

Sintesis Zeolit dari Abu Bagasse Sebagai Material Penukar Ion untuk Reduksi Kesadahan Air

Alfina Nurmayanti, Tara Nova Rinda Putri, Sani

Jurusan Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email:: alfinayanti34@gmail.com

Diterima: 9 April 2026

Disetujui: 13 April 2026

Abstract

The synthesis of zeolite from bagasse ash has attracted significant attention due to its high silica content, which enables the formation of porous aluminosilicate structures with excellent ion-exchange capacity. This study aims to synthesize zeolite from bagasse ash and evaluate its performance as an ion-exchange material for reducing groundwater hardness. The synthesis process was carried out through the preparation of sodium silicate and sodium aluminate, followed by zeolite synthesis using a hydrothermal method. Material characterization was conducted using X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM). XRF analysis showed that bagasse ash contains major components of CaO (58.72%) and SiO₂ (23.94%). XRD results indicated the formation of crystalline zeolite phases, although minor impurity phases were still present. SEM analysis revealed irregular and porous particle morphology. Application tests demonstrated that the synthesized zeolite effectively reduced Ca concentration from 609,25 mg/L to 5.36 mg/L and Mg concentration from 20.94 mg/L to 3.64 mg/L. These results indicate that zeolite derived from bagasse ash has strong potential as an effective alternative material for water hardness treatment.

Keywords: *bagasse ash, zeolite, hydrothermal, hardness, ion exchange*

Abstrak

Sintesis zeolit dari abu bagasse telah menarik perhatian yang signifikan dikarenakan memiliki kandungan silika yang tinggi, sehingga memungkinkan terbentuknya struktur aluminosilikat berpori dengan kapasitas pertukaran ion yang sangat baik. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit dari abu bagasse serta mengkaji kemampuannya sebagai material penukar ion dalam menurunkan kesadahan air sumur. Proses sintesis dilakukan melalui tahap pembuatan natrium silikat, natrium aluminat, dan dilanjutkan dengan sintesis zeolit menggunakan metode hidrotermal. Karakterisasi material dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Hasil XRF menunjukkan bahwa abu bagasse memiliki kandungan utama CaO sebesar 58,72% dan SiO₂ sebesar 23,94%. Analisis XRD mengindikasikan terbentuknya fase kristalin zeolit, meskipun masih terdapat fase minor pengotor. Hasil SEM menunjukkan morfologi partikel yang tidak beraturan dan berpori. Uji aplikasi menunjukkan bahwa zeolit mampu menurunkan konsentrasi Ca dari 609,25 mg/L menjadi 5,36 mg/L dan Mg dari 20,94 mg/L menjadi 3,64 mg/L. Hasil ini menunjukkan bahwa zeolit dari abu bagasse berpotensi sebagai material alternatif yang efektif dalam pengolahan air sadah.

Kata kunci: *abu bagasse, zeolit, hidrotermal, kesadahan, pertukaran ion*

1. Latar Belakang

Abu bagasse merupakan limbah padat berupa material sisa berbentuk bubuk atau partikel halus berwarna abu-abu hingga kehitaman. Limbah ini dihasilkan dari proses pembakaran ampas tebu di dalam boiler yang digunakan sebagai sumber tenaga listrik dan uap pada industri penggilingan tebu. Pada musim giling tahun 2021, data dari Ikatan Ahli Gula Indonesia (IKAGI) mencatat bahwa 62 pabrik gula di Indonesia memproses sekitar 28,80 juta ton tebu dan menghasilkan abu bagasse sekitar 9.000.000 ton. Dari jumlah tersebut, sekitar 60% dimanfaatkan oleh pabrik gula untuk berbagai keperluan, seperti bahan bakar dan bahan baku kertas. Namun, sekitar 40% sisa abu bagasse belum dimanfaatkan [1]. Kandungan senyawa kimia dalam abu bagasse meliputi Si 70,85%; K 0,93%; Ca 2,05%; Ti 0,84%; Fe 8,71%; Ni 9,63%; Cu 2,68%; Zn 1,79%; dan Re 2,52% [2].

Zeolit merupakan aluminosilikat kristal berpori yang mengandung kation logam alkali seperti magnesium, kalsium, kalium, dan natrium [3]. Beberapa peneliti telah melakukan penelitian terkait sintesis zeolit menggunakan abu bagasse sebagai bahan baku, dengan metode yang umum digunakan adalah metode sol-gel dan metode hidrotermal. Pada penelitian sintesis zeolit dari abu bagasse menggunakan metode sol-gel dengan variasi suhu 60°C, 80°C, dan 100°C menunjukkan bahwa zeolit yang terbentuk adalah zeolit Y dengan luas permukaan terbesar yakni 23,0603 m²/g pada variasi suhu 80°C [4]. Pada penelitian sintesis zeolit dari abu bagasse menggunakan metode hidrotermal dengan suhu 150°C dengan variasi waktu hidrotermal 8; 16; dan 24 jam didapatkan waktu reaksi selama 8 jam menghasilkan zeolit dengan kualitas terbaik yang ditandai oleh jumlah pembentukan zeolit yang optimal dan tidak ada pengotor dari senyawa lain [5]. Pada penelitian sintesis zeolit Y dari abu bagasse menggunakan metode hidrotermal dengan variasi rasio SiO_2/Al_2O_3 2;2,5; 3, diperoleh hasil terbaik pada rasio 2,5 dengan luas permukaan zeolit Y sebesar 15,0805 m²/gram [6]. Pada sintesis zeolit dengan menggunakan metode hidrotermal menunjukkan sifat reaktivitas tinggi, minim dampak lingkungan, efisiensi energi yang baik, serta mampu menghasilkan kristal yang berkualitas tinggi [7].

Pada penelitian sintesis zeolit dari abu bagasse dengan metode hidrotermal, larutan NaOH umum digunakan sebagai pelarut utama untuk mengekstraksi silika. Sementara itu, jenis pelarut lain yang dapat digunakan ialah KOH. Pada penelitian sintesis zeolit dari abu bagasse menggunakan metode hidrotermal dengan variasi konsentrasi NaOH 1,67; 3,33; 5; 6,67; dan 8,3 M, didapatkan bahwa konsentrasi NaOH optimum adalah 1,67 M. Pada kondisi tersebut menunjukkan nilai kapasitas tukar kation dan detergenasi berturut-turut sebesar 121,12 meq/100 gram dan 92,09 %. Kondisi ini menunjukkan bahwa zeolit yang dihasilkan memiliki struktur yang baik dan bersifat fungsional [8]. Pada penelitian sintesis zeolit menggunakan metode hidrotermal dengan variasi kation KOH 0%; 25%; 50% dan 100%, didapatkan bahwa konsentrasi KOH optimum sebesar 100%. Pada kondisi tersebut didapatkan zeolit dengan kristalinitas yang tinggi dengan megakalsilit 73% dan Kuarsa 27% [9]. Pada sintesis zeolit menggunakan metode hidrotermal dengan larutan NaOH menghasilkan kerangka zeolit yang lebih stabil dan kristalin. Sifat kimia Na⁺ dengan mudah masuk ke dalam rongga zeolit dan menyeimbangkan muatan kerangka aluminosilikat sehingga NaOH dapat menghasilkan zeolit dengan kristalinitas yang tinggi dan jenis fasa yang lebih murni [10].

Berdasarkan pernyataan di atas bahwa *abu bagasse* dapat dimanfaatkan sebagai zeolit, maka dilakukan sintesis zeolit Y dari *abu bagasse* menggunakan metode hidrotermal untuk reduksi kesadahan air. Penelitian ini memilih bahan baku *abu bagasse* karena selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal. Pada penelitian ini memvariasikan rasio SiO_2/Al_2O_3 (3:1 ; 4:1 ; 5:1 ; 6:1 ; 7:1) mol dan dengan variasi waktu hidrotermal (2 : 3 : 4 : 6 : 8) jam. Penelitian ini bertujuan untuk mensintesis zeolit Y dan mengetahui respon variasi penambahan SiO_2 dan penambahan waktu hidrotermal terhadap struktur zeolit.

2. Metode Penelitian

Bahan

Bahan baku utama pada penelitian ini adalah abu bagasse yang diperoleh dari PG Ngadiredjo, Kab. Kediri, Jawa Timur. Bahan baku pendukung lainnya adalah Natrium Hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 2N, Aluminium Hidroksida (Al(OH)₃), aquadest yang didapatkan dari toko Jaya Kimia, Ngagel Surabaya dan air sumur yang di ambil dari Desa Gedang Kulut, Kab. Gresik, Jawa Timur.

Peralatan

Peralatan yang digunakan adalah *magnetic stirrer*, *hot plate*, gelas ukur, *beaker glass*, oven, botol polipropilen, corong kaca, mortar dan alu.

Proses Percobaan

1. Persiapan Penelitian

Limbah abu bagasse diperkecil ukurannya menggunakan mortar dan alu untuk memudahkan pelarutan.

2. Pembuatan Natrium Silikat

Pencampuran abu bagasse Sebanyak 100 gram dengan 300 ml NaOH konsentrasi 0,2 N, lalu diaduk selama 15 menit pada suhu ruang. Setelah itu, larutan natrium silikat diencerkan dengan aquadest 100 ml, kemudian diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 200 rpm selama ± 2 jam. Selanjutnya didinginkan dan disaring untuk diambil filtratnya.

3. Pembuatan Natrium Aluminat

Sebanyak 20 gram kristal NaOH dicampurkan dalam 100 ml aquadest. Kemudian, ditambahkan serbuk Al(OH)₃ sebanyak 8,5 gram disertai pengadukan hingga homogen

4. Sintesis Zeolit

Proses sintesis zeolit dilakukan secara hidrotermal dengan cara natrium silikat dicampurkan dengan natrium aluminat sesuai variabel rasio SiO₂/Al₂O₃ (3:1 ; 4:1 ; 5:1 ; 6:1 ; 7:1) dengan cara diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 2 jam dengan suhu 85°C. Campuran tersebut kemudian dimasukkan ke dalam oven pada suhu 100°C dengan waktu sesuai variabel 2 ; 3 ; 4 ; 6 ; 8 jam untuk proses kristalisasi. Setelah itu, campuran didiamkan hingga dingin, kemudian campuran dikeluarkan dan disaring. Padatan hasil penyaringan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C hingga berat zeolit konstan. Setelah kering, zeolit dianalisa menggunakan XRF, XRD, dan SEM.

3. Hasil Dan Pembahasan

Komposisi Bahan baku

Hasil Analisa XRF (*X-Ray Fluorescence*) untuk mengetahui kandungan awal bahan baku pada abu bagasse disajikan pada **Tabel 1** berikut :

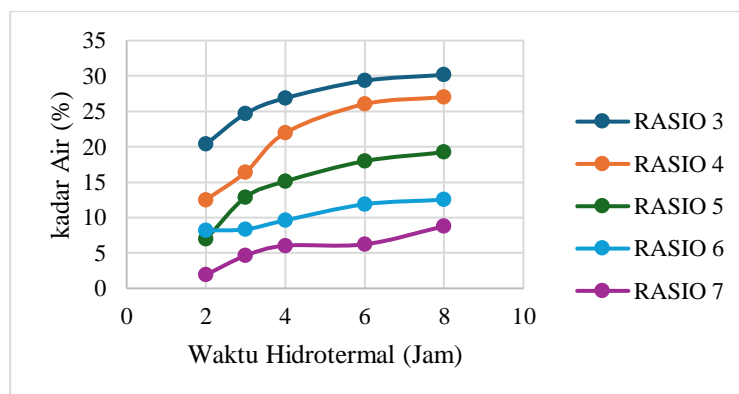
Tabel 1. Komposisi *abu bagasse* awal

Atom	Persentase (%)
P ₂ O ₅	3,91
SO ₃	0,10
K ₂ O	7,47
CaO	58,72
SiO ₂	23,94
Al ₂ O ₃	2,43
SrO	0,37
Rb ₂ O	0,03
ZnO	0,02
Fe ₂ O ₃	2,50
MnO	0,14
TiO ₂	0,14
Sc ₂ O ₃	0,19

Hasil XRF menunjukkan adanya kandungan silika pada bahan baku abu bagasse sebesar 23,94%. Kandungan silika pada abu bagasse dapat digunakan sebagai bahan utama pembuatan zeolit Y.

Hasil Sintesis Zeolit

Pengaruh rasio mol SiO₂/Al₂O₃ dan waktu hidrotermal terhadap kadar air zeolit disajikan pada **Gambar 1**.

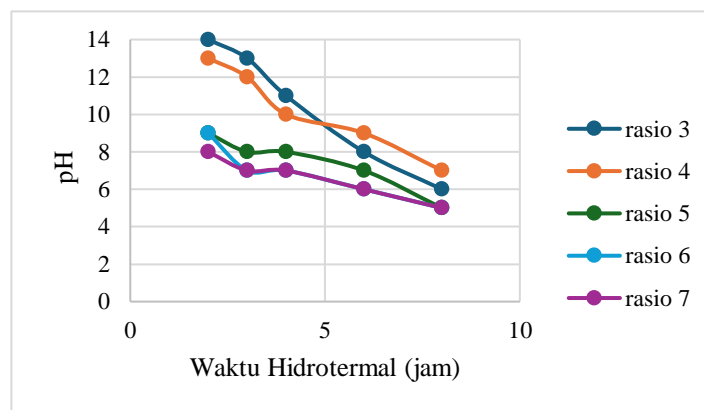


Gambar 1. Hubungan rasio mol SiO₂/Al₂O₃ dan waktu hidrotermal terhadap kadar air zeolit

Peningkatan waktu hidrotermal dari 2 jam hingga 8 jam diikuti oleh kenaikan kadar air, yang menunjukkan bahwa semakin lama proses hidrotermal berlangsung, semakin berkembang struktur pori dan kerangka zeolit yang mampu mengakomodasi molekul air. Pada tahap awal waktu hidrotermal, pembentukan kerangka aluminosilikat dan pori berlangsung secara intensif, sehingga jumlah situs aktif untuk interaksi dengan air meningkat. Proses hidrotermal berpengaruh dalam meningkatkan keteraturan struktur zeolit, sehingga memengaruhi interaksi zeolit dengan air dan jumlah air terikat di dalam material [11].

Pada penelitian variasi rasio SiO_2/Al_2O_3 dilakukan dengan mempertahankan jumlah aluminium yang relatif konstan, sedangkan perubahan komposisi terjadi pada jumlah silika yang ditambahkan. Pada rasio Si/Al yang lebih rendah, jumlah silika yang tersedia dalam sistem relatif lebih sedikit sehingga proporsi aluminium dalam kerangka menjadi lebih dominan. Kondisi ini meningkatkan sifat hidrofilik zeolit karena keberadaan unit AlO_4^- dalam kerangka menghasilkan muatan negatif struktural. Muatan negatif tersebut memerlukan kation penyeimbang dalam bentuk terhidrasi sehingga memperkuat interaksi antara kerangka zeolit dan molekul air. Hubungan antara rasio SiO_2/Al_2O_3 dan sifat hidrofilik zeolit tidak selalu bersifat linier karena terdapat batas optimum komposisi silika yang dapat membentuk kerangka kristal secara stabil. Pada rasio 3:1, jumlah silika yang tersedia masih cukup untuk membentuk kerangka aluminosilikat yang stabil meskipun sebagian aluminium mulai berada dalam bentuk non-kerangka akibat keterbatasan struktur dan pengaruh aturan Löwenstein rule. Pada kondisi tersebut jumlah aluminium kerangka dan kation terhidrasi yang terbentuk masih relatif tinggi sehingga sifat hidrofilik zeolit tetap dominan. Hal ini menyebabkan kadar air pada rasio 3:1 lebih tinggi dibandingkan pada rasio 4:1.

Pada rasio mol SiO_2/Al_2O_3 yang lebih tinggi yaitu 5:1 hingga 7:1, jumlah silika yang ditambahkan dalam sistem semakin besar sementara jumlah aluminium tetap. Kondisi ini menyebabkan struktur zeolit yang terbentuk menjadi lebih kaya silika sehingga sifat hidrofiliknya menurun. Kerangka yang lebih silika-dominan cenderung memiliki interaksi yang lebih lemah dengan molekul air karena jumlah muatan negatif struktural yang berasal dari unit AlO_4^- menjadi relatif lebih sedikit. Akibatnya kemampuan zeolit dalam mengikat air menurun sehingga kadar air yang terukur pada rasio SiO_2/Al_2O_3 tinggi menjadi lebih rendah. Peningkatan rasio SiO_2/Al_2O_3 menurunkan kapasitas adsorpsi uap air akibat berkurangnya sifat hidrofilik zeolit, meskipun volume pori dapat meningkat [12]. Pengaruh rasio SiO_2/Al_2O_3 dan waktu hidrotermal terhadap pH zeolit disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Hubungan rasio mol SiO_2/Al_2O_3 dan waktu hidrotermal terhadap pH zeolit

Pada tahap awal hidrotermal 2 jam, pH larutan masih sangat tinggi, terutama pada rasio SiO_2/Al_2O_3 rendah 3:1 dan 4:1, mencapai sekitar 13-14, yang menunjukkan dominasi kondisi basa akibat tingginya konsentrasi ion OH^- dari larutan alkalis. Hal ini juga mengindikasikan bahwa spesies aluminat dan silikat terlarut belum sepenuhnya mengalami polimerisasi, sehingga medium masih bersifat sangat basa. Seiring berjalannya waktu hidrotermal hingga 8 jam, pH menurun secara progresif ke kisaran 5-7 untuk semua rasio, yang merefleksikan konsumsi ion OH^- selama proses kondensasi dan reorganisasi silikat-aluminat menjadi kerangka kristalin zeolit yang lebih stabil. Penurunan pH pada rasio SiO_2/Al_2O_3 rendah terjadi dengan laju yang lebih cepat pada awal waktu hidrotermal, menunjukkan bahwa jumlah situs aktif aluminat yang tinggi memfasilitasi polimerisasi lebih intensif pada tahap awal.

Pada rasio SiO_2/Al_2O_3 menengah hingga tinggi yaitu 5:1 sampai 7:1 grafik menunjukkan bahwa pH awal berada pada nilai yang lebih rendah dibandingkan rasio SiO_2/Al_2O_3 rendah yakni sekitar 11 sampai 12 dan penurunannya berlangsung lebih bertahap. Kondisi ini mencerminkan peningkatan kandungan aluminium yang lebih reaktif terhadap suasana basa sehingga konsumsi ion OH^- selama pembentukan kerangka zeolit berlangsung lebih intensif. Selain itu zeolit dengan rasio SiO_2/Al_2O_3 menengah hingga tinggi cenderung mencapai pH yang lebih rendah pada setiap variasi waktu hidrotermal dibandingkan rasio rendah yang mengindikasikan bahwa keberadaan aluminium dalam jumlah lebih besar mempercepat tercapainya kondisi kimia yang lebih netral hingga sedikit asam. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio SiO_2/Al_2O_3 tidak hanya memengaruhi nilai pH awal tetapi juga laju penurunan pH selama proses hidrotermal yang pada akhirnya berperan dalam pembentukan keteraturan dan stabilitas struktur zeolit.

Pemanasan larutan sintesis zeolit dalam kondisi hidrotermal menyebabkan konsumsi ion OH^- melalui reaksi polimerisasi silikat aluminat, sehingga pH menurun seiring terbentuknya jaringan zeolit [13]. Analisis grafik menunjukkan bahwa kombinasi rasio Si/Al dan waktu hidrotermal secara langsung memengaruhi kondisi kimia larutan, di mana rasio SiO_2/Al_2O_3 rendah mempertahankan medium lebih basa lebih lama karena kandungan Al_2O_3 tinggi, sedangkan rasio SiO_2/Al_2O_3 tinggi mempercepat tercapainya keseimbangan pH lebih netral. Dengan demikian, grafik pH ini mengonfirmasi bahwa kedua parameter tersebut rasio SiO_2/Al_2O_3 dan waktu hidrotermal merupakan faktor kunci dalam mengontrol mekanisme nukleasi, pertumbuhan kristal, dan stabilitas kerangka zeolit selama sintesis.

Hasil Analisa Kualitatif XRF

Pengujian dilakukan pada sampel dengan rasio SiO_2/Al_2O_3 sebesar 6:1 menghasilkan data komposisi kimia zeolit secara akurat dan non destruktif. Komposisi zeolit yang didapatkan ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Komposisi zeolit sebelum proses pertukaran ion

Atom	Persentase (%)
Al_2O_3	72,84
Ta_2O_5	0,01
Rb_2O	0,01
Fe_2O_3	0,11
MnO	0,01
CaO	0,88
K_2O	2,35
Cl	0,05
SiO_2	23,74

Hasil analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) menunjukkan bahwa komposisi zeolit sintesis didominasi oleh aluminium (Al) sebesar 63,85% dan silikon (Si) sebesar 27,54%. Dalam bentuk oksida, komponen utama yang teridentifikasi adalah Al_2O_3 sebesar 72,84% dan SiO_2 sebesar 23,74%, disertai dengan keberadaan oksida lain dalam jumlah relatif kecil seperti K_2O , CaO, dan Fe_2O_3 . Komposisi tersebut mengindikasikan bahwa material hasil sintesis memiliki kandungan aluminium yang lebih tinggi dibandingkan silikon. Jika dibandingkan dengan rasio Si/Al yang direncanakan pada tahap awal sintesis, yaitu sebesar 6:1, hasil yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Berdasarkan analisis XRF, rasio Si/Al aktual berubah menjadi sekitar 1:2,3, yang menunjukkan dominasi aluminium dalam struktur zeolit yang terbentuk. Ketidaksesuaian ini mengindikasikan bahwa komposisi kimia hasil sintesis belum sesuai dengan rasio yang ditargetkan. Perbedaan ini memiliki implikasi penting dalam proses sintesis zeolit, kondisi awal sistem prekursor berperan dalam proses nukleasi dan pertumbuhan kristal, sehingga sangat mempengaruhi karakteristik material yang dihasilkan [14]. Oleh karena itu, ketidaksesuaian komposisi awal ini tidak hanya mencerminkan kesalahan prosedur, tetapi juga berpotensi mempengaruhi sifat akhir zeolit yang terbentuk.

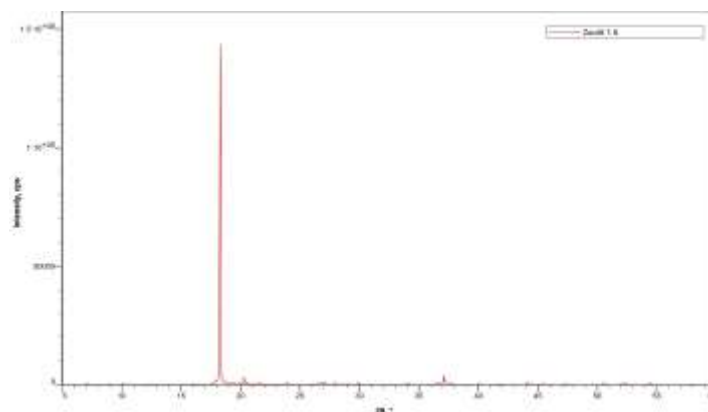
Perbedaan komposisi ini mengindikasikan bahwa pada penelitian ini silika tidak berada dalam kondisi optimal untuk berpartisipasi dalam proses sintesis. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tidak dilakukannya proses ekstraksi silika sebelum sintesis. Dalam kondisi alami, silika dalam abu bagasse tidak seluruhnya berada dalam bentuk amorf yang reaktif, melainkan sebagian berada dalam fase

kristalin atau terikat dengan oksida lain sehingga sulit larut dalam media reaksi. Hal ini sesuai dengan penelitian yang menyatakan bahwa silika dalam limbah biomassa memerlukan aktivasi untuk meningkatkan pemanfaatannya dalam sintesis material [15]. Selain itu, proses perlakuan menggunakan HCl dinyatakan mampu menghilangkan pengotor logam, sedangkan NaOH secara selektif mengekstraksi silika dari abu bagasse yang ditunjukkan oleh dominasi ikatan Si–O–Si pada hasil karakterisasi [16]. Dengan tidak dilakukannya tahap ini, jumlah silika yang bereaksi menjadi lebih sedikit, sehingga rasio Si/Al aktual bergeser ke arah dominasi aluminium. Hal ini sesuai dengan laporan bahwa pelarutan fase pembawa Si dan Al selama proses pembuatan zeolit berlangsung secara bertahap dan tidak seluruhnya berkontribusi dalam pembentukan struktur zeolit, sehingga komposisi yang bereaksi dapat berbeda dari komposisi awal. Dalam sintesis zeolit, rasio molar keseluruhan seperti $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{H}_2\text{O}$ merupakan parameter yang sangat menentukan dalam proses pembentukan kristal [17]. Perubahan kecil dalam komposisi gel sintesis dapat menyebabkan terbentuknya fase zeolit yang berbeda atau bahkan material amorf [14]. Oleh karena itu, pendekatan perhitungan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dianggap belum cukup representatif untuk mengontrol hasil sintesis secara akurat.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun abu bagasse memiliki potensi sebagai sumber aluminosilikat, keberhasilan sintesis zeolit sangat dipengaruhi oleh tahap preparasi bahan baku dan ketepatan perhitungan komposisi. Untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan desain, diperlukan proses ekstraksi silika terlebih dahulu untuk meningkatkan reaktivitasnya, serta penggunaan rasio molar lengkap dalam perhitungan awal. Selain itu, karakterisasi bahan baku menggunakan XRF atau XRD sebelum sintesis menjadi langkah penting untuk memastikan kesesuaian komposisi dengan kondisi aktual [15].

Hasil Analisa Kualitatif XRD

Pengujian dilakukan pada sampel dengan rasio Si/Al sebesar 6:1 yang didasarkan pada interaksi sinar-X dengan bidang atom dalam material kristalin. Saat sinar-X diarahkan ke sampel kristal, sebagian sinar akan terdifraksi dan menghasilkan interferensi konstruktif pada sudut-sudut tertentu. Interferensi tersebut membentuk puncak-puncak difraksi yang direkam sebagai pola difraktogram. Setiap puncak difraksi mencerminkan bidang kristal tertentu yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal hidroksiapatit maupun fase lain yang terbentuk. Data hasil pengujian XRD disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara intensitas dan sudut 2θ . Proses ini menghasilkan data struktur kristal dan fase penyusun zeolit secara akurat.



Gambar 3. Hasil uji XRD pada zeolit

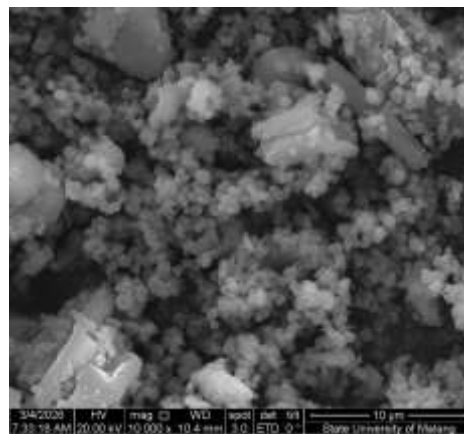
Berdasarkan hasil karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) pada sampel zeolit dari abu bagasse, diperoleh pola difraksi yang menunjukkan adanya puncak-puncak khas mineral zeolit. Pola difraksi sinar-X pada sampel menunjukkan kemunculan puncak-puncak karakteristik yang sesuai dengan zeolit Y berdasarkan data standar JCPDS No. 00-038-0239 yang merepresentasikan struktur faujasite (FAU). Puncak utama teridentifikasi pada 2θ sekitar $7,166^\circ$, $10,136^\circ$, $12,437^\circ$, $16,035^\circ$, dan $23,935^\circ$, yang sesuai dengan posisi puncak khas zeolit Y pada data JCPDS tersebut. Selain itu, kemunculan puncak pada rentang $26\text{--}27^\circ$ serta $32\text{--}34^\circ$ semakin memperkuat indikasi bahwa kerangka aluminosilikat tipe faujasite telah berhasil terbentuk.

Meskipun demikian, terdapat perbedaan pada intensitas relatif dibandingkan dengan pola standar JCPDS 00-038-0239, yaitu puncak pada 2θ sekitar $18,29^\circ$ menunjukkan intensitas yang sangat tinggi. Namun, puncak ini bukan merupakan puncak dominan pada zeolit Y. Hal ini mengindikasikan adanya kemungkinan fase lain atau impuritas dalam sampel, seperti silika amorf atau sisa mineral dari bahan baku [18]. Selain itu, kemunculan puncak tambahan pada daerah sudut tinggi di atas 35° juga menunjukkan bahwa sampel belum sepenuhnya murni dan masih mengandung fase campuran.

Kristalinitas yang dihasilkan zeolit sintesis secara keseluruhan cukup baik, meskipun masih terdapat beberapa puncak yang dapat dikaitkan dengan fase minor atau pengotor. Fase minor tersebut kemungkinan berasal dari sisa oksida logam seperti silika amorf atau kalsium oksida (CaO) yang terbentuk selama proses pembakaran abu bagasse dan aktivasi zeolit. Ketidakmurnian zeolit yang dihasilkan disebabkan oleh orientasi pembentukan kristal yang belum berlangsung secara optimal. Penurunan tingkat kristalinitas ini dapat terjadi akibat waktu pemanasan yang kurang memadai serta suhu yang belum cukup tinggi selama proses berlangsung [19]. Secara keseluruhan, berdasarkan kesesuaian posisi puncak terhadap standar JCPDS No. 00-038-0239 (zeolit Y), dapat disimpulkan bahwa struktur zeolit Y telah berhasil disintesis. Namun, perbedaan intensitas dan keberadaan puncak tambahan menunjukkan bahwa tingkat kristalinitas dan kemurnian material masih belum optimal.

Hasil Analisa Kualitatif SEM

Hasil analisis morfologi zeolit menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) pada perbesaran $10.000\times$ menunjukkan adanya kristal-kristal kecil yang saling beragregasi membentuk gumpalan dengan ukuran yang bervariasi. Berdasarkan skala yang ditampilkan pada gambar ($10\ \mu\text{m}$) dengan perbesaran $10.000\times$, morfologi zeolit pada gambar menunjukkan bahwa partikel-partikel material tersusun dalam bentuk agregat dengan bentuk yang tidak beraturan dan permukaan yang relatif kasar. Partikel-partikel kecil terlihat saling menempel dan membentuk gumpalan yang lebih besar menunjukkan adanya proses aglomerasi selama tahap sintesis atau pengeringan. Selain itu, pada beberapa bagian terlihat kristal dengan bentuk yang lebih terdefinisi dibandingkan partikel lainnya yang menunjukkan kemungkinan terbentuknya struktur kristalin zeolit selama proses sintesis atau perlakuan hidrotermal. Morfologi partikel tampak tidak beraturan (irregular) dengan kecenderungan membentuk agregat padat yang bersifat berpori, serta memiliki permukaan kasar dengan keberadaan mikropori dan mesopori yang terlihat jelas.



Gambar 4. Hasil uji SEM pada zeolit dengan perbesaran $10.000\times$

Perbandingan dengan penelitian terdahulu oleh [20], morfologi zeolit tersusun atas partikel-partikel berukuran sangat kecil yang membentuk agregat atau gumpalan tidak beraturan. Permukaan partikel tampak kasar dan tidak homogen dengan beberapa bagian yang saling menempel sehingga membentuk struktur aglomerasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa partikel zeolit memiliki ukuran yang relatif halus sehingga cenderung mengalami penggumpalan akibat gaya tarik antar partikel selama proses sintesis maupun pengeringan. Selain itu, struktur permukaan yang tidak rata dan berpori mengindikasikan adanya kemungkinan rongga atau celah antar partikel yang dapat berperan dalam meningkatkan luas permukaan serta mendukung kemampuan zeolit dalam proses adsorpsi atau pertukaran ion.

Pada **Gambar 4** tampak adanya beberapa partikel dengan bentuk kristal yang lebih tegas dan ukuran yang lebih besar, meskipun masih terdapat partikel-partikel kecil yang beragregasi di sekitarnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada sampel tersebut kemungkinan terjadi proses pertumbuhan kristal yang lebih baik sehingga sebagian struktur kristalin zeolit mulai terbentuk dengan lebih jelas. Meskipun demikian, fenomena aglomerasi partikel masih terlihat, yang menandakan bahwa partikel zeolit tetap cenderung saling menempel akibat gaya antar partikel selama proses sintesis maupun pengeringan.

Hasil pertukaran ion

Zeolit hasil sintesis abu bagasse digunakan sebagai material untuk menurunkan kesadahan air sumur. Hasil penurunan konsentrasi unsur logam disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Kandungan logam air sumur

Parameter Uji	Hasil		Satuan
	Sebelum	Sesudah	
Ca (Kalsium)	609,25	5,36	mg/L
Mg (Magnesium)	20,94	3,64	mg/L

Hasil analisis *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) menunjukkan bahwa air sumur memiliki tingkat kesadahan yang rendah ditunjukkan dengan kandungan logam Ca sebesar 5,36 mg/L dan logam Mg sebesar 3,64 mg/L. Kandungan logam ini mengalami penurunan signifikan dari pengujian sebelumnya yaitu kandungan logam Ca sebesar 609,25 mg/L dan logam Mg sebesar 20,94 mg/L. Mekanisme penurunan kesadahan air yang disebabkan oleh ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) menggunakan zeolit terjadi melalui proses pertukaran ion (*cation exchange*). Struktur zeolit yang bermuatan negatif akibat substitusi Al^{3+} dalam kerangka silikat memungkinkan adanya kation penyeimbang seperti Na^+ yang mudah dipertukarkan. Ketika air sumur dialirkan melalui zeolit, ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} akan menggantikan ion Na^+ pada situs aktif zeolit karena memiliki afinitas yang lebih tinggi. Proses ini menyebabkan Ca^{2+} dan Mg^{2+} terikat dalam struktur zeolit sehingga konsentrasi ion penyebab kesadahan dalam air menurun secara signifikan [21].

Menurut Peraturan Menteri Republik Indonesia No.492/MENKES/PER/IV/2010, kadar maksimum kesadahan total yang diperbolehkan dalam air minum adalah 500 mg/L. Angka ini mencerminkan konsentrasi gabungan ion-ion penyebab kesadahan yang masih dianggap aman dan tidak berbahaya bagi kesehatan manusia. Dengan demikian, air sumur tersebut sudah memenuhi ketentuan kualitas air minum sesuai Permenkes No. 492/MENKES/PER/IV/2010 sehingga dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari.

Hasil Analisa Kualitatif XRF

Zeolit yang digunakan sebagai media penukar ion selanjutnya dilakukan uji XRF untuk memastikan kandungan ion yang ditukar, disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Komposisi zeolit setelah pertukaran ion

Atom	Persentase (%)
Al	66,11
Si	24,22
Ta	0,03
Zn	0,01
Fe	0,30
Mn	0,04
Ti	0,02
Ca	3,74
K	5,13
Cl	0,31
Other	0,1

Komposisi kimia zeolit sintesis setelah proses pertukaran ion menunjukkan bahwa unsur aluminium (Al) merupakan komponen yang dominan dengan persentase sebesar 66,11%, diikuti oleh

silika (Si) sebesar 24,22%. Kedua unsur tersebut merupakan penyusun utama kerangka aluminosilikat yang membentuk struktur dasar zeolit. Keberadaan Al dan Si dalam jumlah yang tinggi menunjukkan bahwa material yang dihasilkan masih mempertahankan karakteristik utama mineral zeolit, yaitu memiliki kerangka tiga dimensi yang tersusun dari tetrahedra [22].

Selain unsur utama tersebut, terdapat beberapa unsur lain dalam jumlah yang lebih kecil seperti kalium (K) sebesar 5,13% dan kalsium (Ca) sebesar 3,74%. Unsur-unsur ini berperan sebagai kation penyeimbang yang berada di dalam rongga atau pori struktur zeolit. Unsur lain seperti Fe, Mn, Ti, Zn, dan Ta juga terdeteksi dalam jumlah kecil sehingga dapat dikategorikan sebagai unsur minor atau pengotor yang kemungkinan berasal dari bahan baku abu bagasse maupun dari proses sintesis yang dilakukan.

Berdasarkan kedua hasil analisis menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF), komposisi kimia zeolit dari abu bagasse sebelum dan sesudah digunakan sebagai media pertukaran ion menunjukkan adanya perubahan pada beberapa unsur penyusunnya. Komposisi zeolit sebelum digunakan sebagai media penukar ion didominasi oleh unsur aluminium sebesar 63,85% dan silikon sebesar 27,54%. Kedua unsur tersebut merupakan penyusun utama kerangka aluminosilikat yang membentuk struktur kristal zeolit. Selain itu masih terdapat beberapa kation penyeimbang seperti kalsium sebesar 2,09% dan kalium sebesar 6,05% yang berada di dalam rongga atau pori kristal zeolit. Setelah zeolit digunakan dalam proses pengolahan air sadah, komposisi unsur mengalami perubahan. Kandungan kalsium meningkat menjadi 3,74% sedangkan kalium mengalami penurunan menjadi 5,13%. Perubahan ini menunjukkan bahwa zeolit telah berinteraksi dengan ion yang terdapat dalam larutan selama proses pertukaran ion berlangsung. Perubahan komposisi tersebut berkaitan dengan sifat dasar zeolit sebagai material aluminosilikat berpori yang memiliki muatan negatif pada kerangkanya. Muatan negatif ini muncul akibat substitusi atom Si oleh Al dalam struktur kristal. Kondisi tersebut menyebabkan struktur zeolit memerlukan kation penyeimbang seperti Na^+ , K^+ , atau Ca^{2+} untuk menjaga keseimbangan muatan. Kation-kation tersebut tidak terikat kuat pada kerangka kristal sehingga dapat bergerak bebas di dalam pori dan saluran zeolit. Akibatnya kation tersebut dapat dengan mudah dipertukarkan dengan kation lain yang berada dalam larutan [23].

Nilai kapasitas tukar kation berkaitan erat dengan komposisi kerangka zeolit luas permukaan serta ketersediaan situs bermuatan negatif yang berperan dalam mekanisme pertukaran ion. Kapasitas tukar kation disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Kapasitas tukar kation

Parameter	Standar Mutu (meq/100 gr)	KTK (meq/100 gr)	Total
Ca	160	603,89	632,723
Mg		28,8333333	

Hasil analisis menunjukkan bahwa total kapasitas tukar kation zeolit yang diperoleh sebesar 632,72 mg per 100 g yang menunjukkan kemampuan pertukaran ion yang sangat baik. Nilai ini jauh melampaui persyaratan minimum kapasitas tukar kation zeolit alam menurut SNI 01-4697-1998 yaitu sebesar 160 meq/100 g sehingga zeolit hasil sintesis dari abu bagasse dapat dikategorikan memiliki mutu yang baik dan layak digunakan sebagai media penukar ion. Tingginya nilai KTK ini sesuai dengan hasil analisis AAS yang menunjukkan penurunan signifikan konsentrasi ion kalsium dan magnesium setelah proses pertukaran ion berlangsung. Konsentrasi kalsium turun secara drastis dari 609,25 mg/L menjadi 5,36 mg/L sedangkan magnesium menurun dari 20,94 mg/L menjadi 3,64 mg/L yang mengindikasikan bahwa sebagian besar ion penyebab kesadahan berhasil ditukar oleh kation dalam kerangka zeolit. Efektivitas penurunan Ca yang lebih dominan dibandingkan Mg juga berkontribusi besar terhadap nilai KTK total mengingat kalsium merupakan komponen utama penyebab kesadahan air. Hasil ini menegaskan bahwa tingginya kapasitas tukar kation zeolit berhubungan langsung dengan kemampuan material dalam mengikat ion Ca dan Mg secara efektif melalui mekanisme pertukaran kation sehingga mendukung potensi aplikasinya dalam pengolahan air khususnya untuk penurunan kesadahan air sumur [24].

4. Kesimpulan

Peningkatan rasio SiO_2/Al_2O_3 pada kondisi aluminium tetap menyebabkan penurunan kadar air zeolit akibat berkurangnya sifat hidrofilik struktur sementara rasio SiO_2/Al_2O_3 rendah menghasilkan kadar air lebih tinggi karena afinitas yang lebih kuat terhadap molekul air dan peningkatan waktu hidrotermal secara umum memperbaiki pembentukan serta keteraturan pori. Rasio SiO_2/Al_2O_3 juga menentukan kondisi pH awal dan laju penurunannya selama proses hidrotermal di mana rasio rendah mempertahankan suasana basa lebih lama sedangkan rasio tinggi mempercepat tercapainya kondisi pH yang lebih netral akibat konsumsi ion OH^- selama pembentukan kerangka zeolit yang stabil. Zeolit hasil sintesis dari abu bagasse selanjutnya menunjukkan kinerja yang efektif dalam menurunkan kesadahan air melalui mekanisme pertukaran ion dengan penurunan signifikan konsentrasi Ca dari 609,25 mg/L menjadi 5,36 mg/L dan konsentrasi mg dari 20,94 menjadi 3,64 mg/L.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. Setiawan, J. N. Hanun, and A. E. Afiuddin, "Sintesis dan Karakterisasi Zeolit dari Abu Bagasse Sebagai Adsorben Logam Berat Cu(II)," *J. Presipitasi*, vol. 17, no. 1, pp. 85–95, 2020.
- [2] L. U. Widodo, G. A. Soedjono, and L. P. Pratiwi, "Rasio Abu Bagasse Dengan NaOH Terhadap Proses Pengambilan Silika," *J. Tek. Kim.*, vol. 11, no. 2, pp. 42–45, 2017.
- [3] Arnelli, N. Afifah, N. Rizki, T. Windarti, and Y. Astuti, "Synthesis of Zeolite from Sugar Cane as Detergent Builder: Variation of Si/Al Ratio and Hydrothermal Time," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 21, no. 1, pp. 24–28, 2018.
- [4] S. Ali, S. Amalia, and A. G. Fasya, "Synthesis and Characterization of Zeolite Y From Bagasse Ash with Hydrothermal Temperatures Variations Using The Sol-Gel Method," *Alchemy*, vol. 4, no. 1, pp. 88–92, 2015, doi: 10.18860/al.v4i1.3069.
- [5] R. Ulandari, L. Muis, and H. Suryadri, "Pengaruh Waktu Terhadap Karakteristik Zeolit Sintesis Daun Bambu (*Gigantochloa Atter*) Menggunakan Metode Hidrotermal dan Aplikasinya Terhadap Penyerapan Ion Logam Mn^{2+} ," *J. Teknol. dan Inov. Ind.*, vol. 05, no. 01, pp. 34–039, 2024.
- [6] A. Zahro, S. Amalia, T. K. Adi, and N. Aini, "Sintesis Dan Karakterisasi Zeolit Y Dari Abu Ampas Tebu Variasi Rasio Molar SiO_2/Al_2O_3 Dengan Metode Sol Gel Hidrotermal," *Alchemy*, no. 1, 2015, doi: 10.18860/al.v0i1.2912.
- [7] J. Dongoran, P. Sulistiawati, S. Y. Simangunsong, P. G. R. Paksi, and M. H. Pasaribu, "Perkembangan Zeolit Sebagai Katalis Alam Potensial," *J. Jejaring Mat. dan Sains*, vol. 3, no. 2, pp. 28–39, 2021.
- [8] A. Arnelli, B. Y. Fathoni, T. I. Prastyo, A. Suseno, and Y. Astuti, "Synthesis of Zeolite from Bagasse and Rice Husk Ashes as Surfactant Builder on Detergency Process: Variation of NaOH Concentration for Silica Isolation," *J. Kim. Sains dan Apl.*, vol. 21, no. 3, pp. 139–143, Jul. 2018, doi: 10.14710/jksa.21.3.139-143.
- [9] T. N. Pratama and A. Muttaqin, "Pengaruh Sumber Kation NaOH dan KOH Terhadap Jenis Zeolit Sintetis dari Abu Dasar Batubara dengan Metode Peleburan Alkali Hidrotermal," *J. Fis. Unand*, vol. 6, no. 2, pp. 126–131, 2017, doi: 10.25077/jfu.6.2.126-131.2017.
- [10] D. S. Oliveira, R. B. Lima, S. B. C. Pergher, and V. P. S. Caldeira, "Hierarchical Zeolite Synthesis by Alkaline Treatment: Advantages and Applications," *Catalysts*, vol. 13, no. 2, pp. 1–28, 2023, doi: 10.3390/catal13020316.
- [11] D. K. Nguyen, V. P. Dinh, N. T. Dang, D. T. Khan, N. T. Hung, and N. H. Thi Tran, "Effects of aging and hydrothermal treatment on the crystallization of ZSM-5 zeolite synthesis from bentonite," *RSC Adv.*, vol. 13, no. 30, pp. 20565–20574, 2023, doi: 10.1039/d3ra02552g.
- [12] P. A. S. Moura *et al.*, "Water adsorption and hydrothermal stability of CHA zeolites with different Si/Al ratios and compensating cations," *Catal. Today*, vol. 390–391, no. November 2021, pp. 99–108, 2022, doi: 10.1016/j.cattod.2021.11.042.
- [13] E. Pérez-Botella, S. Valencia, and F. Rey, "Zeolites in Adsorption Processes: State of the Art and Future Prospects," *Chem. Rev.*, vol. 122, no. 24, pp. 17647–17695, 2022, doi: 10.1021/acs.chemrev.2c00140.
- [14] S. Mintova, J. Grand, and V. Valtchev, "Comptes Rendus Chimie Nanosized zeolites : Quo Vadis?," *Comptes rendus - Chim.*, vol. 19, no. 1–2, pp. 183–191, 2016, doi: 10.1016/j.crci.2015.11.005.

- [15] C. Belviso, "State-of-the-art applications of fly ash from coal and biomass : A focus on zeolite synthesis processes and issues," *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2017, doi: 10.1016/j.peecs.2017.10.004.
- [16] C. Keawkumay *et al.*, "Extraction of silica from sugarcane bagasse ash and its utilization in zeolite 4A synthesis for CO₂ adsorption," *RSC Adv.*, vol. 14, no. 27, pp. 19472–19482, 2024, doi: 10.1039/d4ra02207f.
- [17] A. Alastuey *et al.*, "Synthesis of zeolites from coal fly ash : an overview," vol. 50, pp. 413–423, 2002.
- [18] G. Wu, X. Wang, Y. Yang, L. Li, G. Wang, and N. Guan, "Microporous and Mesoporous Materials Confirmation of NH species in the framework of nitrogen-incorporated ZSM-5 zeolite by experimental and theoretical studies," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 127, no. 1–2, pp. 25–31, 2010, doi: 10.1016/j.micromeso.2009.06.025.
- [19] J. Yu *et al.*, "The synthesis and application of zeolitic material from fly ash by one-pot method at low temperature," *Green Energy Environ.*, vol. 1, no. 2, pp. 166–171, 2016, doi: 10.1016/j.gee.2016.07.002.
- [20] Armayani M, M. Mansur, and Subaer, "Pengaruh Temperatur Dan Komposisi Kimia Terhadap Sintesis Zeolite-Y Berbasis Lempung Dan Abu Sekam Padi," no. 03, pp. 251–258, 2020.
- [21] P. Ghanbarizadeh *et al.*, "Performance Enhancement of Specific Adsorbents for Hardness Reduction of Drinking Water and Groundwater," *Water (Switzerland)*, vol. 14, no. 17, 2022, doi: 10.3390/w14172749.
- [22] R. . S. NIKMAH, "Pengaruh Waktu dan Perbandingan Si/Al terhadap Pembentukan Zeolit A dari Abu Dasar Bebas Karbon dari PLTU PT. IPMOMI dengan Metode Hidrotermal," *J. ZEOLIT Indones.*, vol. 7, no. 1, 2008.
- [23] R. Muntu and R. Rahmadhany, "Variasi Kemampuan Media Zeolit Dalam Menurunkan Kesadahan Air," *Sulolipu Media Komun. Sivitas Akad. dan Masy.*, vol. 24, no. 1, pp. 143–147, 2024, doi: 10.32382/sulo.v24i1.527.
- [24] H. Oktavianty, S. Sunardi, and R. M. A. A. S. Wardani, "Sintesis Zeolit Dari Ekstrak Sekam Padi Dan Kaleng Bekas Sebagai Adsorben Penurunan Kesadahan Air," *J. Ilm. Rekayasa Pertan. dan Biosist.*, vol. 9, no. 2, pp. 185–192, 2021, doi: 10.29303/jrpb.v9i2.293.