JURNAL KIMIA MULAWARMAN
Vol 23, No. 2, Jan - Jun 2026 pp. 70-78
https://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/JKM
P-ISSN 1693-5616 E-ISSN 2476-9258

Synthesis and Characterization of Zeolite from Fly Ash Waste using Low-Temperature Hydrothermal Method

Enjel Elya Resha [a], Naswa Ayu Andhita [a], Syahrani Riana Dewi [a], Dimas Pramudita [a], Rendy Muhamad Iqbal [a,b,c], Riandy Putra [a,*]

a Department of Chemistry, University of Palangka Raya, Jl. Yos Sudarso, Palangka Raya, Kalimantan Tengah, Indonesia
b Department of Chemistry, Faculty of Science, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia
c Advanced Membrane Technology Research Center (AMTEC), Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru, Malaysia
* Corresponding Author: riandy@mipa.upr.ac.id

ABSTRACT

This study focuses on the synthesis of zeolite from fly ash using a low-temperature hydrothermal method through three main stages: pre-treatment, silica extraction, and zeolite formation. The product was characterized using X-ray Diffraction (XRD) and Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). XRD analysis showed dominant diffraction peaks at 2θ = 18.34°, 20.36°, and 26.93°, corresponding to zeolite A phases. Restructure of the peak at 18.35° suggests the presence of zeolite A, similarities to other aluminosilicate phases such as $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ were also noted, indicating the potential co-existence of multiple phases. The crystallinity of the sample was determined to be 60.88%, with an average crystallite size of 35.77 nm. The FTIR spectra confirmed the presence of Si–O and Al–O vibrations that are characteristic of aluminosilicate frameworks. These findings indicate that fly ash can be effectively converted into useful zeolitic materials. This process supports the development of sustainable materials for potential material applications in catalysis, adsorption, and environmental remediation.

This is an open-access article under the CC–BY-SA license.

OPEN ACCESS

Article History
Received 2025-08-08
Revised 2025-11-11
Accepted 2026-05-04
Publish 2026-05-31

Keywords
Fly ash,
Zeolite,
Low-temperature hydrothermal,
Aluminosilicate.

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki potensi besar dalam pengembangan material zeolit, mengingat posisinya yang berada di kawasan cincin api pasifik yang kaya akan mineral vulkanik [1]. Zeolit merupakan material aluminosilikat berpori yang memiliki struktur kristal tiga dimensi dan tersusun atas unit tetrahedral TO_4 (T = Si atau Al) dengan nilai berbeda, sehingga menghasilkan 253 jenis topologi kerangka zeolit yang membentuk saluran dan rongga berukuran molekuler [2], [3]. Struktur khas ini memberikan zeolit kemampuan selektif dalam proses adsorpsi, pertukaran ion, dan katalisis, sehingga menjadikannya material yang sangat penting dalam berbagai sektor, termasuk pertanian, farmasi, pemurnian air, hingga industri energi [4]–[7]. Permintaan terhadap zeolit terus meningkat, seiring dengan berkembangnya teknologi dan kebutuhan akan material fungsional yang efisien serta ramah lingkungan. Di sisi lain, ketergantungan pada zeolit alam yang kualitasnya tidak selalu konsisten dan perlu proses aktivasi mendorong perlunya pengembangan zeolit sintetis yang dapat dikontrol secara struktur dan sifat [8], [9].

Salah satu pendekatan yang mendapat perhatian adalah sintesis zeolit berbasis limbah industri, khususnya *fly ash*, yakni residu padat dari pembakaran batu bara yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam jumlah tinggi [10], [11]. Berdasarkan penelitian sebelumnya [12], [13], dilaporkan bahwa *fly ash* mengandung senyawa oksida lain seperti

silikon oksida (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), kalsium oksida (CaO) dan besi oksida (Fe_2O_3). Kandungan silikon oksida dan aluminium oksida yang tinggi berpotensi digunakan sebagai bahan baku untuk produksi material berbasis aluminosilikat seperti zeolit. Transformasi *fly ash* menjadi zeolit bukan hanya memberikan solusi terhadap permasalahan limbah, tetapi juga menghasilkan produk bernilai tambah dengan karakteristik yang kompetitif.

Beberapa studi telah melaporkan bahwa zeolit dapat disintesis dari *fly ash* melalui berbagai metode, seperti metode hidrotermal [13], [14], alkali fusi [15], [16], dan sol-gel [17]. Di antara metode-metode tersebut, metode hidrotermal menjadi pilihan unggul karena kemampuannya menghasilkan zeolit dengan kemurnian tinggi, struktur kristalin yang baik, serta penggunaan suhu yang relatif rendah, yaitu sekitar 100 °C [18]. Metode ini juga memungkinkan kontrol yang baik terhadap parameter sintesis seperti suhu, waktu reaksi, rasio molar prekursor, dan pH larutan, sehingga cocok untuk mengakomodasi variasi komposisi kimia *fly ash* yang sering kali heterogen [19], [20]. Berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [21], melaporkan keberhasilan sintesis zeolit X dari bahan kimia murni menggunakan metode hidrotermal pada suhu 75 °C selama 4 jam. Di sisi lain, penelitian yang dilakukan oleh [22], menunjukkan bahwa zeolit X dapat disintesis pada suhu 75 °C selama 5 jam dengan variasi sumber Al_2O_3. Namun, penelitian-penelitian tersebut tidak menggunakan *fly ash* sebagai sumber silika dan alumina serta tidak menjelaskan secara rinci kondisi optimum sintesis, terutama terkait suhu dan waktu reaksi, sehingga informasi mengenai batas minimum suhu dan waktu yang efektif untuk pembentukan struktur zeolit masih terbatas.

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengembangan metode hidrotermal bersuhu rendah (75 °C) dengan waktu reaksi lebih singkat (3 jam) yang belum pernah dilaporkan dan kontrol rasio molar prekursor kimia yang teroptimasi. Pendekatan ini menawarkan kebaruan berupa evaluasi efektivitas suhu rendah pada sintesis zeolit berbasis *fly ash*, sekaligus mengkombinasikan tahapan *pre-treatment* dan ekstraksi silika terpisah untuk meningkatkan kemurnian prekursor. Proses sintesis melibatkan tiga tahapan utama: (1) *pre-treatment* untuk mempersiapkan bahan baku; (2) ekstraksi silika untuk meningkatkan kemurnian prekursor; dan (3) sintesis zeolit dengan kontrol rasio molar pereaksi. Pendekatan ini tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi, tetapi juga memberikan peluang sintesis zeolit yang lebih selektif dan ramah lingkungan, sehingga diharapkan dapat memperluas strategi konversi limbah *fly ash* menjadi material fungsional yang lebih berkualitas.

2. Metodologi

2.1. Alat dan Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *fly ash* hasil pembakaran batu bara sebagai bahan baku utama, serta bahan kimia berupa NaOH (p.a), $Al(OH)_3$ (p.a), HCl (p.a), dan air suling. Kertas saring digunakan untuk proses pemisahan padatan. Sementara, alat-alat yang digunakan adalah *magnetic stirrer*, *hot plate*, gelas ukur, gelas *beaker*, corong kaca, batang pengaduk, spatula, termometer, timbangan analitik, oven, *X-ray Diffraction* (XRD) merek PANalytical tipe X'Pert PRO dengan sinar Cu-Kα pada panjang gelombang λ = 1,5406 Å, dengan tegangan 40 kV dan arus 30 mA, dalam rentang sudut 2θ antara 5 hingga 55° dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) merek Shimadzu tipe IR Prestige21 dengan metode teknik KBr pada rentang bilangan gelombang 4000-400 cm^{-1}. Tingkat kristalinitas dari sampel dihitung berdasarkan persamaan (1) dengan mengacu pada [7]:

$$\%\ Kristalinitas\ = \frac{(\Sigma\ Jumlah\ luas\ daerah\ kristalin)}{(\Sigma\ Jumlah\ luas\ seluruh\ puncak\ difraksi)} \times 100\% \quad (1)$$

2.2. Prosedur

Pada penelitian ini, sintesis zeolit dari *fly ash* dilakukan melalui 3 tahap, diantaranya adalah sebagai berikut:

2.2.1. Persiapan Bahan Baku (Pre-treatment)

Sebanyak 50 gram *fly ash* dimasukkan ke dalam gelas *beaker* berisi 300 mL larutan HCl 1 M. Campuran ini kemudian dipanaskan pada suhu 80 °C selama 60 menit sambil diaduk

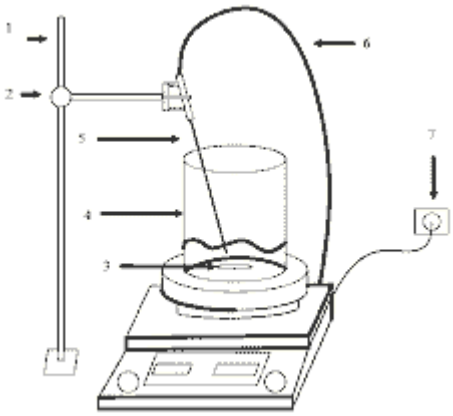
menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan konstan. Setelah proses selesai, campuran disaring menggunakan kertas saring. Residu *fly ash* hasil penyaringan dicuci dengan air suling hingga pH mencapai kondisi netral (pH ± 7), lalu dikeringkan untuk digunakan pada tahap berikutnya.

2.2.2. Ekstraksi Silika

Sebanyak 50 gram *fly ash* hasil *pre-treatment* dicampurkan dengan 300 mL larutan NaOH 1 M dalam gelas *beaker*. Campuran diaduk dengan *magnetic stirrer* dan dipanaskan pada suhu 80 °C selama 2 jam. Setelah pemanasan selesai, campuran disaring dan filtratnya dikumpulkan. Filtrat kemudian ditambahkan larutan HCl 1 M secara bertahap hingga pH mencapai netral sehingga terbentuk *silica gel*. Endapan *silica gel* kemudian disaring, dicuci dengan air suling sampai pH netral, lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C hingga diperoleh silika murni.

2.2.3. Sintesis Zeolit

Proses sintesis zeolit mengacu pada metode [21] dengan rangkaian alat yang dapat dilihat pada Gambar 1. Dalam penelitian ini, rasio yang digunakan adalah 0,5 mol NaOH 2 N dalam 17,5 mol air. Sebanyak 250 mL larutan NaOH 2 N dilarutkan ke dalam 315 mL air hingga homogen. Kemudian, sebanyak 0,5 mol (setara dengan 39 gram) $Al(OH)_3$ ditambahkan, bersama dengan silika murni yang telah disiapkan sebelumnya. Campuran tersebut dipanaskan pada suhu 75 °C selama 3 jam untuk proses sintesis zeolit. Setelah reaksi selesai, campuran disaring untuk memperoleh endapan zeolit. Endapan yang diperoleh kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C hingga mencapai berat konstan. Hasil zeolit kering selanjutnya dianalisis menggunakan *X-ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk karakterisasi struktur dan gugus fungsional.



Gambar 1. Rangkaian alat sintesis zeolit [22]

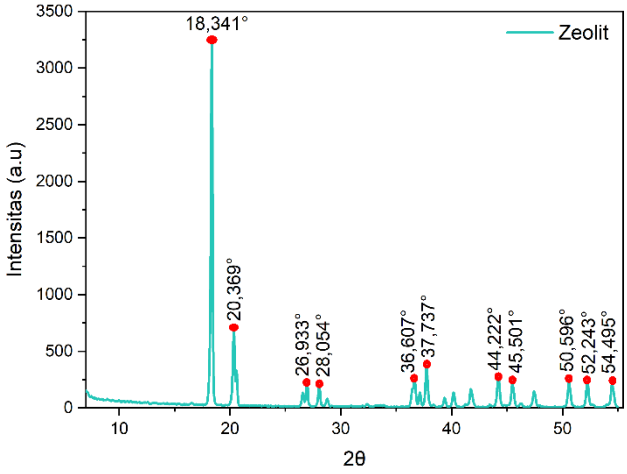
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis XRD

Proses sintesis zeolit dari *fly ash* dilakukan menggunakan metode hidrotermal yang melibatkan penggunaan larutan NaOH untuk melarutkan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dari *fly ash*. Proses ini bertujuan untuk membentuk kerangka aluminosilikat yang akan membentuk struktur kristal zeolit. Untuk mengidentifikasi struktur kristal dan keberadaan mineral residual, analisis XRD dilakukan pada material zeolit hasil sintesis. Difraksi sinar-X digunakan untuk karakterisasi dengan tujuan mengidentifikasi fase kristal serta mengukur intensitas hasil sintesis. Pola difraksi dilakukan dalam rentang sudut 2θ antara 5-55°. Hasil difraktogram sintesis yang didapat kemudian dicocokkan dengan titik puncak setiap sudut referensi zeolit standar. Pada Gambar 2 menunjukan puncak XRD yang didapatkan. Grafik XRD yang diperoleh menunjukkan puncak difraksi utama pada sudut 2θ = 18,34° dengan intensitas relatif sebesar 100%. Puncak ini semula diasumsikan sebagai ciri khas zeolit A, namun hasil perbandingan lebih lanjut menunjukkan kemiripan kuat dengan puncak dari kaolinit atau $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ sebagaimana dilaporkan oleh [23]. Pola difraksi memperlihatkan dua puncak dominan pada 18,34° dan 20,36°, disertai beberapa puncak berintensitas rendah. Puncak 18,34° memiliki

 ISSN 2476-9258

intensitas tertinggi dan menunjukkan kemiripan dengan puncak $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, bersama dengan puncak 26,93°. Sementara itu, puncak 20,36° menyerupai pola difraksi kuarsa (SiO_2) dari referensi yang sama. Keseluruhan pola puncak tersebut juga sesuai dengan karakteristik Fe-Al-SiO_2 (FAS) *poly-coagulants* berbentuk *plane of quartz* yang sejalan dengan JCPDS No. 46-1045 [23].



Gambar 2. Grafik XRD dari sintesis zeolit dari *fly ash*

Dibandingkan dengan hasil penelitian [21], yang melaporkan kristalinitas zeolit X menggunakan metode hidrotermal pada suhu 75 °C selama 4 jam, nilai kristalinitas dalam penelitian ini tergolong sedikit lebih rendah. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh waktu reaksi yang lebih singkat (3 jam) yang digunakan dalam penelitian ini. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun kristalinitas belum optimal, pendekatan suhu rendah masih mampu menghasilkan struktur kristalin yang cukup kompetitif secara dimensi, namun perlu penyempurnaan pada parameter waktu dan rasio molar prekursor untuk meningkatkan fase zeolit murni. Sehingga, meskipun sintesis menghasilkan padatan kristalin dengan ukuran kristal rata-rata 35,77 nm dan kristalinitas sebesar 60,88% (Tabel 1), belum dapat disimpulkan secara pasti bahwa fase zeolit A terbentuk secara dominan. Keberadaan puncak-puncak XRD yang justru sesuai dengan kaolinit dan kuarsa mengindikasikan bahwa struktur zeolit belum terbentuk sempurna, atau bahwa sintesis menghasilkan fase campuran yang didominasi oleh mineral residu dari *fly ash*.

Tabel 1. Hasil karakterisasi XRD

(data *smoothing* 5 pts)

No.	Posisi Puncak (2θ)	FWHM	Ukuran Kristal (nm)	Kristalinitas (%)
1.	18,34	0,182	44,24	60,88
2.	20,36	0,325	24,82	60,88
3.	26,93	0,198	41,27	60,88
4.	28,05	0,183	44,64	60,88
5.	36,60	0,346	24,17	60,88
6.	37,73	0,227	37,01	60,88
7.	44,22	0,238	36,03	60,88
8.	45,50	0,241	35,81	60,88
9.	50,59	0,248	35,43	60,88
10.	52,24	0,240	36,93	60,88
11.	54,49	0,270	33,11	60,88
	Rata-rata		35,77	

Selain puncak utama, grafik XRD (Gambar 2) juga menunjukkan beberapa puncak minor pada sudut 26,56°, 36,42°, dan 40,17°, yang teridentifikasi sebagai mineral residual, seperti kuarsa (SiO_2) dan *mullite* ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$). Keberadaan mineral ini menunjukkan bahwa

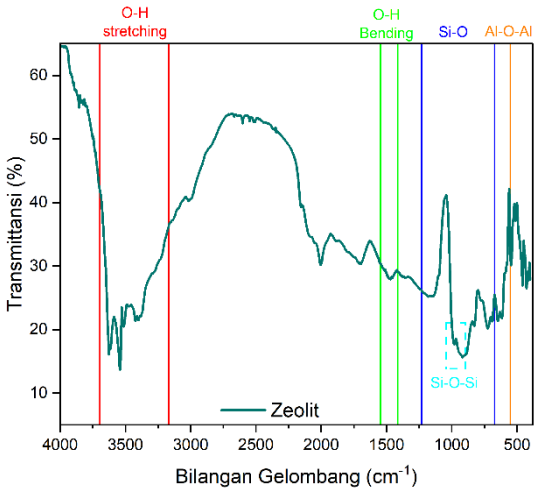
 ISSN 2476-9258

meskipun sebagian besar *fly ash* telah terkristalisasi menjadi zeolit, proses sintesis belum sepenuhnya menghilangkan fase *inert* yang ada dalam *fly ash*. Puncak-puncak ini berfungsi sebagai indikator bahwa parameter proses sintesis, seperti waktu reaksi atau konsentrasi larutan NaOH masih menunjukkan keterbatasan untuk meningkatkan kemurnian hasil sintesis. Salah satu faktor yang mempengaruhi hasil sintesis adalah durasi reaksi. Dalam penelitian ini, waktu reaksi yang digunakan adalah 3 jam. Namun, grafik XRD menunjukkan bahwa waktu ini belum cukup untuk menghasilkan kristalisasi yang sempurna, mengingat keberadaan puncak difraksi minor. Hal ini sejalan dengan temuan [24], yang melaporkan bahwa waktu sintesis yang lebih lama (>5 jam) dapat meningkatkan kristalinitas dengan memberikan lebih banyak waktu untuk pembentukan kristal zeolit.

Hasil analisis XRD yang ditemukan dalam penelitian ini sejalan dengan temuan [22] yang juga melaporkan puncak difraksi utama pada rentang sudut 2θ = 18°-28°. Namun, intensitas puncak utama pada 18,34° dalam penelitian ini sedikit lebih rendah dibandingkan dengan yang dilaporkan, mungkin disebabkan oleh perbedaan komposisi *fly ash* atau variasi parameter proses sintesis, seperti suhu reaksi dan konsentrasi larutan alkali. Penelitian yang dilakukan oleh [21] sebelumnya juga menunjukkan bahwa rasio molar Si/Al yang ideal berada dalam rentang 1-2 dapat menghasilkan fase zeolit X dengan struktur kristal yang terorganisasi secara sempurna. Keberadaan mineral residual seperti kuarsa dan *mullite* dalam hasil sintesis menunjukkan bahwa meskipun *fly ash* sebagian besar telah berhasil dikristalisasi, penghilangan fase *inert* dari *fly ash* masih dapat ditingkatkan. Oleh karena itu, diperlukan optimasi lebih lanjut pada parameter sintesis, seperti suhu, konsentrasi alkali, dan waktu reaksi, untuk memaksimalkan konversi *fly ash* menjadi zeolit berkualitas tinggi.

3.2. Spektra FTIR

Evaluasi jenis ikatan yang terbentuk terdeteksi menghasilkan beberapa fase mineral dari sintesis zeolit menggunakan *fly ash* yang terlihat pada Gambar 3. Spektrum FTIR ini menunjukkan beberapa puncak yang terbentuk selama proses sintesis, seperti pada spektra tajam yang lebar pada rentang 3600-3000 cm^{-1} yang menunjukkan adanya gugus hidroksil (–OH) *stretching* dan *bending* pada rentang 1600-1500 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya penyerapan air [25].



Gambar 3. Hasil spektra FTIR zeolit dari *fly ash*

Hal ini juga disinyalir karena adanya Si–O–H yang cacat dalam pembentukannya sehingga menyatu dengan karakteristik dari –OH *stretching* [26]. Selain itu, pada rentang kisaran 650-540 cm^{-1}, dapat ditunjukkan bahwa terdapat vibrasi yang cocok dengan kerangka ferrierit silika dan sesuai dalam pembentukan zeolit dari *fly ash*. Selain itu, beberapa puncak pada 1000-670 cm^{-1} memiliki kekhasan vibrasi yang sesuai dengan Si–O. Kemudian, terdapat rentang pada 994-915 cm^{-1} yang mengindikasikan ikatan Si–O–Si serta adanya puncak sekitar 576 cm^{-1} yang menunjukkan vibrasi ikatan Al–O–Al. Pada reaksi hidrotermal, umumnya zeolit akan terbentuk

dari rangka Si dan Al yang berasal dari *fly ash*. Adanya gugus –OH yang banyak juga mengindikasikan adanya molekul air yang hadir pada permukaan zeolit [27].

Tabel 2. Ringkasan serapan spektrum FTIR

No.	Bilangan Gelombang (cm^{-1})	Intensitas	Gugus Fungsional
1.	3600-3000	Kuat, lebar	Vibrasi regangan –OH dari air teradsorpsi dan gugus silanol
2.	1600-1500	Sedang	Vibrasi bending H–O–H (air molekul terikat)
3.	994-915	Kuat	Regangan asimetris Si–O–Si
4.	650-540	Lemah	Vibrasi kerangka zeolit (T–O bending: T = Si, Al)
5.	576	Sedang	Vibrasi regangan Al–O–Al

Data FTIR yang diringkas dalam Tabel 2 menunjukkan adanya gugus fungsional utama yang relevan dengan pembentukan struktur zeolit. Pita serapan kuat pada rentang 3600-3000 cm^{-1} dan 1600-1500 cm^{-1} mengindikasikan keberadaan air teradsorpsi dan gugus –OH, yang umum ditemukan pada zeolit hasil sintesis hidrotermal. Pita khas pada 994-915 cm^{-1} merupakan ciri kuat dari regangan Si–O–Si, yang menandakan terbentuknya kerangka aluminosilikat. Kehadiran vibrasi Al–O–Al pada 576 cm^{-1} dan vibrasi kerangka zeolit pada 650-540 cm^{-1} mendukung interpretasi bahwa pembentukan struktur zeolit telah terjadi, meskipun belum sepenuhnya murni. Kombinasi spektra ini memperkuat temuan XRD, namun juga menunjukkan bahwa fase zeolit A mungkin belum mendominasi struktur kristalin secara penuh.

3.3. Evaluasi Parameter Sintesis

Secara keseluruhan, proses sintesis zeolit dari *fly ash* menggunakan metode hidrotermal suhu rendah masih terdapat mineral residual seperti kuarsa dan *mullite* yang menunjukkan bahwa sintesis belum optimal. Pengoptimalan parameter seperti waktu reaksi, suhu, dan rasio larutan alkali perlu dilakukan untuk meningkatkan tingkat kristalinitas dan kemurnian zeolit yang dihasilkan. Penelitian lebih lanjut tentang variasi komposisi *fly ash* dan pengaruh parameter sintesis juga dapat membuka peluang aplikasi material ini di bidang industri. Proses sintesis zeolit dari *fly ash* menggunakan metode hidrotermal melibatkan serangkaian reaksi kimia yang kompleks, terutama reaksi antara silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) yang terkandung dalam *fly ash* dengan larutan NaOH. Reaksi awal yang terjadi adalah pelarutan silika dan alumina oleh NaOH untuk membentuk larutan natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium aluminat ($NaAlO_2$). Reaksi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$SiO_2 + 2\ NaOH \rightarrow Na_2SiO_3 + H_2O$$

$$Al_2O_3 + 2\ NaOH \rightarrow 2\ NaAlO_2 + H_2O$$

Larutan natrium silikat dan natrium aluminat yang terbentuk selanjutnya bereaksi dalam kondisi hidrotermal pada suhu tinggi untuk membentuk kerangka aluminosilikat zeolit. Dalam kondisi ini, mekanisme pembentukan zeolit diawali dengan nukleasi, dimana ion-ion silika (SiO_4^{4-}) dan alumina (AlO_4^{5-}) berinteraksi melalui jembatan oksigen untuk membentuk unit primer zeolit. Unit-unit primer ini kemudian berkondensasi menjadi kerangka kristal tiga dimensi yang terorganisasi. Mekanisme ini melibatkan polimerisasi reaktif yang menghasilkan struktur zeolit spesifik, seperti zeolit A, tergantung pada rasio molar Si/Al dan kondisi reaksi [8]. Reaksi pembentukan kerangka aluminosilikat dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$n Na_2SiO_3 + m NaAlO_2 + H_2O \rightarrow \text{Zeolit} + H_2O$$

Faktor pH berperan sangat penting dalam menentukan arah reaksi serta jenis zeolit yang terbentuk selama proses sintesis. Pada penelitian ini, campuran larutan pada tahap awal sintesis zeolit memiliki pH sekitar 4 yang menunjukkan kondisi asam. Seiring berlangsungnya proses reaksi, pH tersebut secara bertahap meningkat hingga mencapai kondisi netral hingga basa. Perubahan pH ini mengindikasikan terjadinya penyesuaian kimiawi dalam sistem, yang berkontribusi terhadap pembentukan struktur kristal zeolit secara lebih stabil dan teratur. Pada pH basa (diatas 12), reaksi lebih cenderung membentuk fase zeolit A karena ion-ion silika dan alumina lebih terlarut, memungkinkan pembentukan kerangka aluminosilikat yang homogen. Namun, jika pH kurang optimal, produk sampingan seperti kuarsa dan *mullite* dapat terbentuk, seperti yang diamati pada puncak minor di grafik XRD (Gambar 2). Keberadaan kuarsa (SiO_2)

dalam produk akhir menunjukkan bahwa tidak semua silika berhasil larut dan terlibat dalam pembentukan zeolit. Selain itu, suhu reaksi memengaruhi kinetika pembentukan zeolit. Meskipun suhu 75 °C yang digunakan dalam penelitian ini berada dalam rentang optimal pembentukan zeolit menurut [28] yakni antara 70-90 °C untuk menghasilkan struktur pori yang terorganisasi. Hasil sintesis pada penelitian ini belum menunjukkan pembentukan zeolit yang sempurna, sebagaimana ditunjukkan oleh kristalinitas yang masih relatif rendah dan kemungkinan koeksistensi fase lain. Sehingga, keberadaan mineral residual menunjukkan bahwa durasi reaksi mungkin masih perlu diperpanjang untuk memastikan seluruh silika dan alumina terpolimerisasi menjadi kerangka zeolit. Dengan memahami reaksi dan mekanisme pembentukan ini, optimasi lebih lanjut pada parameter sintesis seperti pH, waktu reaksi, suhu, dan rasio molar Si/Al dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas zeolit yang dihasilkan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sintesis zeolit dari *fly ash* melalui metode hidrotermal suhu rendah (75°C) selama 3 jam mampu menghasilkan material kristalin dengan ukuran kristal rata-rata sebesar 35,77 nm dan kristalinitas sebesar 60,88%. Namun, berdasarkan hasil karakterisasi XRD, belum dapat disimpulkan secara pasti bahwa fase zeolit A terbentuk secara dominan. Puncak utama pada 2θ = 18,34°, yang awalnya diasumsikan sebagai indikasi zeolit A, menunjukkan kemiripan kuat dengan puncak kaolinit atau $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Selain itu, puncak-puncak lain juga menunjukkan adanya mineral residual seperti kuarsa (SiO_2) dan *mullite* ($3Al_2O_3{\cdot}2SiO_2$), yang mengindikasikan bahwa proses kristalisasi belum sepenuhnya optimal. Spektrum FTIR turut mendukung temuan ini dengan memperlihatkan keberadaan gugus –OH, Si–O–Si, dan Al–O–Al, yang merupakan karakteristik umum struktur zeolit, namun belum cukup untuk memastikan terbentuknya struktur zeolit A secara dominan. Keberadaan fase-fase non-zeolitik menunjukkan bahwa beberapa parameter proses sintesis seperti waktu reaksi, suhu, rasio molar Si/Al, serta konsentrasi larutan alkali masih diperlukan penyempurnaan. Durasi reaksi 3 jam yang digunakan dalam penelitian ini kemungkinan belum cukup untuk menyelesaikan proses kristalisasi secara sempurna. Meskipun telah terbentuk material kristalin dari *fly ash*, hasil sintesis belum menunjukkan dominasi struktur zeolit murni. Optimasi lebih lanjut pada parameter sintesis sangat diperlukan untuk meningkatkan kemurnian dan kualitas zeolit, sekaligus memaksimalkan konversi *fly ash* menjadi material bernilai tinggi.

Acknowledgment

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Laboratorium Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Palangka Raya atas fasilitas dan bantuan yang diberikan selama proses penelitian ini.

References

[1] A. Mustain, G. Wibawa, M. F. Nais, and M. Falah, “Synthesis of zeolite NaA from low grade (high impurities) Indonesian natural zeolite,” *Indones. J. Chem.*, vol. 14, no. 2, pp. 138–142, 2014, doi: 10.22146/ijc.21250.

[2] E. Perez-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.

[3] S. Mardiana, N. J. Azhari, T. Ilmi, and G. T. M. Kadja, “Hierarchical zeolite for biomass conversion to biofuel: A review,” *Fuel*, vol. 309, p. 122119, 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122119.

[4] M. S. Hakim *et al.*, “A review on development of porous aluminosilicate-based zeolite adsorbent for heavy metal pollution treatment,” *J. Sains Mater. Indones.*, vol. 25, no. 2, pp. 85–99, May 2024, doi: 10.55981/jsmi.2024.1076.

[5] F. I. Prihadiyono, W. W. Lestari, R. Putra, A. N. L. Aqna, I. S. Cahyani, and G. T. M. Kadja, “Heterogeneous catalyst based on nickel modified into Indonesian natural zeolite in green diesel production from crude palm oil,” *Int. J. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 931–943, 2022, doi: 10.14716/ijtech.v13i4.4695.

[6] R. Putra, W. W. Lestari, F. R. Wibowo, and B. H. Susanto, "Fe/Indonesian natural zeolite as hydrodeoxygenation catalyst in green diesel production from palm oil," *Bull. Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 13, no. 2, pp. 245–255, 2018, doi: 10.9767/bcrec.13.2.1382.245-255.

[7] R. Putra, W. W. Lestari, B. H. Susanto, and G. T. M. Kadja, "Green diesel rich product (C-$_{15}$) from the hydro-deoxygenation of refined palm oil over activated NH_4^+-Indonesian natural zeolite," *Energy Sources, Part A Recover. Util. Environ. Eff.*, vol. 44, no. 3, pp. 7483–7498, 2022, doi: 10.1080/15567036.2022.2113934.

[8] M. Shamzhy, M. Opanasenko, P. Concepción, and A. Martínez, "New trends in tailoring active sites in zeolite-based catalysts," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 48, no. 4, pp. 1095–1149, 2019, doi: 10.1039/C8CS00887F.

[9] J. D. Evans and F.-X. Coudert, "Predicting the mechanical properties of zeolite frameworks by machine learning," *Chem. Mater.*, vol. 29, no. 18, pp. 7833–7839, Sep. 2017, doi: 10.1021/acs.chemmater.7b02532.

[10] Z. T. Yao *et al.*, "A comprehensive review on the applications of coal fly ash," *Earth-Sci. Rev.*, vol. 141, pp. 105–121, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016.

[11] T. W. Manurung, S. U. M. Beladona, M. S. Hakim, L. Tesalonika, R. A. Al-Hadi, and R. M. Iqbal, "Surface modification of fly ash from Asam-Asam coal power plant using stearic acid as hydrophobic inorganic material," *J. Kim. Ris.*, vol. 9, no. 1, pp. 59–68, 2024, doi: 10.20473/jkr.v9i1.57370.

[12] R. M. Iqbal, A. Damsyik, R. Agnestisia, Siswo, N. W. P. M. Sari, and F. 'Adany, "Characteristics and chemical composition of fly ash from Pulang Pisau's power plant as a potential material for synthesis of aluminosilicate materials," *J. Sains dan Terap. Kim.*, vol. 16, no. 2, p. 125, 2022, doi: 10.20527/jstk.v16i2.12191.

[13] R. Putra, Khamidinal, D. Krisdiyanto, and I. Nugraha, "An adsorption of Mn(II) from zeolite coal ditizon modified," *J. Kim. Terap. Indones.*, vol. 17, no. 2, pp. 87–99, 2015, doi: 10.14203/jkti.v17i2.25.

[14] W. W. Lestari, D. N. Hasanah, R. Putra, R. R. Mukti, and K. D. Nugrahaningtyas, "Transformation of Indonesian natural zeolite into analcime phase under hydrothermal condition," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 349, p. 012068, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/349/1/012068.

[15] X. Ren *et al.*, "Synthesis and characterization of a single phase zeolite A using coal fly ash," *RSC Adv.*, vol. 8, no. 73, pp. 42200–42209, 2018, doi: 10.1039/c8ra09215j.

[16] A. A. Shoppert, I. V. Loginova, L. I. Chaikin, and D. A. Rogozhnikov, "Alkali fusion-leaching method for comprehensive processing of fly ash," *KnE Mater. Sci.*, vol. 2, no. 2, p. 89, 2017, doi: 10.18502/kms.v2i2.952.

[17] Z. Wan, G. K. Li, C. Wang, H. Yang, and D. Zhang, "Relating coke formation and characteristics to deactivation of ZSM-5 zeolite in methanol to gasoline conversion," *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 549, pp. 141–151, 2018, doi: 10.1016/j.apcata.2017.09.035.

[18] C. Belviso, L. C. Giannossa, F. J. Huertas, A. Lettino, A. Mangone, and S. Fiore, "Synthesis of zeolites at low temperatures in fly ash-kaolinite mixtures," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 212, pp. 35–47, 2015, doi: 10.1016/j.micromeso.2015.03.012.

[19] E. Alyatikah, Siswo, R. Safitri, T. W. Manurung, and R. M. Iqbal, "Chemical characteristic of fly ash and bottom ash as potential source for synthesis of aluminosilicate-based materials," *Rafflesia J. Nat. Appl. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 160–166, 2022, doi: 10.33369/rjna.v2i2.23935.

[20] S. Buzukashvili *et al.*, "Zeolite synthesis from coal fly ash and its application to heavy metals remediation from water contaminated with Pb, Cu, Zn and Ni ions," *Miner. Eng.*, vol. 209, 2024, doi: 10.1016/j.mineng.2024.108619.

[21] S. K. Masoudian, S. Sadighi, and A. Abbasi, "Synthesis and characterization of high aluminum zeolite X from technical grade materials," *Bull. Chem. React. Eng. Catal.*, vol. 8, no. 1, pp. 54–60, 2013, doi: 10.9767/bcrec.8.1.4321.54-60.

[22] Y. Rieswana, A. N. Aisyah, Sani, and Suprihatin, "Sintesis dan karakterisasi zeolit X dari fly ash batu bara menggunakan metode sintesis pada suhu rendah," *KOVALEN J. Ris. Kim.*, vol. 10, no. 2, pp. 104–113, 2024, doi: 10.22487/kovalen.2024.v10.i2.17028.

[23] Y. Zhang, X. Nie, S. Sun, W. Zhang, X. Fang, and J. Wan, "Preparation and application of Fe-Al-SiO_2 poly-coagulants for removing *Microcystis aeruginosa* from water," *Inorganics*, vol. 11, p. 210, 2023, doi: 10.3390/inorganics11050210.

[24] G. T. M. Kadja *et al.*, "Mesoporogen-free synthesis of hierarchically porous ZSM-5 below 100 °C," *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 226, pp. 344–352, 2016, doi: 10.1016/j.micromeso.2016.02.007.

[25] S. Subhapriya and P. Gomathipriya, "Synthesis and characterization of zeolite X from coal fly ash: A study on anticancer activity," *Mater. Res. Express*, vol. 5, p. 085401, 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aad16c.

[26] Y. Liu, Q. Luo, G. Wang, X. Li, and P. Na, "Synthesis and characterization of zeolite from coal fly ash," *Mater. Res. Express*, vol. 5, p. 055507, 2018, doi: 10.1088/2053-1591/aac3ae.

[27] Y. Kobayashi, F. Ogata, T. Nakamura, and N. Kawasaki, "Synthesis of novel zeolites produced from fly ash by hydrothermal treatment in alkaline solution and its evaluation as an adsorbent for heavy metal removal," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 8, no. 2, p. 103687, 2020, doi: 10.1016/j.jece.2020.103687.

[28] Y. Sugano, R. Sahara, T. Murakami, and T. Narushima, "Hydrothermal synthesis of zeolite A using blast furnace slag," *ISIJ Int.*, vol. 45, no. 6, pp. 937–945, 2005, doi: 10.2355/isijinternational.45.937.