Trends Research of Environmental Studies
Vol. 2 No. 1, June 2026, pp. 32-43
E-ISSN 3110-2085

Sintesis Zeolit dari Abu Terbang Batubara untuk Penjerapan Amonium pada Air Limbah Peternakan

Rafin Mahendra*[a,1], Lalu Auliya Akraboe Littaqwa[b,2], Muhsinun[c,3]
[a]Program Studi Teknik Kimia, Universitas Mulawarman, Indonesia
[b]Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Nahdlatul Ulama Nusa Tenggara Barat, Indonesia
[c]Program Studi Ilmu Gizi, Universitas Nahdlatul Ulama Nusa Tenggara Barat, Indonesia
*Corresponding author : rafinmahendra5@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history
Received: 30 may 2026
Revised: 18 June 2026
Accepted: 1 July 2026
Published: 5 July 2026

Keywords
Abu terbang Batubara
Adsobsi ammonium
Air limbah peternakan
Sintesis zeolit
Zeolite NaA

License by CC-BY-SA
Copyright © 2025, The Author(s).

ABSTRACT

Pencemaran amonium pada air limbah peternakan merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang memerlukan teknologi pengolahan yang efektif dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit dari abu terbang batubara menggunakan metode alkali fusion-hidrotermal dan mengevaluasi kinerjanya dalam menjerap amonium pada air limbah peternakan. Abu terbang direaksikan dengan NaOH pada suhu 550°C selama 1 jam dan dikristalisasi secara hidrotermal pada suhu 100°C selama 24 jam untuk menghasilkan zeolit tipe NaA. Hasil karakterisasi menunjukkan peningkatan kapasitas tukar kation dari 38,6 menjadi 176,4 meq/100 g setelah proses sintesis. Pengujian adsorpsi dilakukan menggunakan variasi dosis adsorben 1–8 g/L, waktu kontak 15–120 menit, dan konsentrasi awal amonium 25–200 mg/L. Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan amonium meningkat dari 52,8% pada dosis 1 g/L menjadi 91,7% pada dosis 8 g/L. Kondisi optimum diperoleh pada dosis adsorben 8 g/L dan waktu kontak 120 menit dengan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 31,84 mg/g. Analisis isoterm menunjukkan bahwa adsorpsi mengikuti model Langmuir dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,987, sedangkan model kinetika pseudo-second-order memberikan kecocokan terbaik dengan nilai R^2 sebesar 0,992. Pengujian kolom kontinu menghasilkan efisiensi penyisihan rata-rata 93,4% sebelum mencapai titik breakthrough. Uji regenerasi menunjukkan bahwa zeolit masih mempertahankan 84,6% kapasitas adsorpsinya setelah lima siklus penggunaan. Hasil penelitian membuktikan bahwa zeolit berbasis abu terbang batubara memiliki kemampuan tinggi dalam menjerap amonium dan berpotensi diterapkan sebagai adsorben berbiaya rendah untuk pengolahan air limbah peternakan secara berkelanjutan.

How to cite: Mahendra, R, Littaqwa, L.A.A, & Muhsinun. (2026). Sintesis Zeolit dari Abu Terbang Batubara untuk Penjerapan Amonium pada Air Limbah Peternakan, *Vol.2*(No.1), 32-42. doi: https://doi.org/10.70716/tres.v2i1.709

PENDAHULUAN

Peningkatan aktivitas peternakan dalam beberapa dekade terakhir telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap penyediaan pangan, terutama dalam memenuhi kebutuhan protein hewani masyarakat. Namun, di balik manfaat tersebut, sektor peternakan juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Air limbah peternakan umumnya mengandung berbagai senyawa organik dan anorganik, termasuk nitrogen dalam bentuk amonium (NH4+), nitrit (NO2−), dan nitrat (NO3−). Di antara berbagai bentuk nitrogen tersebut, amonium merupakan salah satu parameter yang sering ditemukan dalam konsentrasi tinggi pada limbah peternakan karena berasal dari proses dekomposisi urin, feses, serta sisa pakan ternak. Keberadaan amonium dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas air, meningkatkan kebutuhan oksigen dalam perairan, serta memicu eutrofikasi yang berdampak pada terganggunya keseimbangan ekosistem akuatik (Gao et al., 2018; Tang et al., 2020).

Pencemaran amonium pada badan air menjadi perhatian global karena berhubungan langsung dengan kesehatan lingkungan dan keberlanjutan sumber daya air. Ketika amonium memasuki perairan, senyawa tersebut dapat mengalami transformasi menjadi amonia bebas yang bersifat toksik bagi organisme akuatik. Selain itu, proses nitrifikasi dan denitrifikasi yang berlangsung secara tidak terkendali dapat meningkatkan beban nitrogen pada lingkungan perairan. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa limbah peternakan merupakan salah satu sumber utama pencemaran nitrogen, terutama pada wilayah yang memiliki kepadatan peternakan tinggi. Gao et al. (2018) melaporkan bahwa limbah peternakan sapi perah mengandung amonium dan fosfat dalam konsentrasi yang cukup tinggi sehingga memerlukan pengolahan yang efektif sebelum

dibuang ke lingkungan. Temuan serupa juga disampaikan oleh Tang et al. (2020) yang menunjukkan bahwa air limbah peternakan babi mengandung amonium dalam jumlah signifikan sehingga berpotensi mencemari sumber air permukaan maupun air tanah apabila tidak diolah secara memadai.

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk mengurangi konsentrasi amonium dalam air limbah, seperti nitrifikasi-denitrifikasi biologis, air stripping, oksidasi kimia, membran filtrasi, dan pertukaran ion. Meskipun demikian, sebagian besar metode tersebut memerlukan biaya investasi dan operasional yang relatif tinggi, penggunaan energi yang besar, serta pengendalian proses yang kompleks. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pengolahan yang sederhana, efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan masih menjadi fokus penelitian di berbagai negara. Salah satu pendekatan yang banyak mendapat perhatian adalah pemanfaatan adsorben berbasis zeolit karena memiliki kapasitas pertukaran kation yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, dan kemampuan selektif terhadap ion amonium (Hu et al., 2007; Jiang et al., 2016).

Zeolit merupakan material aluminosilikat berpori yang tersusun atas kerangka tiga dimensi dari tetrahedra SiO4 dan AlO4. Struktur ini menghasilkan rongga dan saluran mikropori yang memungkinkan terjadinya proses adsorpsi dan pertukaran ion secara efektif. Keunggulan utama zeolit dalam pengolahan air limbah adalah kemampuannya untuk menangkap ion amonium melalui mekanisme pertukaran ion antara NH4+ dengan kation yang terdapat pada struktur zeolit, seperti Na+, K+, dan Ca2+. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa zeolit mampu menghilangkan amonium dari berbagai jenis limbah cair dengan efisiensi yang tinggi. Hu et al. (2007) menunjukkan bahwa zeolit hasil zeolitisasi abu terbang mampu menghilangkan amonium dan fosfat secara simultan dari larutan air. Jiang et al. (2016) juga melaporkan bahwa zeolit NaA yang disintesis dari abu terbang batubara memiliki kemampuan adsorpsi amonium yang sangat baik karena struktur kristalnya yang homogen dan kapasitas pertukaran kation yang tinggi.

Selain menggunakan zeolit alam, berbagai penelitian terbaru berfokus pada pengembangan zeolit sintetis yang dibuat dari limbah industri, terutama abu terbang batubara. Abu terbang merupakan residu padat hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap dan berbagai industri berbasis energi. Produksi abu terbang terus meningkat seiring meningkatnya konsumsi energi berbasis batubara. Permasalahan utama yang muncul adalah sebagian besar abu terbang masih dibuang ke tempat penampungan limbah sehingga berpotensi menimbulkan pencemaran tanah dan air. Di sisi lain, abu terbang memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku utama sintesis zeolit. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi jumlah limbah industri, tetapi juga menghasilkan material bernilai tambah yang dapat digunakan untuk pengolahan lingkungan (Roo et al., 2003; Koshy & Singh, 2016).

Penelitian mengenai sintesis zeolit dari abu terbang telah berkembang secara signifikan selama dua dekade terakhir. Roo et al. (2003) merupakan salah satu peneliti awal yang menunjukkan bahwa abu terbang dapat dikonversi menjadi zeolit dengan karakteristik adsorpsi yang lebih baik dibandingkan material asalnya. Selanjutnya, berbagai metode sintesis dikembangkan untuk meningkatkan kemurnian fase kristal dan kapasitas adsorpsi zeolit yang dihasilkan. Jiang et al. (2016) berhasil mensintesis zeolit NaA murni dari abu terbang melalui metode hidrotermal dan memperoleh material dengan kemampuan adsorpsi amonium yang tinggi. Ren et al. (2019) juga melaporkan keberhasilan sintesis zeolit A fase tunggal menggunakan abu terbang batubara dengan karakteristik kristal yang baik dan struktur pori yang seragam.

Perkembangan teknologi sintesis zeolit tidak hanya berfokus pada peningkatan kualitas material, tetapi juga pada efisiensi proses produksi. Makgabutlane et al. (2020) mengembangkan metode sintesis berbantuan microwave yang mampu mempercepat pembentukan kristal zeolit sekaligus meningkatkan efisiensi adsorpsi amonium dari urin. Ma et al. (2023) melakukan optimasi parameter sintesis dan menemukan bahwa waktu kristalisasi, rasio padatan-cairan, konsentrasi alkali, dan suhu berpengaruh signifikan terhadap kualitas zeolit yang dihasilkan. Liu et al. (2024) kemudian memperkenalkan metode alkali fusion-hidrotermal berbantuan homogenisasi berkecepatan tinggi yang menghasilkan zeolit NaA dengan kapasitas adsorpsi amonia-nitrogen yang sangat baik. Di sisi lain, Cheng et al. (2024) mengembangkan pendekatan green synthesis yang menekankan efisiensi penggunaan bahan kimia serta kemampuan regenerasi adsorben untuk mendukung prinsip keberlanjutan.

Penerapan zeolit sintetis berbasis abu terbang untuk penyisihan amonium telah menunjukkan hasil yang menjanjikan pada berbagai jenis air limbah. Gao et al. (2018) melaporkan bahwa nano-zeolit sintetis mampu menghilangkan sekitar 71% amonium dari limbah peternakan sapi perah dalam waktu kontak yang relatif singkat. Tang et al. (2020) menunjukkan bahwa zeolit sintetis dapat mencapai efisiensi penyisihan

amonium hingga hampir 80% pada limbah peternakan babi. Makgabutlane et al. (2020) memperoleh efisiensi penyisihan amonium hingga 82% menggunakan zeolit berbasis abu terbang yang disintesis dengan bantuan microwave. Sementara itu, Jiang et al. (2024) melaporkan bahwa zeolit molecular sieve yang disintesis dari abu terbang menunjukkan kemampuan adsorpsi amonia-nitrogen yang tinggi dengan mekanisme yang mengikuti model isoterm Langmuir dan kinetika pseudo orde dua.

Selain meningkatkan kapasitas adsorpsi, berbagai penelitian juga mengembangkan modifikasi zeolit untuk memperbaiki kinerja material. Li (2011) memodifikasi zeolit sintetis menggunakan lantanum sehingga mampu meningkatkan penyisihan amonium dan fosfat secara simultan. He et al. (2016) dan He et al. (2017) mengembangkan zeolit Na-P1 berbasis abu terbang yang efektif dalam menyerap nutrien dari air limbah. Zheng et al. (2024) melaporkan bahwa zeolit tipe X/A yang disintesis dari abu terbang memiliki kapasitas adsorpsi tinggi serta stabilitas yang baik selama proses penggunaan berulang. Zhou et al. (2024) menunjukkan bahwa modifikasi menggunakan sodium asetat dapat meningkatkan kemampuan adsorpsi dan desorpsi amonium sehingga membuka peluang regenerasi adsorben yang lebih efektif.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan potensi besar zeolit sintetis berbasis abu terbang, masih terdapat sejumlah kesenjangan penelitian yang perlu mendapat perhatian. Sebagian besar penelitian terdahulu dilakukan menggunakan larutan sintetis atau limbah dengan karakteristik yang relatif sederhana sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aktual air limbah peternakan. Selain itu, fokus penelitian umumnya masih terbatas pada karakterisasi material dan pengujian adsorpsi skala laboratorium dalam sistem batch. Pengujian pada air limbah peternakan aktual yang memiliki kandungan bahan organik, padatan tersuspensi, dan berbagai ion pengganggu masih relatif terbatas (Gao et al., 2018; Tang et al., 2020).

Kesenjangan lainnya berkaitan dengan metode sintesis yang digunakan. Banyak penelitian berfokus pada optimasi kondisi sintesis tanpa menghubungkannya secara langsung dengan performa adsorpsi pada limbah nyata. Padahal, karakteristik fisik dan kimia zeolit sangat dipengaruhi oleh metode sintesis yang diterapkan. Ma et al. (2023) dan Liu et al. (2024) menunjukkan bahwa perubahan parameter sintesis dapat menghasilkan perbedaan yang signifikan pada struktur kristal, luas permukaan, dan kapasitas adsorpsi zeolit. Oleh karena itu, diperlukan penelitian yang mengintegrasikan proses sintesis, karakterisasi material, dan aplikasi pada limbah peternakan aktual dalam satu kerangka penelitian yang komprehensif.

Dari perspektif keberlanjutan, pemanfaatan abu terbang untuk sintesis zeolit juga sejalan dengan konsep ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan kembali limbah sebagai sumber daya. Koshy dan Singh (2016) menegaskan bahwa konversi abu terbang menjadi zeolit merupakan salah satu strategi yang menjanjikan dalam pengelolaan limbah industri sekaligus mendukung pengolahan air limbah. Pendekatan ini semakin relevan karena mampu mengatasi dua permasalahan lingkungan secara bersamaan, yaitu akumulasi abu terbang dan pencemaran amonium dari limbah peternakan. Namun demikian, penelitian yang menggabungkan kedua aspek tersebut secara terintegrasi masih relatif sedikit sehingga diperlukan kajian lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mensintesis zeolit dari abu terbang batubara dan mengkaji kemampuannya dalam menjerap amonium pada air limbah peternakan. Penelitian mencakup proses sintesis zeolit menggunakan pendekatan alkali fusion-hidrotermal, karakterisasi material hasil sintesis, pengujian kemampuan adsorpsi terhadap amonium pada limbah peternakan aktual, serta evaluasi potensi regenerasi adsorben. Kebaruan penelitian terletak pada integrasi pemanfaatan abu terbang sebagai bahan baku zeolit dengan aplikasi langsung pada air limbah peternakan aktual dalam kerangka ekonomi sirkular yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan adsorben berbasis limbah industri serta menyediakan alternatif teknologi yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah peternakan.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode eksperimen laboratorium untuk mengevaluasi sintesis zeolit dari abu terbang batubara dan aplikasinya sebagai adsorben amonium pada air limbah peternakan. Pendekatan eksperimen dipilih karena memungkinkan pengendalian variabel penelitian secara sistematis sehingga hubungan antara kondisi sintesis, karakteristik zeolit, dan kemampuan penjerapan amonium dapat dianalisis secara objektif. Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang saling

terintegrasi, yaitu preparasi bahan baku, sintesis zeolit, karakterisasi material hasil sintesis, pengujian adsorpsi amonium pada sistem batch dan kolom kontinu, pengujian regenerasi adsorben, serta analisis data. Rancangan penelitian disusun dengan mengadaptasi metode sintesis dan pengujian yang telah banyak digunakan dalam penelitian terdahulu mengenai pemanfaatan abu terbang batubara sebagai bahan baku zeolit untuk pengolahan limbah yang mengandung amonium (Jiang et al., 2016; Ma et al., 2023; Liu et al., 2024).

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah abu terbang batubara yang diperoleh dari unit pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara. Abu terbang dipilih karena memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi sehingga berpotensi menjadi prekursor pembentukan zeolit sintetis. Bahan kimia lain yang digunakan meliputi natrium hidroksida (NaOH) sebagai aktivator alkali, akuades sebagai pelarut, natrium klorida (NaCl) untuk proses regenerasi adsorben, serta larutan standar amonium untuk keperluan kalibrasi analisis. Air limbah peternakan diperoleh langsung dari unit peternakan sebagai sampel penelitian yang digunakan untuk menguji kemampuan adsorpsi zeolit terhadap amonium.

Peralatan yang digunakan meliputi furnace untuk proses alkali fusion, reaktor hidrotermal untuk proses kristalisasi zeolit, oven pengering, magnetic stirrer, orbital shaker, pompa peristaltik untuk sistem kolom kontinu, spektrofotometer untuk analisis amonium, pH meter, serta perangkat karakterisasi material berupa X-ray diffraction (XRD), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM), dan X-ray fluorescence (XRF). Pemilihan instrumen tersebut didasarkan pada kebutuhan untuk mengevaluasi karakteristik fisik, kimia, dan mineralogi zeolit hasil sintesis secara komprehensif (Ren et al., 2019; Liu et al., 2024).

Preparasi Abu Terbang Batubara

Tahap awal penelitian dilakukan melalui preparasi abu terbang sebagai bahan baku sintesis zeolit. Abu terbang yang diperoleh dari lokasi pengambilan sampel terlebih dahulu dibersihkan dari material asing seperti serpihan logam, kerikil, dan pengotor lain yang dapat memengaruhi proses sintesis. Selanjutnya, abu terbang dikeringkan menggunakan oven pada suhu 105°C selama 24 jam untuk menghilangkan kandungan air yang masih tersisa pada material. Proses pengeringan bertujuan meningkatkan kestabilan bahan baku dan mencegah terjadinya gangguan selama proses peleburan alkali.

Setelah proses pengeringan selesai, abu terbang dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan berukuran 100 mesh sehingga diperoleh ukuran partikel yang lebih seragam. Homogenitas ukuran partikel penting untuk meningkatkan luas permukaan kontak antara abu terbang dan larutan alkali pada tahap sintesis. Tahap preparasi ini mengacu pada prosedur yang digunakan oleh Ren et al. (2019) dan Roo et al. (2003), yang menunjukkan bahwa ukuran partikel yang lebih kecil dapat meningkatkan reaktivitas silika dan alumina selama pembentukan struktur zeolit.

Karakterisasi Awal Abu Terbang

Sebelum digunakan sebagai bahan baku sintesis, abu terbang dikarakterisasi untuk mengetahui komposisi dan sifat dasarnya. Analisis komposisi kimia dilakukan menggunakan XRF untuk menentukan kandungan oksida utama seperti SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, dan senyawa lainnya. Kandungan silika dan alumina menjadi parameter penting karena kedua komponen tersebut merupakan penyusun utama kerangka aluminosilikat zeolit.

Selain analisis kimia, karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan SEM untuk mengamati bentuk partikel, ukuran butiran, serta tekstur permukaan abu terbang. Informasi ini diperlukan untuk mengevaluasi perubahan struktur material sebelum dan sesudah proses sintesis. Karakterisasi awal juga berfungsi sebagai dasar dalam menjelaskan mekanisme transformasi abu terbang menjadi material zeolit selama proses alkali fusion dan hidrotermal (Koshy & Singh, 2016).

Sintesis Zeolit dari Abu Terbang Batubara

Sintesis zeolit dilakukan menggunakan metode alkali fusion-hidrotermal yang dipilih karena mampu menghasilkan zeolit dengan tingkat kristalinitas tinggi dan kapasitas adsorpsi amonium yang baik. Pada tahap alkali fusion, abu terbang dicampurkan dengan natrium hidroksida padat menggunakan rasio massa tertentu. Campuran kemudian dihomogenkan hingga seluruh bagian material tercampur secara merata.

Campuran abu terbang dan NaOH selanjutnya dipanaskan menggunakan furnace pada suhu 550–600°C selama satu jam. Proses ini bertujuan mengubah fase mineral yang relatif inert menjadi bentuk yang lebih reaktif melalui pemutusan ikatan kristal silikat dan aluminosilikat yang terdapat pada abu terbang.

Transformasi tersebut memungkinkan silika dan alumina lebih mudah larut pada tahap berikutnya sehingga mempercepat pembentukan struktur zeolit (Jiang et al., 2016; Ma et al., 2023).

Produk hasil peleburan alkali didinginkan hingga mencapai suhu ruang, kemudian dicampurkan dengan akuades dan diaduk menggunakan magnetic stirrer hingga terbentuk suspensi homogen. Suspensi tersebut dipindahkan ke dalam reaktor hidrotermal untuk menjalani proses kristalisasi pada suhu 90–100°C selama 12–24 jam. Selama proses hidrotermal berlangsung, spesies silikat dan aluminat yang telah larut mengalami reorganisasi membentuk kerangka kristal zeolit. Proses kristalisasi ini mengacu pada metode yang dikembangkan oleh He et al. (2016), Jiang et al. (2016), dan Liu et al. (2024), yang berhasil menghasilkan zeolit tipe NaA dan Na-P1 dengan karakteristik adsorpsi yang baik.

Setelah proses kristalisasi selesai, material hasil sintesis dicuci berulang kali menggunakan akuades hingga mencapai pH netral untuk menghilangkan residu alkali yang tidak bereaksi. Material kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 12 jam. Zeolit kering yang diperoleh disimpan dalam wadah tertutup sebelum digunakan pada tahap karakterisasi dan pengujian adsorpsi.

Karakterisasi Zeolit Hasil Sintesis

Karakterisasi zeolit dilakukan untuk memastikan keberhasilan sintesis dan mengevaluasi sifat material yang dihasilkan. Identifikasi fase kristal dilakukan menggunakan XRD. Data difraksi yang diperoleh dibandingkan dengan pola standar untuk menentukan jenis zeolit yang terbentuk serta tingkat kristalinitasnya. Pembentukan fase zeolit yang dominan menunjukkan keberhasilan proses sintesis dan berpengaruh langsung terhadap kapasitas adsorpsi amonium (Ren et al., 2019; Zheng et al., 2024).

Karakterisasi gugus fungsi dilakukan menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi ikatan kimia yang terbentuk selama proses sintesis. Spektrum FTIR digunakan untuk mengamati pita serapan yang berkaitan dengan vibrasi Si–O dan Al–O sebagai komponen utama kerangka aluminosilikat zeolit. Selain itu, morfologi permukaan diamati menggunakan SEM untuk mengevaluasi perubahan bentuk kristal, ukuran partikel, dan perkembangan struktur pori dibandingkan dengan abu terbang sebelum sintesis.

Kemampuan pertukaran ion zeolit dievaluasi melalui pengukuran kapasitas tukar kation (CEC). Nilai CEC digunakan sebagai indikator kemampuan material dalam mengadsorpsi ion amonium melalui mekanisme pertukaran ion. Semakin tinggi nilai CEC, semakin besar potensi zeolit untuk menyerap amonium dari air limbah (Hu et al., 2007; Zhou et al., 2024).

Pengambilan dan Karakterisasi Air Limbah Peternakan

Air limbah peternakan digunakan sebagai media pengujian untuk mengevaluasi kemampuan adsorpsi zeolit pada kondisi aktual. Sampel limbah diambil dari saluran penampungan limbah peternakan dan dimasukkan ke dalam wadah polietilen yang bersih. Sampel kemudian disimpan pada suhu 4°C untuk meminimalkan perubahan karakteristik sebelum pengujian dilakukan.

Karakterisasi awal limbah meliputi pengukuran pH, suhu, total padatan tersuspensi, kebutuhan oksigen kimia, dan konsentrasi amonium. Analisis amonium dilakukan menggunakan metode spektrofotometri sesuai standar pengujian kualitas air. Karakterisasi awal bertujuan memperoleh data dasar yang akan digunakan untuk menghitung efisiensi penyisihan amonium setelah perlakuan adsorpsi (Gao et al., 2018; Tang et al., 2020).

Pengujian Adsorpsi Amonium Sistem Batch

Pengujian adsorpsi batch dilakukan untuk menentukan pengaruh dosis adsorben, waktu kontak, dan konsentrasi awal amonium terhadap efisiensi penyisihan. Sejumlah volume tertentu air limbah dimasukkan ke dalam erlenmeyer, kemudian ditambahkan zeolit hasil sintesis sesuai variasi perlakuan yang telah ditentukan.

Variasi dosis adsorben meliputi 1 g/L, 2 g/L, 4 g/L, dan 8 g/L. Variasi waktu kontak terdiri atas 15, 30, 60, dan 120 menit, sedangkan variasi konsentrasi awal amonium berada pada rentang 25–200 mg/L. Campuran diaduk menggunakan orbital shaker pada kecepatan konstan untuk memastikan terjadinya kontak yang merata antara adsorben dan adsorbat. Setelah waktu kontak berakhir, sampel disaring dan filtrat dianalisis untuk menentukan konsentrasi amonium sisa. Pendekatan ini mengacu pada metode yang digunakan oleh Gao et al. (2018), Tang et al. (2020), dan Jiang et al. (2024).

Pengujian Adsorpsi Sistem Kolom Kontinu

Selain sistem batch, penelitian ini juga menguji kinerja zeolit pada sistem kolom kontinu untuk mensimulasikan kondisi operasional yang lebih mendekati penerapan lapangan. Kolom adsorpsi diisi dengan

zeolit hasil sintesis hingga mencapai tinggi media tertentu. Air limbah peternakan dialirkan secara kontinu menggunakan pompa peristaltik dengan kecepatan alir yang terkontrol.

Sampel efluen diambil secara berkala selama proses berlangsung untuk menentukan perubahan konsentrasi amonium. Data tersebut digunakan untuk menyusun kurva breakthrough dan menentukan kapasitas operasi kolom. Pengujian sistem kontinu mengacu pada penelitian Van et al. (2022) yang menunjukkan bahwa zeolit A berbasis abu terbang mampu mencapai efisiensi penyisihan amonium lebih dari 90% pada kondisi operasi tertentu.

Uji Regenerasi dan Penggunaan Ulang Adsorben

Untuk mengevaluasi aspek keberlanjutan penggunaan adsorben, dilakukan pengujian regenerasi terhadap zeolit yang telah jenuh amonium. Regenerasi dilakukan menggunakan larutan NaCl sebagai agen desorpsi. Zeolit jenuh direndam dalam larutan regeneran selama periode tertentu sehingga ion amonium yang terikat pada permukaan adsorben dapat dilepaskan kembali melalui mekanisme pertukaran ion.

Setelah proses desorpsi selesai, zeolit dicuci menggunakan akuades hingga mencapai kondisi netral, kemudian dikeringkan dan digunakan kembali pada siklus adsorpsi berikutnya. Pengujian dilakukan secara berulang untuk mengetahui perubahan kapasitas adsorpsi setelah beberapa siklus penggunaan. Tahapan ini mengacu pada penelitian Cheng et al. (2024) dan Zhou et al. (2024) yang menunjukkan bahwa zeolit sintetis memiliki potensi regenerasi yang baik dan tetap mempertahankan sebagian besar kapasitas adsorpsinya setelah penggunaan berulang.

Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis secara kuantitatif untuk menentukan efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi amonium. Efisiensi penyisihan dihitung berdasarkan selisih konsentrasi amonium sebelum dan sesudah perlakuan adsorpsi, sedangkan kapasitas adsorpsi dihitung berdasarkan jumlah amonium yang berhasil diserap per satuan massa adsorben (Tang et al., 2020; Jiang et al., 2024).

Data kesetimbangan adsorpsi dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich untuk menjelaskan karakteristik interaksi antara amonium dan permukaan zeolit. Selain itu, data kinetika adsorpsi dianalisis menggunakan model pseudo-first-order dan pseudo-second-order guna menentukan mekanisme pengendali adsorpsi yang dominan. Pendekatan ini mengikuti metode yang digunakan oleh Ma et al. (2023), Jiang et al. (2024), dan Zhou et al. (2024).

Seluruh pengujian dilakukan dalam tiga kali ulangan. Data disajikan dalam bentuk rata-rata dan simpangan baku. Analisis statistik dilakukan menggunakan analisis varians satu arah (one-way ANOVA) pada tingkat signifikansi 5%. Apabila terdapat perbedaan yang signifikan antarperlakuan, analisis dilanjutkan dengan uji Tukey untuk menentukan perlakuan yang memberikan pengaruh paling efektif terhadap penyisihan amonium. Melalui pendekatan tersebut, hubungan antara kondisi sintesis, karakteristik zeolit, dan kemampuan adsorpsi amonium dapat dievaluasi secara ilmiah, sistematis, dan dapat dipertanggungjawabkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa abu terbang batubara yang digunakan sebagai bahan baku memiliki potensi yang tinggi untuk dikonversi menjadi zeolit sintetis melalui metode alkali fusion-hidrotermal. Karakterisasi awal abu terbang memperlihatkan dominasi kandungan silika dan alumina yang merupakan komponen utama pembentuk kerangka aluminosilikat zeolit. Temuan ini sejalan dengan laporan Roo et al. (2003), Koshy dan Singh (2016), serta Ren et al. (2019) yang menyatakan bahwa abu terbang batubara mengandung senyawa silika dan alumina dalam jumlah cukup besar sehingga layak dimanfaatkan sebagai prekursor sintesis zeolit. Kandungan kedua komponen tersebut menjadi faktor penting dalam menentukan keberhasilan pembentukan fase kristal zeolit selama proses hidrotermal.

Proses sintesis yang dilakukan menghasilkan perubahan karakteristik material yang cukup signifikan dibandingkan dengan abu terbang sebelum perlakuan. Secara visual, warna material berubah menjadi lebih terang dengan tekstur yang lebih halus. Hasil karakterisasi menggunakan XRD menunjukkan terbentuknya fase kristal zeolit yang didominasi oleh struktur NaA dengan tingkat kristalinitas yang relatif tinggi. Munculnya puncak-puncak difraksi khas zeolit menunjukkan bahwa proses alkali fusion berhasil meningkatkan kelarutan silika dan alumina sehingga mempermudah pembentukan kerangka aluminosilikat selama tahap kristalisasi hidrotermal. Hasil ini konsisten dengan penelitian Jiang et al. (2016), Ren et al. (2019), dan Liu et al. (2024)

yang melaporkan bahwa kombinasi perlakuan alkali dan hidrotermal mampu menghasilkan zeolit NaA dengan struktur kristal yang baik.

Karakterisasi menggunakan FTIR memperlihatkan keberadaan pita serapan yang berkaitan dengan vibrasi Si–O–Al dan Si–O–Si yang merupakan ciri khas struktur zeolit. Intensitas pita serapan tersebut meningkat dibandingkan material awal, mengindikasikan terbentuknya jaringan aluminosilikat yang lebih teratur setelah proses sintesis. Hasil ini menunjukkan bahwa transformasi mineral abu terbang menuju struktur zeolit berlangsung secara efektif. Fenomena serupa juga dilaporkan oleh Ren et al. (2019) dan Zheng et al. (2024), yang menemukan bahwa keberhasilan pembentukan zeolit ditandai oleh munculnya pita vibrasi aluminosilikat yang semakin jelas pada spektrum FTIR.

Pengamatan morfologi menggunakan SEM menunjukkan perubahan bentuk partikel yang cukup nyata. Abu terbang sebelum sintesis umumnya memiliki bentuk sferis dengan permukaan relatif halus, sedangkan zeolit hasil sintesis memperlihatkan struktur kristal yang lebih teratur dengan permukaan kasar dan banyak rongga mikropori. Pembentukan pori-pori tersebut sangat penting karena berperan sebagai lokasi adsorpsi dan pertukaran ion selama proses penjerapan amonium. Struktur berpori yang berkembang pada material hasil sintesis menunjukkan bahwa metode yang digunakan mampu meningkatkan luas permukaan aktif adsorben. Hasil ini mendukung temuan Roo et al. (2003), Makgabutlane et al. (2020), dan Liu et al. (2024) yang menyatakan bahwa sintesis zeolit dari abu terbang menghasilkan peningkatan jumlah pori dan area permukaan yang berkontribusi terhadap kemampuan adsorpsi.

Pengukuran kapasitas tukar kation menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis memiliki nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan abu terbang awal. Peningkatan kapasitas tukar kation mengindikasikan bahwa material memiliki kemampuan yang lebih besar dalam menukar ion-ion yang berada pada struktur zeolit dengan ion amonium yang terdapat dalam air limbah. Kapasitas tukar kation merupakan salah satu parameter utama yang menentukan efektivitas zeolit dalam proses pengolahan limbah yang mengandung amonium. Hu et al. (2007) dan Zhou et al. (2024) menjelaskan bahwa peningkatan kapasitas tukar kation berkorelasi positif dengan peningkatan efisiensi penyisihan amonium karena semakin banyak situs aktif yang tersedia untuk proses pertukaran ion.

Pengujian adsorpsi pada sistem batch menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis mampu menurunkan konsentrasi amonium secara signifikan pada seluruh perlakuan yang diberikan. Efisiensi penyisihan meningkat seiring bertambahnya dosis adsorben. Pada dosis yang lebih rendah, jumlah situs aktif yang tersedia masih terbatas sehingga sebagian ion amonium tetap berada dalam larutan. Ketika dosis adsorben ditingkatkan, jumlah situs aktif bertambah sehingga peluang terjadinya interaksi antara ion amonium dan permukaan zeolit menjadi lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan yang cukup signifikan. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Gao et al. (2018), Tang et al. (2020), dan Jiang et al. (2024) yang menunjukkan bahwa peningkatan dosis zeolit berkontribusi terhadap peningkatan kemampuan adsorpsi amonium hingga mencapai kondisi optimum.

Pengaruh waktu kontak terhadap proses adsorpsi juga menunjukkan pola yang jelas. Pada tahap awal adsorpsi, penurunan konsentrasi amonium berlangsung sangat cepat karena sebagian besar situs aktif pada permukaan zeolit masih tersedia. Setelah waktu kontak bertambah, laju adsorpsi mulai menurun hingga akhirnya mencapai kondisi kesetimbangan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa sebagian besar situs aktif telah terisi oleh ion amonium sehingga kapasitas adsorpsi mendekati maksimum. Pola tersebut sesuai dengan karakteristik adsorpsi ion amonium pada zeolit yang dilaporkan oleh Gao et al. (2018), Ma et al. (2023), dan Zhou et al. (2024), di mana laju adsorpsi tertinggi terjadi pada tahap awal sebelum mencapai kesetimbangan sistem.

Pengaruh konsentrasi awal amonium menunjukkan bahwa kapasitas adsorpsi meningkat seiring meningkatnya konsentrasi awal larutan. Pada konsentrasi rendah, jumlah ion amonium yang tersedia relatif sedikit sehingga kapasitas adsorpsi yang terukur juga lebih rendah. Sebaliknya, pada konsentrasi yang lebih tinggi terjadi peningkatan gaya pendorong perpindahan massa dari larutan menuju permukaan adsorben sehingga jumlah amonium yang terserap menjadi lebih besar. Meskipun demikian, efisiensi penyisihan cenderung mengalami penurunan pada konsentrasi yang sangat tinggi karena jumlah situs aktif pada zeolit mulai mencapai kondisi jenuh. Hasil ini sesuai dengan penelitian Tang et al. (2020), Jiang et al. (2024), dan Zheng et al. (2024) yang menemukan bahwa peningkatan konsentrasi awal amonium dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi tetapi tidak selalu meningkatkan efisiensi penyisihan.

Kemampuan adsorpsi zeolit sintetis pada air limbah peternakan aktual menunjukkan performa yang sangat baik. Efisiensi penyisihan yang diperoleh berada pada kisaran yang sebanding dengan berbagai penelitian terdahulu yang menggunakan limbah peternakan maupun limbah kaya amonium lainnya. Nilai efisiensi yang diperoleh bahkan mendekati hasil yang dilaporkan oleh Gao et al. (2018) pada limbah peternakan sapi perah dan Tang et al. (2020) pada limbah peternakan babi. Hasil ini menunjukkan bahwa zeolit yang disintesis dari abu terbang memiliki kemampuan yang kompetitif dibandingkan adsorben sintetis lainnya.

Keberhasilan penjerapan amonium tidak hanya dipengaruhi oleh luas permukaan dan jumlah pori, tetapi juga oleh mekanisme pertukaran ion yang terjadi pada struktur zeolit. Ion natrium yang terdapat dalam kerangka zeolit dapat dipertukarkan dengan ion amonium yang berada dalam larutan. Proses ini berlangsung secara simultan dengan adsorpsi fisik pada permukaan pori sehingga menghasilkan efisiensi penyisihan yang tinggi. Hu et al. (2007) menjelaskan bahwa mekanisme pertukaran ion merupakan faktor dominan dalam proses penghilangan amonium menggunakan zeolit berbasis abu terbang. Temuan penelitian ini memperkuat pandangan tersebut karena peningkatan kapasitas tukar kation berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi adsorpsi yang diperoleh.

Analisis isoterm adsorpsi menunjukkan bahwa data penelitian memiliki kesesuaian yang lebih tinggi terhadap model Langmuir dibandingkan model Freundlich. Hasil ini mengindikasikan bahwa adsorpsi amonium cenderung berlangsung pada permukaan homogen melalui pembentukan lapisan tunggal atau monolayer. Kesesuaian terhadap model Langmuir menunjukkan bahwa situs adsorpsi yang tersedia pada permukaan zeolit memiliki energi yang relatif seragam. Temuan ini konsisten dengan penelitian Jiang et al. (2024) yang menyatakan bahwa adsorpsi amonia-nitrogen pada zeolit molecular sieve hasil sintesis dari abu terbang mengikuti model Langmuir dengan tingkat kecocokan yang tinggi. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Zhou et al. (2024) pada zeolit sintetis yang dimodifikasi menggunakan sodium asetat.

Analisis kinetika adsorpsi menunjukkan bahwa model pseudo-second-order memberikan nilai koefisien determinasi yang lebih tinggi dibandingkan model pseudo-first-order. Hal ini menunjukkan bahwa proses adsorpsi lebih dipengaruhi oleh interaksi kimia atau chemisorption dibandingkan adsorpsi fisik semata. Kecenderungan tersebut mengindikasikan adanya keterlibatan mekanisme pertukaran ion yang kuat antara ion amonium dan situs aktif pada zeolit. Temuan ini mendukung hasil penelitian Ma et al. (2023), Jiang et al. (2024), dan Zhou et al. (2024) yang melaporkan bahwa adsorpsi amonium pada zeolit sintetis umumnya mengikuti model pseudo-second-order karena dipengaruhi oleh proses pertukaran ion dan ikatan kimia pada permukaan adsorben.

Selain pengujian batch, penelitian ini juga mengevaluasi performa zeolit pada sistem kolom kontinu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kolom yang diisi zeolit sintetis mampu mempertahankan efisiensi penyisihan amonium dalam periode operasi yang cukup panjang sebelum mencapai kondisi breakthrough. Konsentrasi amonium pada efluen tetap rendah selama tahap awal operasi dan meningkat secara bertahap seiring bertambahnya volume limbah yang diproses. Pola ini menunjukkan bahwa situs adsorpsi dalam kolom masih tersedia pada awal operasi dan secara perlahan mengalami kejenuhan setelah digunakan secara terus-menerus.

Efisiensi penyisihan pada sistem kontinu menunjukkan kecenderungan yang sejalan dengan penelitian Van et al. (2022) yang melaporkan bahwa zeolit A hasil sintesis dari abu terbang mampu mencapai efisiensi lebih dari 90% dalam pengolahan amonium menggunakan kolom kontinu. Kemampuan mempertahankan efisiensi tinggi pada sistem kontinu merupakan indikator penting bagi potensi penerapan teknologi ini pada skala yang lebih besar. Berbeda dengan sistem batch yang hanya menggambarkan kondisi laboratorium dalam periode singkat, sistem kolom kontinu memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai performa adsorben dalam operasi lapangan.

Salah satu aspek penting yang dievaluasi dalam penelitian ini adalah kemampuan regenerasi adsorben. Hasil pengujian menunjukkan bahwa zeolit yang telah jenuh masih dapat digunakan kembali setelah melalui proses desorpsi menggunakan larutan natrium klorida. Meskipun terjadi sedikit penurunan kapasitas adsorpsi setelah beberapa siklus penggunaan, zeolit tetap mampu mempertahankan sebagian besar kinerjanya. Temuan ini menunjukkan bahwa mekanisme adsorpsi yang terjadi bersifat reversibel sehingga ion amonium yang terikat pada struktur zeolit dapat dilepaskan kembali melalui proses pertukaran ion.

Kemampuan regenerasi tersebut memiliki implikasi yang penting dari sisi ekonomi dan lingkungan. Penggunaan adsorben yang dapat diregenerasi akan mengurangi kebutuhan produksi material baru serta

menurunkan biaya operasional pengolahan limbah. Hasil penelitian ini sejalan dengan Cheng et al. (2024) yang melaporkan bahwa zeolit hasil sintesis hijau mampu mempertahankan kinerja adsorpsinya setelah beberapa siklus regenerasi. Temuan yang serupa juga disampaikan oleh Zhou et al. (2024) yang menunjukkan bahwa zeolit sintetis termodifikasi memiliki stabilitas yang baik selama proses adsorpsi dan desorpsi berulang.

Dari perspektif lingkungan, hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan abu terbang sebagai bahan baku zeolit memberikan manfaat ganda. Selain mengurangi jumlah limbah industri yang harus ditangani, pendekatan ini juga menghasilkan material yang efektif untuk mengatasi pencemaran amonium pada limbah peternakan. Konsep tersebut sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang menekankan pemanfaatan kembali limbah sebagai sumber daya yang bernilai. Koshy dan Singh (2016) menegaskan bahwa konversi abu terbang menjadi zeolit merupakan salah satu strategi paling menjanjikan dalam pengelolaan limbah industri sekaligus pengembangan teknologi pengolahan air yang berkelanjutan.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa zeolit sintetis yang dihasilkan melalui metode alkali fusion-hidrotermal memiliki performa yang kompetitif. Kapasitas adsorpsi dan efisiensi penyisihan yang diperoleh berada dalam rentang yang sebanding dengan zeolit Na-P1 yang dikembangkan oleh He et al. (2016) dan He et al. (2017), zeolit NaA yang dilaporkan oleh Jiang et al. (2016), serta zeolit X/A yang dikembangkan oleh Zheng et al. (2024). Hal ini menunjukkan bahwa metode sintesis yang digunakan berhasil menghasilkan material dengan karakteristik yang sesuai untuk aplikasi pengolahan limbah peternakan.

Hasil penelitian membuktikan bahwa abu terbang batubara dapat dimanfaatkan secara efektif sebagai bahan baku sintesis zeolit untuk penjerapan amonium pada air limbah peternakan. Karakteristik kristal yang terbentuk, kapasitas tukar kation yang tinggi, kemampuan adsorpsi yang baik, performa pada sistem kontinu, serta potensi regenerasi yang memadai menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki prospek yang sangat baik untuk dikembangkan lebih lanjut. Temuan ini tidak hanya memperkuat hasil penelitian terdahulu mengenai pemanfaatan zeolit berbasis abu terbang, tetapi juga memberikan bukti bahwa integrasi pengelolaan limbah industri dan limbah peternakan dapat menjadi solusi yang efektif dalam mendukung pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa abu terbang batubara memiliki potensi yang sangat baik sebagai bahan baku sintesis zeolit untuk aplikasi pengolahan air limbah peternakan yang mengandung amonium. Melalui metode alkali fusion-hidrotermal, abu terbang berhasil dikonversi menjadi zeolit dengan struktur kristal yang berkembang baik, morfologi berpori, serta kapasitas tukar kation yang lebih tinggi dibandingkan material asalnya. Karakteristik tersebut berkontribusi langsung terhadap peningkatan kemampuan adsorpsi amonium dari air limbah.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis mampu menurunkan konsentrasi amonium secara signifikan pada berbagai kondisi operasi. Peningkatan dosis adsorben dan waktu kontak memberikan pengaruh positif terhadap efisiensi penyisihan amonium hingga mencapai kondisi optimum. Analisis adsorpsi menunjukkan bahwa proses penjerapan berlangsung melalui kombinasi mekanisme adsorpsi dan pertukaran ion, dengan kecenderungan mengikuti model isoterm Langmuir dan kinetika pseudo-second-order. Temuan ini mengindikasikan bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan yang relatif homogen dan didominasi oleh interaksi kimia antara ion amonium dan situs aktif zeolit.

Pengujian pada sistem kolom kontinu memperlihatkan bahwa zeolit mampu mempertahankan kinerja penyisihan amonium dalam periode operasi yang cukup panjang sebelum mencapai kejenuhan. Selain itu, hasil uji regenerasi membuktikan bahwa adsorben masih dapat digunakan kembali setelah proses desorpsi dengan penurunan kapasitas yang relatif kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa zeolit sintetis memiliki prospek yang baik untuk aplikasi berkelanjutan.

Pemanfaatan abu terbang batubara sebagai bahan baku zeolit tidak hanya memberikan solusi terhadap pengelolaan limbah industri, tetapi juga menghasilkan adsorben yang efektif untuk mengurangi pencemaran amonium pada air limbah peternakan. Pendekatan ini mendukung konsep ekonomi sirkular dan berpotensi menjadi alternatif teknologi pengolahan limbah yang efisien, ekonomis, dan ramah lingkungan.

REFERENSI

Chen, J., Liu, J., Zhang, Z., Wang, J., Bi, S., Tang, X., & Huang, Z. (2025). Green synthesis of zeolite and its regeneration for adsorption of ammonia nitrogen in water. *Environmental Science and Pollution Research*, *32*(9), 5132-5142. https://doi.org/10.1007/s11356-025-35894-7

Gao, F., Xiao, L., & Zhang, H. (2018). Potential of using synthesized nano-zeolite for ammonium and phosphate immobilization in dairy wastewater. Journal of Dairy Research, 85(3), 375–378. https://doi.org/10.1017/S0022029918000560

He, H., Xu, S., Han, R., & Hou, X. (2016). Nutrient sequestration from wastewater by using zeolite Na-P1 synthesized from coal fly ash. Figshare. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.3578301.v2

He, H., Xu, S., Han, R., & Hou, X. (2017). Nutrient sequestration from wastewater by using zeolite Na-P1 synthesized from coal fly ash. Environmental Technology, 38(7), 873–883. https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1217061

Hu, Z., Wu, D., Wang, X., Ye, X., & Deng, B. (2007). Use of zeolitized coal fly ash in the simultaneous removal of ammonium and phosphate from aqueous solution. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 1(4), 401–406. https://doi.org/10.1007/S11783-007-0037-X

Jiang, Q., He, J., Wang, Y.-F., Li, X., Zhang, Y., Liu, Z., Zhang, H., & Wang, Y. (2024). Efficient removal of ammonia–nitrogen in wastewater by zeolite molecular sieves prepared from coal fly ash. Scientific Reports, 14, Article 72067. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72067-x

Jiang, Z., Yang, J., Ma, H., Ma, X., & Xu, Y. (2016). Synthesis of pure NaA zeolites from coal fly ashes for ammonium removal from aqueous solutions. Clean Technologies and Environmental Policy, 18(3), 713–721. https://doi.org/10.1007/S10098-015-1072-0

Koshy, N., & Singh, D. N. (2016). Fly ash zeolites for water treatment applications. Journal of Environmental Chemical Engineering, 4(2), 1460–1472. https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.02.002

Li, J. (2011). Simultaneous removal of ammonium and phosphate in wastewater by La-modified synthetic zeolite from coal fly ash. China Environmental Science, 31(Suppl. 1), 103–108.

Liu, G., Lin, Y., Zhang, L., Wang, X., Liu, Y., Wang, H., Zhang, H., & Zhao, Y. (2024). Preparation of NaA zeolite molecular sieve based on solid waste fly ash by high-speed dispersion homogenization-assisted alkali fusion-hydrothermal method and its performance of ammonia-nitrogen adsorption. Sustainable Materials and Technologies, 39, 100673. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2024.100673

Ma, X., Nie, Y., Guo, J., Zhang, X., Wang, Y., & Li, J. (2023). Synthesis and kinetic analysis of zeolites based on fly ash. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 44(12), 3658–3674. https://doi.org/10.1080/19392699.2023.2297185

Makgabutlane, B., Nthunya, L. N., Musyoka, N. M., Kuvarega, A. T., Daramola, M. O., & Nxumalo, E. N. (2020). Microwave-assisted synthesis of coal fly ash-based zeolites for removal of ammonium from urine. RSC Advances, 10(5), 2416–2427. https://doi.org/10.1039/C9RA10114D

Ren, X., Xiao, L., Qu, R., Liu, S., Zhang, H., Wu, W., Zheng, C., Gao, X., & Gao, F. (2019). Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash. RSC Advances, 9(3), 1364–1372. https://doi.org/10.1039/C8RA09215J

Roo, W.-H., Lee, W.-M., Baek, I.-H., & Kim, J.-S. (2003). The synthesis of zeolite using fly ash and its investigate adsorption character. Korean Journal of Chemical Engineering, 20(4), 751–756.

Tang, H., Xu, X., Wang, B., Lv, C., & Shi, D. (2020). Removal of ammonium from swine wastewater using synthesized zeolite from fly ash. Sustainability, 12(8), Article 3423. https://doi.org/10.3390/su12083423

Van, T. L., Pham, H. T., Nguyen, V. D., Nguyen, T. T., & Tran, Q. H. (2022). Treatment of amoni in wastewater by continuous column model using zeolite A synthesized from coal fly ash. Journal of Military Science and Technology Research, 2022, 9–14. https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.vittep.2022.9-14

Xu, X., Wang, B., Zhou, H., Shi, D., Lv, C., & Tang, H. (2018). Zeolite synthesized from fly ash and a method for treating high-concentration ammonia-nitrogen wastewater by zeolite (Chinese Patent No. CN108802635A).

Zheng, Y., Wu, Y.-L., Yu, L., Zhang, H., Liu, J., Wang, X., Li, Y., & Chen, Z. (2024). Controlled synthesis of fly ash-based zeolite X/A for ammonia-nitrogen removal. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4113345/v1

Zhou, H.-D., Wang, C.-Y., Wang, Q., Liu, Y., & Zhang, H. (2024). Efficiency, mechanism and application prospect of ammonium adsorption and desorption over a sodium-acetate-modified synthetic zeolite. RSC Advances, 14, 13001–13015. https://doi.org/10.1039/D4RA01547A