

2.3.4.3 Karakterisasi

Komposisi kimia sampel diidentifikasi menggunakan XRF dengan instrumen EDX-720, yang menganalisis unsur-unsur Si, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Zn, Al dan Rh. Pola XRD dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-X (Simadzu XRD-700). Pengambilan data dilakukan pada rentang 2θ antara 5° hingga 70° , menggunakan kecepatan pemindaian 2° per menit dengan sumber radiasi Cu-K α . Identifikasi fasa dilakukan dengan membandingkan pola difraksi terhadap database ICDD, serta dengan bantuan file IZA (zeolite database), Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS) dan referensi dari jurnal terkait. Spektra FTIR dikumpulkan menggunakan shimadzu IRSPIRIT-T dengan QATR-S pada rentang $4000\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ menggunakan KBr sebagai pengencer dan pengikat. Morfologi sampel dikarakterisasi menggunakan mikroskop elektron pemindaian (SEM-EDX-SU-3500). Analisis SEM memberikan informasi visual mengenai bentuk dan tekstur material, sedangkan EDX digunakan untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang terkandung dalam sampel. Selanjutnya isoterm adsorpsi-desorpsi nitrogen diperoleh pada suhu $77,35\text{ K}$ dengan adsorbat N_2 , menggunakan instrumen Altamira micro200. Luas permukaan spesifik juga ditentukan menggunakan metode Brunauer-Emmett-Teller (BET), sedangkan distribusi ukuran pori dianalisis dengan metode Barret-Joyner-Halenda (BJH).

2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Preparasi dan Karakterisasi Mineral Alam Toraja Utara

Preparasi sampel mineral alam Toraja Utara dilakukan untuk memperoleh fraksi partikel dengan ukuran yang seragam dan sesuai untuk sintesis zeolit. Sampel diayak secara bertingkat menggunakan ayakan 100 dan 200 mesh. Sampel yang digunakan dalam proses sintesis merupakan fraksi yang lolos dari ayakan 100 mesh namun tertahan pada ayakan 200 Mesh. Ukuran ini dianggap ideal dalam mendukung efisiensi reaksi selama proses sintesis. Sampel mineral alam Toraja Utara sebelum dan setelah dipreparasi ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.

Evaluasi kelayakan sampel mineral alam Toraja Utara sebagai prekursor dalam sintesis zeolit dilakukan melalui karakterisasi komposisi kimia menggunakan XRF, sebagaimana disajikan pada **Tabel 2.1**. Hasil analisis mineral alam Toraja Utara mengandung SiO_2 dan Al_2O_3 sama dengan rasio Si/Al 1,33, yang diklasifikasikan sebagai ini menunjukkan potensi terbentuknya zeolit dengan at yang kaya Al (Liu et al., 2015). Zeolit dengan karakteristik kapasitas tukar kation yang tinggi dan kemampuan adsorpsi stabilitas termalnya cenderung lebih rendah dibandingkan memiliki rasio Si/Al tinggi (Wang et al., 2024).





Gambar 2.1. Mineral alam Toraja Utara, a) sebelum preparasi b) setelah preparasi

Tabel 2. 1 Komposisi senyawa mineral alam Toraja Utara

Oksida logam	Kadar (%)
SiO ₂	56.55
Al ₂ O ₃	37.39
K ₂ O	2.50
Fe ₂ O ₃	1.97
CaO	1.20
TiO ₂	0.30
MnO	0.05
V ₂ O ₅	0.02
ZnO	0.01

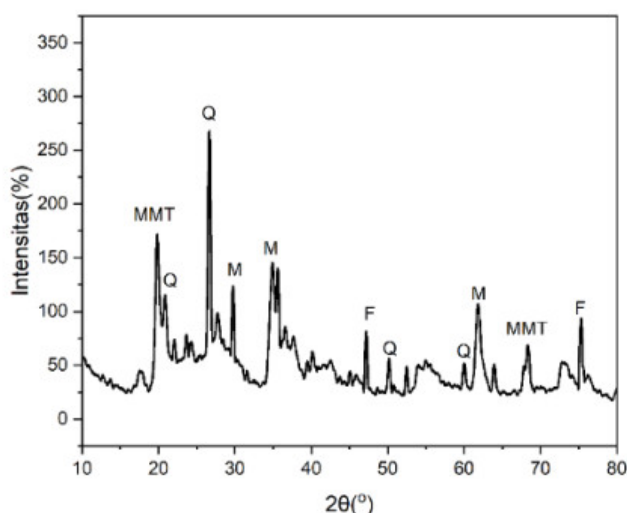
Karakterisasi lanjutan terhadap mineral alam Toraja Utara dilakukan menggunakan XRD untuk mengetahui struktur kristal dan fasa mineral yang terkandung dalam sampel. Pola XRD menunjukkan bahwa mineral ini merupakan material bersifat kristalin, sebagaimana disajikan pada **Gambar 2.2.** sifat kristalin tersebut diidentifikasi dengan munculnya puncak-puncak intens pada sudut $2\theta = 19,49^\circ, 20,97^\circ, 26,53^\circ, 29,46^\circ, 35,04^\circ, 47,35^\circ, 50,00^\circ, 59,97^\circ, 62,31^\circ, 68,47^\circ,$ dan $74,93^\circ$. Estimasi persentase fasa mineral dilakukan secara semi-kuantitatif menggunakan metode *reference intensity ratio* pada perangkat lunak Match, dengan acuan basis data PDF (ICDD). Hasil analisis menunjukkan bahwa



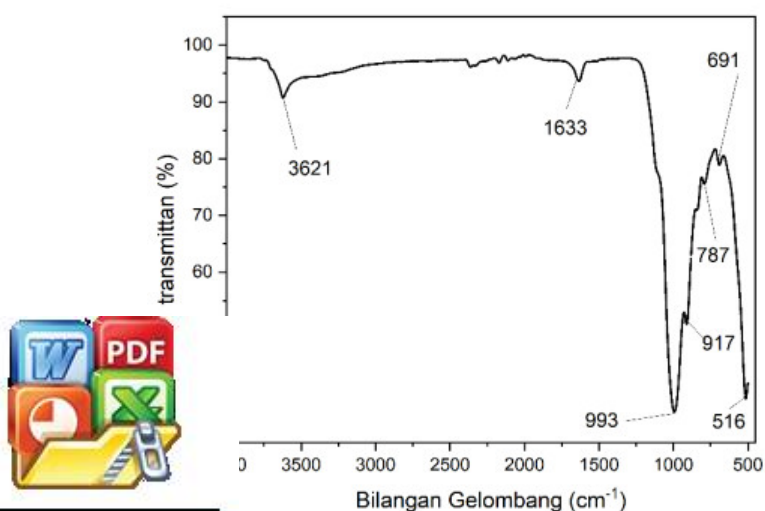
sitas tinggi diasosiasikan dengan montmorilonit (ICDD 13-arsa (ICDD 46-1045) 30,3%, sedangkan puncak dengan h mengindikasikan jejak mineral feldspar (ICDD 01-0083) ICDD 00-0551) 13,0%.

nontmorilonit, feldspar, dan kuarsa merupakan bagian dari aluminosilikat, ditandai oleh keberadaan kerangka kristalin

yang tersusun atas ikatan Si-O dan Al-O. Keberadaan kerangka tersebut dikonfirmasi oleh hasil analisis FTIR sebagaimana ditunjukkan pada **Gambar 2.3**. Pita serapan pada 3621 dan 1633 cm^{-1} merepresentasikan vibrasi ulur dan tekuk dari gugus O-H, yang berasal dari molekul air yang terperangkap dalam kisi kristal (Al Kausor et al., 2022). Pita serapan di sekitar 993 cm^{-1} dikaitkan dengan vibrasi ulur asimetris dari ikatan Si-O-Si, sedangkan pita pada 917 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi tekut Al-O-Al. Selain itu, vibrasi pada 516 cm^{-1} sesuai dengan vibrasi tekut Al-O-Si, yang semakin menguatkan indikasi struktur aluminosilikat dalam sampel mineral alam Toraja Utara (Danková et al., 2014).

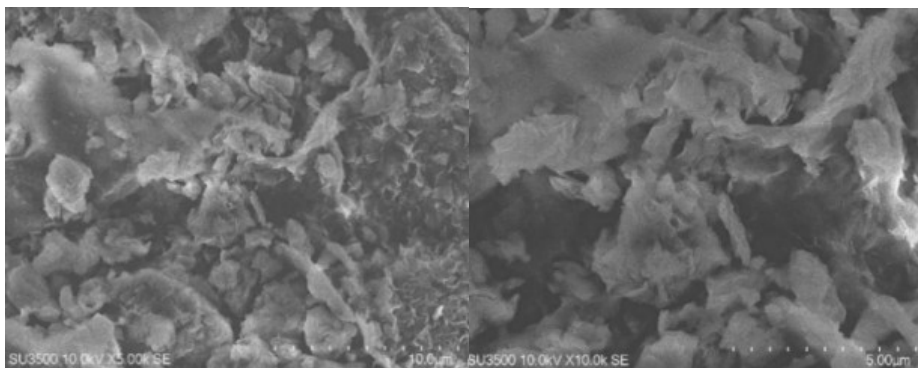


Gambar 2.2 Pola XRD mineral alam Toraja Utara



2. 3 Spektra FTIR mineral alam Toraja Utara

Keberadaan mineral aluminosilikat dengan fasa utama montmorillonit juga dikonfirmasi oleh hasil analisis SEM mineral alam Toraja Utara seperti pada **Gambar 2.4**. Hasil analisis menunjukkan morfologi partikel mineral alam Toraja Utara yang berbentuk lembaran dan menunjukkan ciri khas mineral montmorillonit berupa lembaran silika tetrahedral dan oktahedral (Chellapandi and Madhumitha, 2022). Secara keseluruhan, hasil karakterisasi XRF, XRD, dan FTIR mengonfirmasi bahwa mineral alam Toraja Utara merupakan material aluminosilikat. Mineral ini terdiri atas beberapa fasa, dimana montmorillonit sebagai fasa utama. Hasil tersebut kemudian dikonfirmasi oleh hasil analisis SEM yang menunjukkan morfologi dominan montmorillonit. Berdasarkan karakterisasi tersebut, mineral alam Toraja Utara berpotensi digunakan sebagai bahan baku sintesis zeolit, sehingga nilai pemanfaatannya dapat ditingkatkan melalui proses lebih lanjut.



Gambar 2. 4 SEM mineral alam Toraja Utara

2.4.2 Sintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara

Prosedur sintesis zeolit dilakukan melalui metode hidrotermal dengan menggunakan mineral alam Toraja Utara sebagai prekursor utama dan NaOH sebagai agen mineralisasi. Mineral alam Toraja Utara yang telah dibersihkan dan dihaluskan, digunakan secara langsung tanpa melalui tahap aktivasi maupun kalsinasi. Selain itu, tidak dilakukan penambahan bahan aluminosilikat komersial karena kandungan total SiO_2 dan Al_2O_3 mineral alam Toraja Utara mencapai 93,94%. Nilai ini dianggap telah memenuhi kriteria sebagai bahan baku untuk sintesis zeolit.



Sintesis hidrotermal dilakukan pada suhu 170 °C dengan variasi waktu reaksi. Konsentrasi NaOH yang digunakan meliputi 1,2 M, 2 M, dan 3 M, dipilih berdasarkan penelitian sebelumnya. Amin et al. (2019) melakukan sintesis zeolit dari mineral alam Mesawa pada rentang suhu 120-180 °C dengan konsentrasi NaOH rendah, sedang dan tinggi. Selain itu, digunakan konsentrasi NaOH yang berbeda untuk mengeksplorasi konsentrasi optimum kemungkinan untuk sintesis zeolit dengan fasa tunggal.

Waktu reaksi yang diterapkan adalah 72 jam, berdasarkan hasil dari penelitian Amin et al (2023). Sebagai pembanding, digunakan waktu 24 dan 12 jam, untuk mengevaluasi efisiensi waktu terhadap hasil sintesis. Penggunaan waktu ini merujuk pada penelitian sebelumnya oleh Wang et al.(2024) yang berhasil mensintesis zeolit CAN dari limbah batubara dalam waktu 24 jam, serta oleh Christidis and Papantoni (2008) yang mensintesis zeolit faujasit-Y dari perlit dengan waktu reaksi 6–12 jam.

Evaluasi hasil sintesis dilakukan dengan menghitung rendemen berdasarkan perbandingan massa produk akhir terhadap total massa prekursor padat yang digunakan, yaitu total massa mineral alam Toraja Utara dan NaOH. Rendemen yang diperoleh dalam seluruh kondisi reaksi tergolong sedang, menunjukkan bahwa proses sintesis berlangsung cukup efisien. Pada kondisi sintesis dengan konsentrasi NaOH 5 M, variasi waktu reaksi menunjukkan pengaruh terhadap nilai rendemen hasil sintesis. Semakin singkat waktu reaksi, semakin menurun nilai rendemen yang diperoleh. Misalnya, pada waktu reaksi 12 jam, nilai rendemen lebih rendah dibandingkan dengan kondisi reaksi lainnya. Fenomena ini diperkirakan terjadi akibat waktu reaksi yang terlalu singkat, sehingga proses sintesis tidak berlangsung secara optimal. Rincian kondisi eksperimental untuk sintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara disajikan pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Kondisi eksperimental untuk sintesis zeolit dari mineral alam Toraja Utara

NaOH (mol/L)	Kondisi hidrotermal		Tipe mineral	Rendemen (%)	Kristalinitas (%)
	t (°C)	t (h)			
1,2	170	72	ANA	63,30	58,86
2,0	170	24	ANA, NHI, CAN	69,18	72,31
2,5	170	72	CAN, NHI	67,51	70,04
3,0	170	24	CAN, NHI	64,48	77,82
5,0	170	72	CAN	73,71	74,98
5,0	170	24	CAN	68,33	70,94
5,0	170	12	CAN	62,95	68,87

Jenis atau fasa zeolit yang terbentuk dari proses sintesis ditentukan berdasarkan hasil analisis XRD. Pada konsentrasi NaOH 1,2 M, teridentifikasi fasa zeolit ANA, yang umum terbentuk pada kondisi basa rendah (Ma et al., 2011). Ketika konsentrasi NaOH dinaikkan menjadi 2,0 M, terbentuk tiga fasa zeolit, yaitu *pheline hydrate* (NHI) dan CAN. Peningkatan konsentrasi NaOH menjadi 2,5 M dan 3,0 M menghasilkan dua fasa zeolit, CAN dan NHI. Penelitian ini menunjukkan bahwa NHI cenderung terbentuk apabila konsentrasi NaOH rendah, sedangkan CAN lebih cenderung terbentuk pada konsentrasi NaOH yang lebih tinggi, yaitu 5 M, produk akhir sintesis adalah fasa CAN. Hasil ini sesuai dengan laporan Buhl (1991),



yang menyatakan bahwa zeolit CAN terbentuk pada kondisi basa yang tinggi. Berdasarkan hasil sintesis, menunjukkan bahwa konsentrasi NaOH memiliki peran penting dalam disintegrasi mineral bahan baku dan pembentukan zeolit. Peningkatan konsentrasi NaOH mengubah fasa kristal zeolit dari ANA ke NHI kemudian ke CAN.

Kristalinitas relatif dihitung berdasarkan data XRD dengan membandingkan intensitas puncak utama zeolit hasil sintesis terhadap puncak standar dari zeolit yang terbentuk. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa zeolit ANA memiliki kristalinitas relatif lebih rendah dibandingkan dengan CAN. Sementara itu, pada sampel dengan fasa campuran, kristalinitas relatif berada dalam kategori baik, setelah penjumlahan intensitas puncak dari masing-masing fasa yang terbentuk.

Seluruh variasi kondisi sintesis, baik pada perbedaan konsentrasi maupun waktu reaksi, menunjukkan keberadaan fasa kristalin tanpa indikasi keberadaan fasa amorf. Hal ini mengindikasikan bahwa proses sintesis zeolit berjalan cukup efektif, bahkan pada waktu reaksi yang singkat yaitu 12 jam. Namun, pada waktu reaksi tersebut masih terdeteksi puncak dari fasa awal (prekursor), yang menunjukkan bahwa sebagian bahan baku belum sepenuhnya larut atau bereaksi. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian Novembre and Gimeno (2021), yang menunjukkan bahwa peningkatan waktu reaksi berkontribusi terhadap eliminasi fasa prekursor dalam sintesis zeolit berbasis kaolinit.

Fenomena terbentuknya fasa amorf merupakan hal umum yang dijumpai pada sintesis konvensional menggunakan bahan alam sebagai sumber silika dan alumina. Hal ini disebabkan oleh kompleksitas komposisi kimia bahan alam, yang mengandung berbagai mineral pengotor dan oksida logam. Alih-alih membentuk struktur zeolit yang teratur, beberapa komponen tersebut cenderung membentuk fasa amorf seperti gel silikat atau oksida logam amorf. Keberadaan fasa amorf ini dapat menghambat pembentukan pori dan menurunkan luas permukaan spesifik zeolit (Asgar Pour et al., 2023).

Struktur kristal ANA meliputi kisi silika alumina, rongga, kation, dan saluran yang tidak teratur (Shen et al., 2014). Kisi silika alumina terdiri atas cincin 4, 6 dan 8 yang membentuk rantai (**Gambar 2.3a**). Ruang kosong atau rongga terbentuk di titik pertemuan rantai tersebut dan menjadi tempat ion natrium (Na^+) dan molekul air berada. Struktur ini memberikan zeolit ANA porositas sedang dengan ukuran saluran dan rongga yang relatif kecil dan tidak teratur. Keberadaan kation Na^+ dalam rongga meningkatkan kemampuan pertukaran ion, meskipun kapasitas tukar kationnya lebih rendah dibandingkan dengan struktur saluran lebih terbuka. Zeolit ANA memiliki struktur kubik atau tetragonal yang

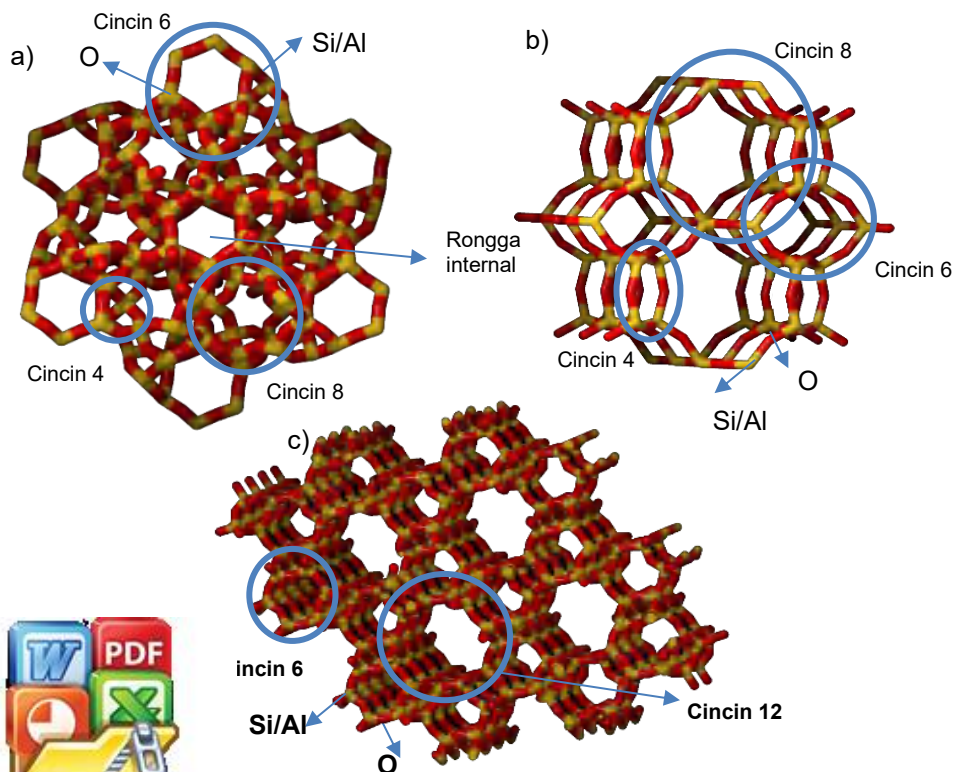


i atom Si dan Al dalam kerangka dianggap setara dengan rak (Gatta and Wells, 2009; Slaby, 1999). Hal tersebut ANA memiliki homogenitas struktural yang tinggi, sehingga tabilan termal dan kimiawinya.

ada pada struktur zeolit CAN, dengan karakteristik berupa yang terbentuk dari susunan cincin tertahedral beranggota m pola ABAB (**Gambar 2.3c**). Lapisan cincin beranggota

enam yang berdekatan dihubungkan dengan cincin beranggota empat membentuk sangkar ϵ (satuan bangunan komposit khas dari CAN). Susunan ini menghasilkan saluran kontinyu yang terdiri atas cincin beranggota dua belas. Saluran tersebut berdimensi bebas dan memiliki diameter pori efektif yang memungkinkan difusi molekul berukuran menengah hingga besar. Rongga dalam struktur CAN dapat terisi oleh berbagai ion dan molekul, seperti karbonat (CO_3^{2-}), natrium (Na^+), kalsium (Ca^{2+}), klorida (Cl^-), serta molekul H_2O (Hassan, 2006). Keberadaan ion karbonat sebagai spesies anorganik penyalur muatan merupakan karakteristik khas zeolit CAN dan turut mempengaruhi kestabilan struktur internalnya. Saluran yang besar dan terbuka dalam struktur ini juga meningkatkan kemampuan zeolit CAN untuk berinteraksi dengan molekul polar dan ion logam, baik melalui mekanisme pertukaran ion maupun adsorpsi.

Sebagaimana telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, dalam tahapan transformasi pembentukan zeolit ANA dan CAN, terdapat fasa antara berupa zeolit NHI yang memiliki kerangka mirip dengan CAN, namun dengan konfigurasi saluran ion yang berbeda (**Gambar 2.3b**). Struktur aluminosilikat NHI tersusun atas cincin beranggota 4, 6, dan 8 yang saling terhubung membentuk kerangka zeolit tiga dimensi (Hansen and Fálth, 1982).



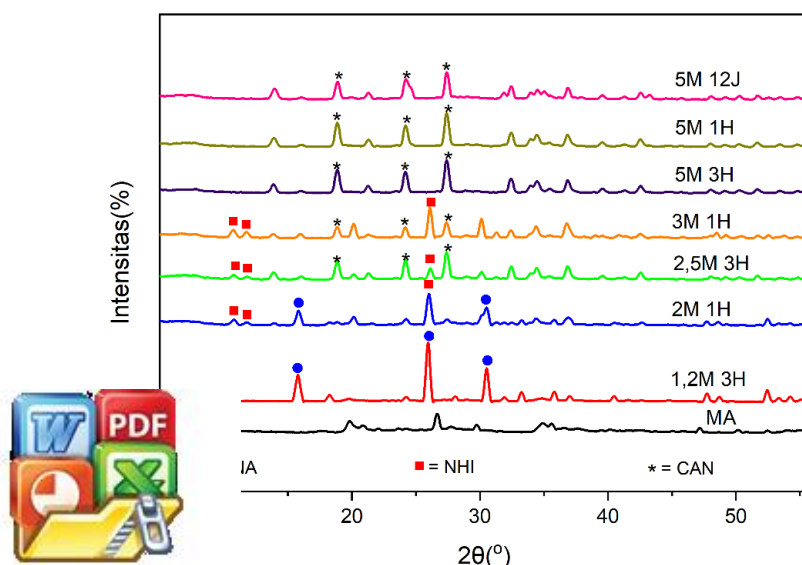
Struktur kerangka zeolit a) ANA, b) NHI, dan c) CAN (IZA structure, 2017)



Zeolit NHI memiliki sistem pori dua dimensi dengan dua jenis saluran. Saluran pertama, yang berukuran lebih besar, dibentuk oleh cincin beranggota 8 dan memungkinkan difusi ion atau molekul kecil secara efisien ke dalam dan ke luar struktur zeolit. Sementara itu, saluran kedua yang lebih kecil dibentuk oleh cincin beranggota 6 dan memiliki bukaan sempit, sehingga membatasi pergerakan molekul berukuran besar dan memberikan efek selektivitas terhadap spesies tertentu. Molekul air dalam struktur NHI umumnya terlokalisasi pada saluran berukuran besar, yang menyebabkan zeolit ini memiliki sifat reversibilitas air yang tinggi. Karakteristik tersebut memberikan keunggulan fungsional pada zeolit NHI, khususnya dalam aplikasi yang melibatkan proses dehidrasi atau adsorpsi selektif terhadap molekul polar.

2.4.3 Karakterisasi zeolit sintesis dari mineral alam Toraja Utara

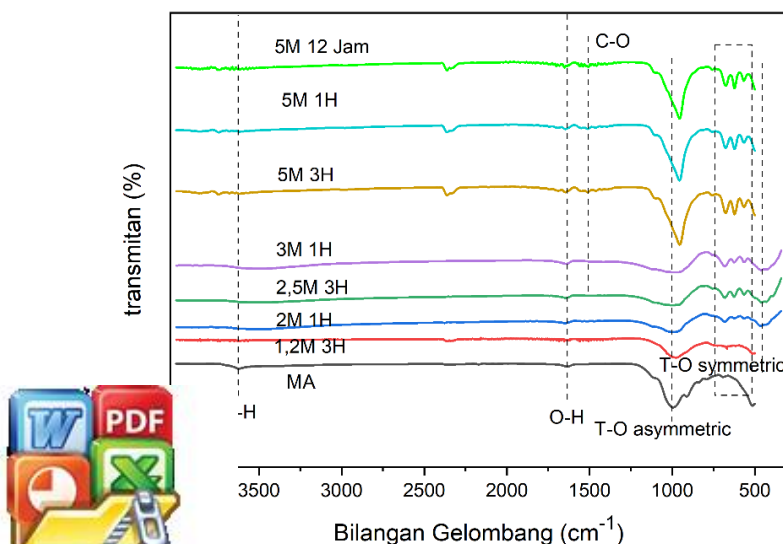
Pola XRD zeolit hasil sintesis ditunjukkan pada **Gambar 2.6**, yang mana pola difraksi mineral alam Toraja Utara mengalami perubahan signifikan setelah proses sintesis dengan penambahan NaOH. Pada sintesis dengan konsentrasi NaOH 1,2 M menunjukkan puncak difraksi khas zeolit ANA pada $2\theta = 15,98^\circ$; $25,94^\circ$; dan $30,72^\circ$. Pola ini sesuai dengan hasil yang laporkan Azizi et al. (2014) dan Zhou et al. (2024). Pada sintesis dengan konsentrasi NaOH 2,5 M, puncak karakteristik ANA tidak terdeteksi lagi. Namun muncul puncak pada $2\theta = 10,81^\circ$; $11,79^\circ$; dan $30,15^\circ$, mengindikasikan kehadiran fasa zeolit NHI (Treacy et al., 2001). Selain itu, terdeteksi pula puncak pada $2\theta = 18,86^\circ$; $24,24^\circ$; dan $27,42^\circ$, yang sesuai dengan fasa CAN seperti dilaporkan oleh Aloui et al. (2023). Pada konsentrasi NaOH 5 M, hanya puncak khas CAN yang terdeteksi, menunjukkan bahwa sintesis pada kondisi ini menghasilkan fasa CAN tunggal.



Sintesis pada konsentrasi NaOH 5 M, dilakukan variasi waktu reaksi 24 dan 12 jam untuk melihat pengaruhnya terhadap fasa zeolit yang terbentuk. Hasil XRD menunjukkan bahwa kedua kondisi waktu reaksi menghasilkan fasa yang sama dengan sintesis sebelumnya, yaitu zeolit CAN. Namun, intensitas puncak difraksi mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu reaksi, yang mengindikasikan peningkatan derajat kristalinitas (**Tabel 2.2**). Pada waktu reaksi 12 jam, masih terdeteksi puncak sekunder dari fasa magnetit pada $2\theta = 35^\circ$, sedangkan pada waktu reaksi 24 dan 72 jam puncak tersebut tidak lagi teramati. Berdasarkan pertimbangan efisiensi waktu dan kualitas kristalinitas, waktu reaksi 24 jam dipilih sebagai kondisi optimum untuk sintesis lanjutan.

Zeolit ANA dan CAN telah diperoleh dengan fasa tunggal. Oleh karena itu, dilakukan upaya untuk memperoleh fasa tunggal NHI melalui sintesis lanjutan dengan konsentrasi NaOH 2 M dan 3 M dengan waktu reaksi 24 jam. Hasil XRD menunjukkan bahwa pada konsentrasi 2 M masih terdeteksi tiga jenis fasa zeolit, yaitu ANA, NHI, dan CAN. Pada konsentrasi 3 M terdapat dua fasa yang teridentifikasi, yakni NHI dan CAN. Dengan demikian, fasa NHI tunggal belum berhasil diperoleh dalam sintesis yang telah dilakukan dalam penelitian ini.

Spektra FTIR zeolit sintesis diberikan pada **Gambar 2.7**. Hasil analisis menunjukkan ciri khas material aluminosilikat, yang mendukung temuan sebelumnya dari analisis XRD mengenai terbentuknya fasa zeolit ANA dan CAN. Pita serapan pada 3600 cm^{-1} dan 1630 cm^{-1} dikaitkan dengan gugus O-H dari kandungan air pada kerangka zeolit. Sedangkan pita spektrum pada daerah 950 adalah vibrasi ulur asimetris tetrahedron T-O (T=Al, Si) dan spektra 720-650 cm^{-1} menunjukkan vibrasi ulur simetris T-O. Selanjutnya, pita di sekitar 460 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi tekuk T-O-T (Ma et al., 2015; Novembre and Gimeno, 2021).



um FTIR sampel yang disintesis dari mineral alam Toraja Utara dengan berbagai konsentrasi

Zeolit ANA memiliki karakteristik spektrum pada daerah di bawah 650 cm^{-1} yang berkaitan dengan vibrasi cincin ganda pada kerangkanya (Abdelrahman et al., 2020; Kwakye-Awuah et al., 2008). Pada kelompok CAN, daerah $700\text{--}500\text{ cm}^{-1}$ dicirikan oleh pita triplet (676 , 622 dan 565 cm^{-1}) yang mencerminkan vibrasi ulur Si-O-Al yang berkorelasi dengan parameter unit sel (Teng et al., 2022). Selain itu, karakteristik zeolit CAN juga dapat dilihat dengan munculnya vibrasi C-O dengan intensitas lemah di daerah 1393 , 1425 , dan 1462 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya ion CO_3^{2-} (Seo et al., 2018). Ion ini dapat ditemukan dalam pori zeolit CAN yang diperoleh dari konsentrasi NaOH yang tinggi. Selanjutnya, karakteristik NHI muncul dengan pita serapan di daerah 3200 sampai 3500 cm^{-1} yang menandakan keberadaan air pada strukturnya (Simakin et al., 2008). NHI adalah fasa perantara dalam sintesis CAN yang hadir sebagai pengotor (Seo et al., 2018).

Gambar 2.8. menunjukkan citra SEM sampel yang disintesis pada berbagai konsentrasi NaOH (waktu kristalisasi 72 jam, suhu $170\text{ }^{\circ}\text{C}$). **Gambar 2.8a.** menampilkan zeolit ANA yang berhasil disintesis pada konsentrasi NaOH $1,2\text{ M}$, dengan morfologi kristal trapesium isometrik. Kristal yang diamati memiliki panjang maksimum rata-rata $24\text{ }\mu\text{m}$. Morfologi ini sesuai dengan laporan Novembre & Gimeno (2021) yang mengamati bentuk kristal trapezohedral ANA dengan ukuran sekitar $25\text{ }\mu\text{m}$. Hasil serupa juga diperoleh oleh Amin et al. (2023), yang mensintesis ANA dari feldspar Mesawa dengan ukuran kristal berkisar antara $13\text{--}24\text{ }\mu\text{m}$. Kristal ANA hasil sintesis menunjukkan bentuk yang relatif terdefinisi dengan baik, namun masih tampak keberadaan sejumlah pengotor dalam struktur. Pengotor ini diduga berasal dari sisa montmorilonit atau silika gel yang tidak larut sempurna akibat rendahnya konsentrasi NaOH, sehingga sebagian bahan baku tidak bereaksi sepenuhnya. Hal tersebut menyebabkan kristalinitas ANA yang diperoleh relatif rendah.

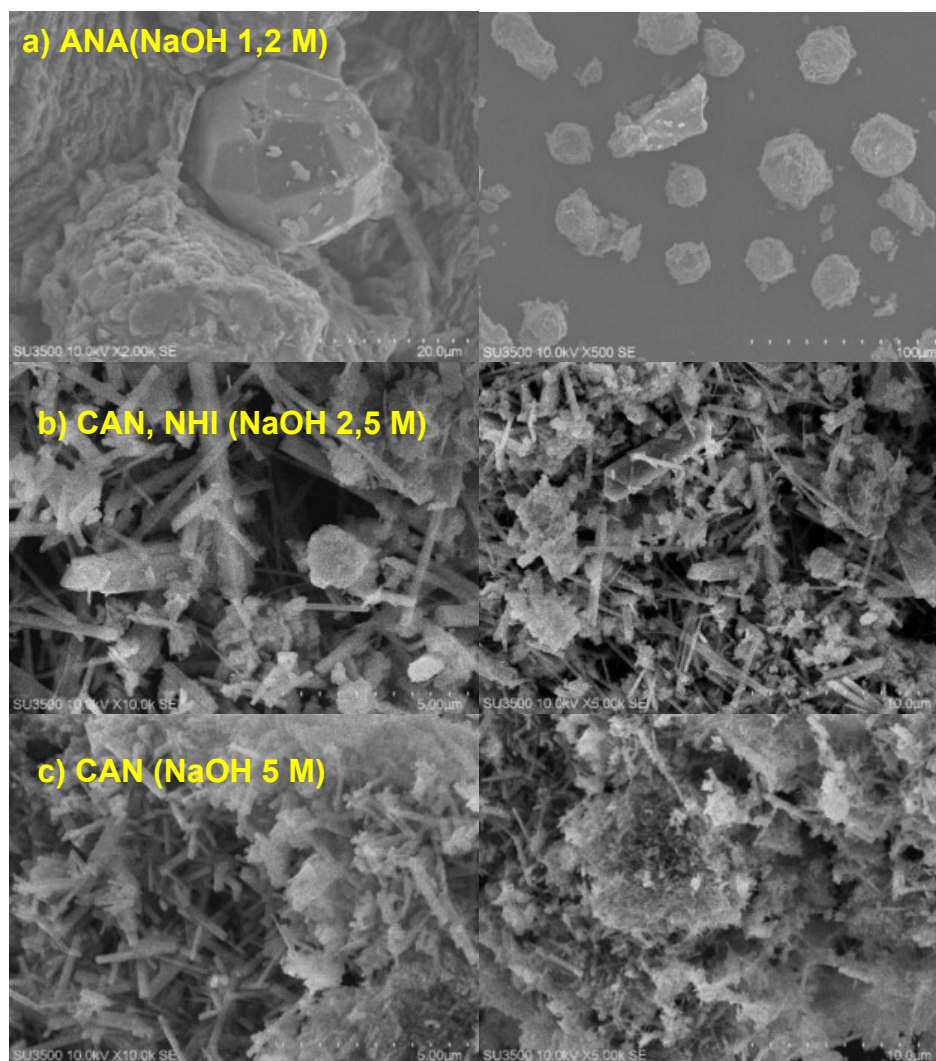
Gambar 2.8b. menunjukkan morfologi zeolit hasil sintesis pada konsentrasi NaOH $2,5\text{ M}$, yang terdiri atas fasa campuran CAN dan NHI. Kristal CAN berbentuk batang menyerupai jarum, sesuai dengan karakteristik morfologi kristal heksagonal CAN yang dilaporkan oleh Passos et al. (2017). Selain itu, teridentifikasi pula kristal berbentuk batang lain yang berukuran lebih pendek dan lebih besar, yang diatribusikan sebagai fasa NHI berdasarkan laporan Rouchalová et al. (2024). Citra SEM tersebut menguatkan temuan XRD, yang menunjukkan koeksistensi fasa CAN dan NHI pada kondisi sintesis tersebut. Keberadaan dua tipe kristal yang berbeda mendukung interpretasi bahwa meskipun reaksi berjalan dengan baik dan seluruh bahan baku terlarut, sintesis



NaOH $2,5\text{ M}$ belum menghasilkan fasa tunggal. Namun kristal yang terdefinisi dengan baik menunjukkan bahwa masing-masing fasa cukup tinggi, selaras dengan intensitas diamati pada pola XRD.

memperlihatkan morfologi zeolit hasil sintesis pada $2,5\text{ M}$, yang terdiri atas fasa CAN. Citra SEM menunjukkan berbentuk batang (*needle-like*) yang seragam, dengan

panjang rata-rata sekitar 1,66 μm . Keceragaman bentuk kristal ini mendukung hasil XRD yang menunjukkan keberadaan tunggal fasa CAN, serta mengindikasikan tingkat kristalinitas yang tinggi. Namun demikian, teramati adanya aglomerasi antar kristal, yang menyebabkan sebagian kristal saling menempel dan sulit diamati.



hasil SEM zeolit yang disintesis dari mineral alam Toraja dengan perbesaran yang berbeda

hasil analisis EDX (**Tabel 2.3**), rasio Si/Al zeolit yang entensi NaOH 1,2 M adalah 2,40. Nilai ini berada dalam untuk ANA, yaitu 1,95–2,80, sebagaimana dilaporkan oleh Sementara itu, rasio Si/Al zeolit yang disintesis pada

konsentrasi 5 M adalah 1,27, sesuai dengan karakteristik zeolit CAN yang umumnya memiliki rasio Si/Al mendekati 1 (Joseph et al., 2022; Seo et al., 2018). Hasil ini mendukung identifikasi fasa kristal analisis XRD yang menyatakan terbentuknya fasa ANA dan CAN. Hasil analisis EDX juga menunjukkan rasio Na/Al yang merupakan salah satu parameter penting dalam sintesis zeolit. Pada sampel yang disintesis dengan NaOH 1,2 M, rasio Na/Al tercatat lebih rendah dari nilai optimal yang berada di sekitar 1,0 (Jiménez et al., 2021). Hal ini berkontribusi terhadap kristalinitas fasa ANA yang rendah serta adanya pengotor yang teridentifikasi melalui XRD dan SEM. Sebaliknya, pada konsentrasi NaOH 5 M, rasio Na/Al berada dalam kisaran optimal 1,0–1,5 (Teng et al., 2022), menghasilkan fasa CAN tunggal dengan morfologi batang yang terdefinisi dengan baik.

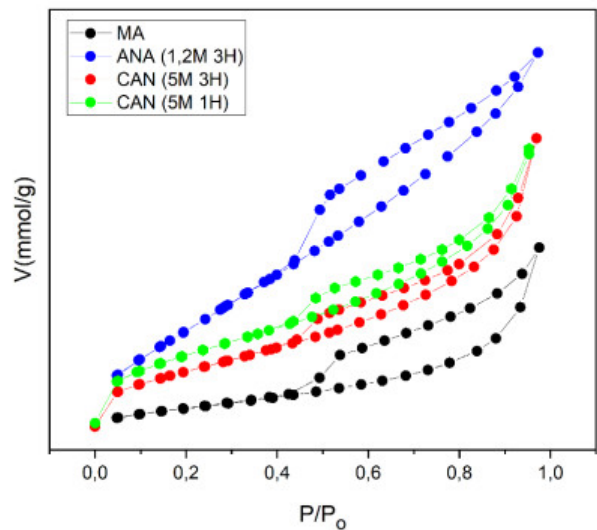
Tabel 2.3 Analisis EDX zeolit yang disintesis dari mineral alam Toraja Utara

Komponen	Atomic %		
	ANA (NaOH 1,2M)	CAN dengan NHI (NaOH 2,5 M)	CAN (NaOH 5M)
O	62,78	56,45	55,87
Na	5,86	14,4	15,29
Al	9,21	12,39	12,72
Si	22,15	16,76	16,13
Si/Al	2,40	1,35	1,27
Na/Al	0,64	1,16	1,20

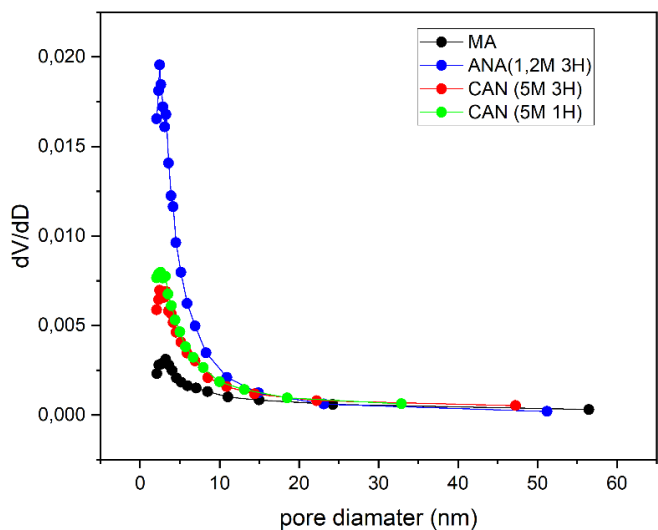
Salah satu karakterisasi dalam evaluasi zeolit adalah analisis isoterm adsorpsi-desorpsi, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 2.9**. Berdasarkan hasil analisis ini, mineral alam Toraja Utara, ANA (NaOH 1,2 M), CAN (NaOH 5 M, 72 jam) dan CAN (NaOH 5 M, 24 jam) menunjukkan isoterm adsorpsi tipe IV, yang merupakan karakteristik bahan mesopori (Esaifan et al., 2019; Mannu et al., 2019). Zeolit ANA dan CAN menunjukkan loop histeresis tipe H1, yang mengindikasikan bentuk pori yang seragam. Namun, histeresis zeolit ANA juga sedikit mendekati tipe H4 (Lestari et al., 2018), yang menunjukkan kombinasi pori mesopori dan mikropori dengan ujung terbuka.

Karakteristik mesopori mineral alam Toraja Utara serta zeolit ANA dan CAN yang diperoleh dikonfirmasi oleh analisis distribusi ukuran pori menggunakan metode Barrett-Joyner-Halenda (BJH) yang ditampilkan pada **Gambar 2.10**. Hasil analisis BJH mengonfirmasi material tersebut tergolong aluminosilikat mesopori (2–50 nm). Luas permukaan BET dari masing-masing material disajikan pada **Tabel 2.4**. Analisis luas permukaan dan pori, diketahui bahwa sintesis di Toraja Utara menghasilkan peningkatan luas permukaan zeolit ANA menunjukkan luas permukaan BET lebih tinggi dari zeolit CAN. Namun, zeolit CAN memiliki distribusi ukuran pori yang rata-rata diameter pori yang lebih besar.





Gambar 2. 9 Isoterm N₂ adsorpsi-desorpsi zeolit yang disintesis dari mineral alam Toraja Utara



Gambar 2. 10 Distribusi pori zeolit yang disintesis dari mineral alam Toraja Utara



lengan hasil analisis XRD, FTIR, dan SEM, zeolit CAN yang is pada konsentrasi NaOH 5M menunjukkan kristalinitas fologi kristal batang yang terdefinisi dengan baik, serta fasa tor, sehingga dinilai lebih unggul untuk aplikasi lanjutan. kuat oleh analisis EDX yang menunjukkan rasio Si/Al yang sesuai dengan karakteristik zeolit CAN. Zeolit dengan rasio

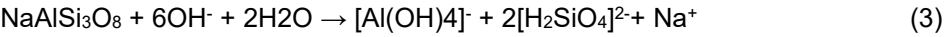
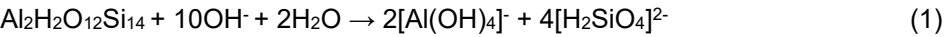
Si/Al rendah cenderung memiliki kemampuan pertukaran ion yang tinggi dan lebih hidrofilik, sehingga sangat potensial digunakan sebagai adsorben ion logam berat dalam aplikasi lingkungan (Seo et al., 2018; Teng et al., 2022).

Tabel 2.4 Luas Permukaan dan Porositas zeolit ANA and CAN

Material	Luas permukaan BET (m ² /g)	Volume total pori (cc/g)	Rata-rata ukuran pori (nm)
MA	22,05	0,05	8,67
ANA (1,2M)	75,49	0,19	4,97
CAN (5M 3H)	43,03	0,07	6,84
CAN (5M 1H)	51,97	0,07	5,38

Konversi mineral alam Toraja Utara menjadi zeolit melibatkan pelarutan montmorilonit, kuarsa, dan feldspar, diikuti dengan kristalisasi zeolit, sebagaimana dijelaskan dalam persamaan reaksi kimia (1–5). Amaya et al. (1999) melaporkan bahwa montmorilonit mengalami pelarutan silikon yang signifikan dalam kondisi basa. Sementara itu, pelarutan feldspar berlangsung dalam tiga tahap utama: (1) penukaran ion antara kation logam alkali (M⁺, dengan M = K, Na, atau Ca) dan H⁺, (2) pemutusan ikatan Al–O, dan (3) hidrolisis ikatan Si–O–Si, yang menghasilkan pelepasan M⁺, Al(OH)₄[−], dan H₂SiO₄^{2−} (Ma et al., 2015). Pada konsentrasi alkali rendah, ketersediaan spesies terlarut Al(OH)₄[−] dan H₂SiO₄^{2−} terbatas, sehingga mendukung pembentukan zeolit ANA yang stabil. Sebaliknya, pada konsentrasi alkali lebih tinggi, laju pelarutan mineral meningkat, menghasilkan konsentrasi Al(OH)₄[−] dan H₂SiO₄^{2−} yang lebih tinggi dalam larutan (Osacký et al., 2020). Selain itu, kelebihan ion OH[−] dapat bereaksi dengan CO₂ di udara membentuk ion CO₃^{2−} (Liu et al., 2007). Pada kondisi ini, kerangka zeolit cenderung mengakomodasi anion berukuran lebih besar seperti CO₃^{2−} dan OH[−], sehingga memfasilitasi kristalisasi zeolit tipe CAN. Zeolit ini diketahui mampu menampung anion-anion tersebut dalam salurannya (Wernert et al., 2020).

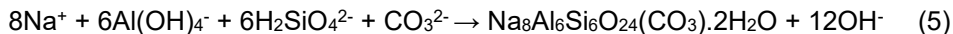
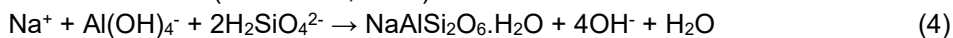
Pelarutan mineral (Ma et al., 2015)



di atmosfer dengan larutan NaOH konsentrasi tinggi



Kristalisasi zeolit (Amin et al., 2023)



2.5 Kesimpulan

Mineral alam Toraja Utara mengandung montmorillonit, feldspar, dan kuarsa, yang dikenal sebagai mineral aluminosilikat sehingga cocok untuk digunakan sebagai bahan baku dalam sintesis zeolit. Zeolit ANA dan CAN berhasil disintesis dari mineral alam Toraja Utara dengan menggunakan larutan alkali dengan konsentrasi berturut-turut 1,2 M dan 5 M. Zeolit ANA dan CAN yang diperoleh memiliki rendemen berturut-turut 63,30% dan 73,71%. Desain sintesis zeolit dapat dikendalikan melalui pemilihan konsentrasi alkali dan waktu reaksi yang sesuai. Zeolit ANA menunjukkan morfologi trapezohedral dengan kristal homogen serta luas permukaan 75,49 m²/g, sedangkan zeolit CAN memiliki morfologi batang dengan luas permukaan 43,03 m²/g. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mineral alam Toraja Utara mengandung unit pembangun sekunder zeolit berupa cincin 4, 6, dan 8.

2.6 Daftar Pustaka

Abdelrahman, E.A., Alharbi, A., Subaihi, A., Hameed, A.M., Almutairi, M.A., Algethami, F.K., Yousef, H.M., 2020. Facile fabrication of novel analcime/sodium aluminum silicate hydrate and zeolite Y/faujasite mesoporous nanocomposites for efficient removal of Cu(II) and Pb(II) ions from aqueous media. *J. Mater. Res. Technol.*, 9(4), 7900–7914.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.052>

Abdul-Moneim, Mohamed, Seham O. Farghaly, Abdelmoneim, A.A.G., 2018. Synthesis, Characterization and Application of Cancrinite in Ground Water Treatment from Wadi El-Assiuti Area, Assiut-Egypt. *Assiut Univ. Bull. Environ. Res.*, 21(1), 23–40. <https://doi.org/10.21608/auber.2018.133200>

Al Kausor, M., Sen Gupta, S., Bhattacharyya, K.G., Chakraborty, D., 2022. Montmorillonite and modified montmorillonite as adsorbents for removal of water soluble organic dyes: A review on current status of the art. *Inorg. Chem. Commun.*, 143(109686), 1-23.
<https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.109686>

Aloui, L., Mezghich, S., Mansour, L., Hraiech, S., Ayari, F., 2023. Swift Removal of the Heavy Metals Cadmium and Lead from an Aqueous Solution by a CAN-Zeolite Synthesized from Natural Clay. *ChemEngineering*, 7(6), 1-17.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering7060113>



Y., M., Fujihara, H., Yokoyama, K., 1999. Reaction of in Alkaline Solution at 60°C, 90°C, 120°C and 180°C. *MRS* 662. <https://doi.org/10.1557/PROC-556-655>

A.W., Mukti, R.R., Taba, P., 2023. Synthesis and of zeolite type ANA and CAN framework by hydrothermal

- method of Mesawa natural plagioclase feldspar. *Appl. Nanosci.*, 13(8), 5389–5398. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02756-4>
- Azizi, S.N., Ghasemi, S., Gilani, N.S., 2014. An electrode with Ni(II) loaded analcime zeolite catalyst for the electrooxidation of methanol. *Chinese J. Catal.*, 35(3), 383–390. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(14\)60002-4](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(14)60002-4)
- Buhl, J.-C., 2005. Synthesis, hydrothermal stability and thermal reaction behavior of nepheline hydrate i (NH I). *React. Kinet. Catal. Lett.*, 84(2), 375–382. <https://doi.org/10.1007/s11144-005-0232-3>
- Buhl, J.C., 1991. Synthesis and characterization of the basic and non-basic members of the cancrinite-natrodavynite family. *Thermochim. Acta*, 178, 19–31. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(91\)80294-S](https://doi.org/10.1016/0040-6031(91)80294-S)
- Castillo, J.M., Silvestre-Albero, J., Rodriguez-Reinoso, F., Vlugt, T.J.H., Calero, S., 2013. Water adsorption in hydrophilic zeolites: experiment and simulation. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 15, 17374–17382. <https://doi.org/10.1039/c3cp52910j>
- Chellapandi, T., Madhumitha, G., 2022. Montmorillonite clay-based heterogenous catalyst for the synthesis of nitrogen heterocycle organic moieties: a review. *Mol. Divers.*, 26(4), 2311–2339. <https://doi.org/10.1007/s11030-021-10322-3>
- Christidis, G.E., Papantoni, H., 2008. Synthesis of FAU Type Zeolite Y from Natural Raw Materials: Hydrothermal SiO₂-Sinter and Perlite Glass. *Open Mineral. J.*, 2, 1–5. <https://doi.org/10.2174/1874456700802010001>
- Danková, Z., Mockovčiaková, A., Dolinská, S., 2014. Influence of ultrasound irradiation on cadmium cations adsorption by montmorillonite. *Desalin. Water Treat.*, 52(28-30), 5462–5469. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.814006>
- Efendy, A.Z., Netti Herawati, A., 2016. Penurunan Ca²⁺ pada Air Sumber Mata Air Citta Kabupaten Soppeng dengan Menggunakan Zeolit Alam Toraja (Zeolit Mordenit). *J. Chem.*, 17(1), 44-49.
- Esaifan, M., Warr, L.N., Grathoff, G., Meyer, T., Schafmeister, M.T., Kruth, A., Testrich, H., 2019. Synthesis of Hydroxy-Sodalite/Cancrinite Zeolites from Calcite-Bearing Kaolin for the Removal of Heavy Metal Ions in Aqueous Media. *Minerals*, 9(8), 1-13. <https://doi.org/10.3390/min9080484>
- Gatta, G.D.S., Wells, S.A., 2009. Compression behaviour and flexibility window of the analcime-like feldspathoids: experimental and theoretical findings. *21(3)*, 571–580. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2009/0021-1923>
- T., Shim, J., Choi, J.-W., Suh, D.J., Lee, H., Yoo, C., Baik, Ha, J.-M., 2023. Na₂WO₄/Mn supported on all-silica zeolite for the optimal oxidative coupling of methane via the activation of tetrahedral WO₄: Elucidating effects of support different crystal structures, Al-addition, and morphologies.



- Chem. Eng. J., 457(141057), 1-12.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141057>
- Hansen, S., Fälth, L., 1982. X-ray study of the nepheline hydrate I structure. *Zeolites*, 2(3), 162–166. [https://doi.org/10.1016/S0144-2449\(82\)80046-8](https://doi.org/10.1016/S0144-2449(82)80046-8)
- Hassan, I., 2006. Cancrinite: Crystal structure, phase transitions, and dehydration behavior with temperature. *Am. Mineral.*, 91(7), 1117–1124.
<https://doi.org/10.2138/am.2006.2013>
- Jha, B., Singh, D.N., 2012. ChemInform Abstract: A Review on Synthesis, Characterization and Industrial Applications of Flyash Zeolites. *ChemInform*, 43(25), 1-69. <https://doi.org/10.1002/chin.201225227>
- Jiang, N., Shang, R., Heijman, S.G.J., Rietveld, L.C., 2018. High-silica zeolites for adsorption of organic micro-pollutants in water treatment: A review. *Water Res.*, 144, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.017>
- Jiménez, A., Misol, A., Morato, Á., Rives, V., Vicente, M.A., Gil, A., 2021. Synthesis of pollucite and analcime zeolites by recovering aluminum from a saline slag. *J. Clean. Prod.* 297(126667), 1-8.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126667>
- Joseph, I. V., Doyle, A.M., Amedlous, A., Mintova, S., Tosheva, L., 2022. Scalable solvent-free synthesis of aggregated nanosized single-phase cancrinite zeolite. *Mater. Today Commun.*, 32(103879), 1-6.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103879>
- Joseph, I. V., Tosheva, L., Miller, G., Doyle, A.M., 2021. FAU-Type Zeolite Synthesis from Clays and Its Use for the Simultaneous Adsorption of Five Divalent Metals from Aqueous Solutions. *Materials (Basel)*, 14(13), 1-15.
<https://doi.org/10.3390/ma14133738>
- Kartawa, W., Kusumah, K.D., 2006. Potensi Zeolit di Daerah Sangkaropi-Mendila, Tana Toraja, Sulawesi Selatan. *J. Geol. dan Sumberd. Miner.*, 16(6), 371–386.
- Ke, G., Shen, H., Yang, P., 2019. Synthesis of X-Zeolite from Waste Basalt Powder and its Influencing Factors and Synthesis Mechanism. *Materials (Basel)*, 12(23), 1-14. <https://doi.org/10.3390/ma12233895>
- Kwakyé-Awuah, B., Radecka, I., Kenward, M.A., Williams, C.D., 2008. Production of silver-doped analcime by isomorphous substitution technique. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 83(9), 1255–1260.
<https://doi.org/10.1002/jctb.1938>
- Lestari, W.W., Hasanah, D.N., Putra, R., Mukti, R.R., Nugrahaningtyas, K.D., 2018. Transformation of Indonesian Natural Zeolite into Analcime Phase under Normal Condition. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, 349, 1-7.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/349/1/012068>
- Wang, W., Yu, J., 2023. Regulation of the Si/Al ratios and Al in zeolites and their impact on properties. *Chem. Sci.*, 14(8), 1-10.
<https://doi.org/10.1039/D2SC06010H>
- Wang, W., Li, T., Yue, Y., Bao, X., 2015. From natural



- aluminosilicate minerals to zeolites: synthesis of ZSM-5 from rectorites activated via different methods. *Appl. Clay Sci.*, 115, 201–211.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.07.040>
- Liu, Q., Navrotsky, A., Jove-Colon, C.F., Bonhomme, F., 2007. Energetics of cancrinite: Effect of salt inclusion. *Microporous Mesoporous Mater.*, 98, 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2006.09.008>
- Ma, X., Yang, J., Ma, H., Liu, C., Zhang, P., 2015. Synthesis and characterization of analcime using quartz syenite powder by alkali-hydrothermal treatment. *Microporous Mesoporous Mater.*, 201, 134–140.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.09.019>
- Mannu, A., Vlachopoulou, G., Sireus, V., Mulas, G., Petretto, G.L., 2019. Characterization of Sardinian Bentonite. *J. Sci. Res.*, 11(1), 145–150.
<https://doi.org/10.3329/jsr.v11i1.36900>
- Mencía, R.V.V., Goiti, E., Ocejó, M., Giménez, R.G., 2020. Synthesis of zeolite type analcime from industrial wastes. *Microporous Mesoporous Mater.*, 293, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109817>
- Ngapa, Y.D., Sugiarti, S., Abidin, Z., 2018. Hydrothermal Transformation of Natural Zeolite from Ende-NTT and Its Application as Adsorbent of Cationic Dye. *Indones. J. Chem.*, 16(2), 138-143. <https://doi.org/10.22146/ijc.21156>
- Novembre, D., Gimeno, D., 2021. Synthesis and characterization of analcime (ANA) zeolite using a kaolinitic rock. *Sci. Rep.*, 11(1), 1-19.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-92862-0>
- Osacký, M., Pálková, H., Hudec, P., Czímerová, A., Galusková, D., Vítková, M., 2020. Effect of alkaline synthesis conditions on mineralogy, chemistry and surface properties of phillipsite, P and X zeolitic materials prepared from fine powdered perlite by-product. *Microporous Mesoporous Mater.*, 294, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2019.109852>
- Outram, J.G., Collins, F.J., Millar, G.J., Couperthwaite, S.J., Beer, G., 2023. Process optimisation of low silica zeolite synthesis from spodumene leachate residue. *Chem. Eng. Res. Des.* 189, 358–370.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2022.11.015>
- Passos, F.A.C.M., Castro, D.C., Ferreira, K.K., Simões, K.M.A., Bertolino, L.C., Barbato, C.N., Garrido, F.M.S., Felix, A.A.S., Silva, F.A.N.G., 2017. Synthesis and Characterization of Sodalite and Cancrinite from Kaolin, in: *Minerals, Metals and Materials Series*. pp. 279–288.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-51382-9_31
- Prajaputra, V., Abidin, Z., Widiatmaka, Suryaningtyas, D.T., Rizal, H., 2019. Synthesis of Na-P1 zeolite synthesized from pumice as low-cost adsorbent and its ability for methylene blue adsorption. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 19(1), 1-7.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012014>
- Štichalová, D., Čablík, V., Matýšek, D., 2024. Microwave-hydrothermal Synthesis of Pure-Phase Sodalite (>99 wt.%) in Batch Mode by Response Surface Methodology Design and Verification. *Materials (Basel)*, 17(1),



1-23. <https://doi.org/10.3390/ma17010269>

Salek Gilani, N., Ehsani Tilami, S., Azizi, S.N., 2024. Synthesized analcime zeolite: an effective adsorbent for removal of Pb(II) ions from aqueous solution. *Inorg. Nano-Metal Chem.*, 54(8), 804–812.

<https://doi.org/10.1080/24701556.2022.2078350>

Salmón, I., Cambier, N., Luis, P., 2018. CO₂ Capture by Alkaline Solution for Carbonate Production: A Comparison between a Packed Column and a Membrane Contactor. *Appl. Sci.*, 8(6), 1-15.

<https://doi.org/10.3390/app8060996>

Seo, S.M., Kim, Daniel, Kim, Daeyoung, Kim, J.-H., Lee, Y.J., Roh, K.-M., Kang, I.-M., 2018. A simple synthesis of nitrate cancrinite from natural bentonite. *J. Porous Mater.*, 25(6), 1561–1565.

<https://doi.org/10.1007/s10934-018-0569-4>

Shen, Y., Zhao, P., Shao, Q., 2014. Porous silica and carbon derived materials from rice husk pyrolysis char. *Microporous Mesoporous Mater.*, 188, 46–76.

<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.01.005>

Simakin, A.G., Salova, T.P., Zavel'skii, V.O., 2008. Incorporation of water in the structure of nepheline from the data of NMR and IR spectrometry. *Geochemistry Int.*, 46(6), 622–626.

<https://doi.org/10.1134/S0016702908060086>

Slaby, E., 1999. Indicative significance of water environment in zeolitic structure—a study using experimentally grown cancrinite and analcime. *Acta Geol. Pol.*, 49(1), 25–65.

Tangkawanit, S., Rangsriwatananon, K., Dyer, A., 2005. Ion exchange of Cu²⁺, Ni²⁺, Pb²⁺ and Zn²⁺ in analcime (ANA) synthesized from Thai perlite. *Microporous Mesoporous Mater.*, 79(1-3), 171–175.

<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.10.040>

Teng, L., Jin, X., Bu, Y., Ma, J., Liu, Q., Yang, J., Liu, W., Yao, L., 2022. Facile and fast synthesis of cancrinite-type zeolite from coal fly ash by a novel hot stuffy route. *J. Environ. Chem. Eng.*, 10(5), 1-7.

<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108369>

Treacy, M.M.J., Higgins, J.B., Higgins, John B., 2001. Nepheline Hydrate, in: *Collection of Simulated XRD Powder Patterns for Zeolites*. Elsevier, pp. 192–193. <https://doi.org/10.1016/B978-044450702-0/50094-0>

Wernert, V., Schaef, O., Aloui, L., Chassigneux, C., Ayari, F., Ben Hassen Chehimi, D., Denoyel, R., 2020. Cancrinite synthesis from natural kaolinite by high pressure hydrothermal method: Application to the removal of Cd²⁺ water. *Microporous Mesoporous Mater.*, 301, 1-9.

<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110209>



M., Muhammad, S., 2017. Adsorpsi Ion Logam Tembaga Nano Zeolit Alam yang Diaktivasi. *J. Litbang Ind.*, 7(1), <https://doi.org/10.24960/jli.v7i1.2694.61-69>

Shi, H., Qiang, J., Dong, H., Liu, H., 2024. Hydrothermal analcime from Construction Waste Bricks and Its Adsorption

Mechanism for Pb^{2+} . Water, Air, Soil Pollut. 235(186), 1-15.

<https://doi.org/10.1007/s11270-024-06995-9>

Zhu, S., Cui, H., Jia, Y., Zhu, X., Tong, H., Ma, L., 2020. Occurrence, composition, and origin of analcime in sedimentary rocks of non-marine petroliferous basins in China. Mar. Pet. Geol., 113, 1-37.

<https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2019.104164>



Optimized using
trial version
www.balesio.com



Optimized using
trial version
www.balesio.com