



Sintesis Zeolite-Y berbasis Abu Layang dengan Kombinasi Campuran Alkali Melalui Pendekatan Metode *Solvent-free Reaction*

Aryan Bagus Saputra¹, Rosanina Kartika Santana^{1*}

¹Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang 5 Malang, 65145, Indonesia

*Corresponding author, email: rosanina.kartika.2103326@students.um.ac.id

Paper received: 3-5-2023; accepted: 15-5-2023; published: 31-5-2023

Abstrak

Dalam penelitian ini, sintesis Zeolite-Y dengan memanfaatkan abu layang sebagai bahan baku utama sumber Si dan Al dengan menggunakan pendekatan metode solvent-free reaction. Campuran alkali yang terdiri dari natrium hidroksida (NaOH) dan natrium karbonat (Na_2CO_3) digunakan sebagai agen pengaktivasi untuk mempercepat reaksi sintesis kristal. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui cara sintesis zeolite-Y menggunakan abu layang dengan metode bebas pelarut sebagai teknologi ramah lingkungan yang menjanjikan, memproduksi zeolite berbiaya rendah dengan kapasitas adsorpsi tinggi, mengetahui potensi penggunaan abu layang sebagai alternatif material berharga dari limbah industri, dan mengetahui jenis senyawa yang disintesis melalui karakterisasi dengan XRD serbuk. Proses sintesis diawali dengan pencampuran abu layang dengan campuran alkali, kalsinasi dengan furnace pada suhu 750°C selama 2 jam, penambahan $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, *mechanical grinding*, autoklaf, dan pengovenan. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil sintesis zeolite-Y berwarna kuning kecoklatan dengan berat 9,771 gram dengan %yield 71,93%. Hasil karakterisasi menggunakan XRD serbuk menghasilkan pola yang mengindikasikan kristalinitas yang rendah dengan puncak pada 2θ sebesar 32,34; 24,38, 33,529; dan 37,89.

Kata kunci: zeolite-Y; abu layang; reaksi bebas pelarut

Abstract

In this research, Zeolite-Y was synthesized using fly ash as precursor for Si and Al sources using a solvent-free reaction method approach. An alkali mixture consisting of sodium hydroxide (NaOH) and sodium carbonate (Na_2CO_3) is used as an activating agent to accelerate the crystal synthesis reaction. The aim of this research is to find out how to synthesize zeolite-Y using fly ash using a solvent-free method as an environmentally friendly technology, producing low cost zeolites with high adsorption capacity, knowing the potential for using fly ash as a valuable alternative material from industrial waste, and knowing the types of compounds synthesized through characterization with powder XRD. The synthesis process begins with mixing fly ash with a mixture of alkali, calcination in a furnace at a temperature of 750°C for 2 hours, adding $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, mechanical grinding, autoclaving, and oven. From the research that has been carried out, the results obtained from the synthesis of zeolite-Y are brownish yellow in color weighing 9.771 grams and yield 71.93%. The results of characterization using powder XRD produced a pattern indicating low crystallinity with a peak at 2θ is 32.34; 24.38, 33.529; and 37.89.

Keywords: zeolite-Y; fly-ash; solvent-free reaction

1. Pendahuluan

Zeolite kini menjadi jenis material anorganik dengan sifat adsorpsi yang sangat baik yang digunakan dalam pemisahan. Salah satu contoh dari zeolite adalah zeolite kaya akan silikon, yang disebut sebagai Y. Zeolite-Y merupakan molekul berpori dengan struktur tiga dimensi golongan *Faujasite* (*FAU-type zeolite*) yang memiliki potensi sebagai penukar ion, adsorben, dan katalis (Pangesti et al., 2021). Zeolite-Y memiliki kerangka khas 0,74 nm dengan *supercage* yang saling berhubungan 1,3 nm (Krongkrachang et al., 2019). Selain terdiri dari rangka *supercage* (α -cage), zeolite-Y memiliki rangka β -cage (*sodalite*). Sel satuan zeolite-Y berbentuk kubik ($a = 24,7\text{\AA}$) dengan simetri $Fd\bar{3}m$. Zeolite-Y memiliki fraksi volume rongga sebesar 0,48, dengan rasio kerangka Si/Al antara $1,5 < \text{Si/Al} < 3$ (Karimzadeh et al., 2020). Zeolite-Y menjadi salah satu molekul terpenting dalam industri yang telah banyak digunakan dalam petrokimia, industri *fine chemical*, dan pengolahan air karena stabilitas dan aktivitasnya yang tinggi (Guo et al., 2019).

Zeolite-Y dapat disintesis dengan berbagai macam bahan awal seperti kaolin, batubara, *fly ash* (abu layang), mineral alam, reagen kimia, dan sekam padi (Hosseini Hashemi et al., 2019). Dalam penelitian ini, dipilih *fly ash* (abu layang) sebagai bahan awal karena kandungan silika dan alumuniumnya yang tinggi (Shi & Chang, 2021). Abu layang merupakan hasil dari sisa pembakaran batu bara yang dihasilkan dalam jumlah besar. Abu layang sendiri memiliki struktur kristal fasa kuarsa dan *mullite*.

Abu layang yang digunakan merupakan sisa pembakaran batu bara dari Unit Pembangkit Listrik Tenaga Uap Paiton, Kabupaten Probolinggo, Provinsi Jawa Timur. Pengujian kandungan unsur kimia dilakukan dan diperoleh hasil yang ditunjukkan dalam Tabel 1. Berdasarkan kandungan senyawa kimia yang tercantum dalam Tabel 1, abu layang Paiton dapat dikategorikan dalam kelas F. Hal ini ditunjukkan oleh jumlah kandungan Al_2O_3 , SiO_2 , dan Fe_2O_3 sebesar 74,39%, lebih besar dari 70% (ASTM C 618-96).

Tabel 1. Komposisi pokok dari abu layang Paiton (%massa)

Chemical composition	%mass	Chemical composition	%mass
SiO₂	36.50	SrO	0.17
CaO	19.65	CuO	0.04
Fe₂O₃	19.27	ZrO₂	0.03
Al₂O₃	19.00	ZnO	0.02
SO₃	3.45	HgO	0.02
K₂O	0.90	V₂O₅	0.02
TiO₂	0.71	Rb₂O	0.01
BaO	0.31	Cr₂O₃	0.01
MnO	0.20	Total	100.0%

Potensi zeolite-Y yang besar mendorong para peneliti mencari terobosan baru untuk mengembangkan metode sintesis zeolite-Y yang ramah lingkungan, dengan teknologi efisien, dan kualitas tinggi. Zeolite sintetis diproduksi dengan berbagai metode, misalnya sintesis hijau, hidrotermal, metode fusi, metode *molten salt*, dan metode *microwave* yang menggunakan berbagai bahan kimia, suhu, dan waktu proses (Grabias-Blicharz et al., 2022). Umumnya metode sintesis zeolite-Y yang digunakan adalah sintesis hidrotermal, yang mana pada metode ini digunakan pelarut air dalam jumlah besar. Meski air merupakan pelarut *non-pollutant*, penggunaan berlebihan mengakibatkan berbagai masalah karena penggunaannya

yang berlebih menimbulkan banyak limbah air dimana pada proses sintesisnya dilakukan dalam tekanan *autogenous* dan temperatur yang tinggi (Mei et al., 2021).

Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode *solvent-free reaction*. Reaksi bebas pelarut atau pereaksi padat-padat dapat dilakukan dengan menggunakan reaktan saja untuk mencapai stereoselektivitas tingkat tinggi dalam produk, untuk mengurangi produk sampingan, untuk memaksimalkan laju reaksi. Dalam mencapai produksi yang ramah lingkungan dan meningkatkan taraf ekonomi, limbah industri telah digunakan untuk menyintesis zeolite. Di antaranya, abu layang yang termasuk dalam bahan yang cocok untuk sintesis zeolite karena kandungan silikon dan aluminium yang tinggi. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan dalam menyiapkan serta menyintesis zeolite-Y menggunakan abu layang dengan metode bebas pelarut sebagai teknologi ramah lingkungan yang menjanjikan, memproduksi zeolite berbiaya rendah dengan kapasitas adsorpsi tinggi, serta mengetahui potensi penggunaan abu layang sebagai alternatif material berharga dari limbah industri.

2. Metode

Waktu dan Tempat

Penelitian ini berlangsung pada tanggal 21, 28 Februari, dan 6 Maret 2024 di Laboratorium Kimia Anorganik Universitas Negeri Malang.

Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah kaca arloji, cawan porselen, batang pengaduk, spatula, neraca analitik merk HWH DJ203A, *Beaker glass* 250 mL, *muffle furnace* merk *Thermo Scientific Thermolyne*, cawan krusibel, mortar dan pestle, autoklaf, oven merk Memmert, botol semprot, pipet tetes, kertas indikator universal, corong kaca, XRD serbuk (Rigaku Miniflex 600, Cu K α dengan detektor D/teX ultra1-D yang diperasikan pada 40 kV dan 15 mA) dan kertas saring. Sedangkan bahan-bahan yang dibutuhkan yaitu fly ash (abu layang) Paiton yang dibeli dari PT. Cahyo Setyo Wijaya, padatan natrium hidroksida (NaOH) merk *Merck*, natrium karbonat (Na₂CO₃) anhidrat merk *Merck*, larutan natrium metasilikat (Na₂SiO₃·9H₂O) merk *Merck*, dan akuades.

Prosedur Percobaan

Tahap pertama dalam sintesis zeolite-Y adalah proses kalsinasi. Bahan yang dibutuhkan pada tahap ini yaitu fly ash (abu layang), natrium hidroksida (NaOH), dan natrium karbonat (Na₂CO₃) anhidrat. Awalnya, natrium hidroksida (NaOH) dicampurkan dengan natrium karbonat (Na₂CO₃) anhidrat dengan cara digerus. Lalu campuran alkali tersebut dicampurkan dengan abu layang dengan cara digerus bersamaan. Setelah padatan tercampur, dilakukan proses kalsinasi menggunakan *muffle furnace* merk *Thermo Scientific Thermolyne* dengan kondisi suhu 750°C selama 2 jam.

Tahap kedua yaitu proses penambahan silikon (Si) dalam proses sintesis. Penambahan silikon dilakukan untuk memaksimalkan terbentuknya zeolite-Y yang kaya akan silikon. Bahan kimia yang digunakan sebagai agen silikon adalah natrium metasilikat nonahidrat (Na₂SiO₃·9H₂O). Padatan hasil kalsinasi yang didapatkan ditambahkan dengan natrium metasilikat nonahidrat (Na₂SiO₃·9H₂O) dan dilakukan penggerusan melalui metode

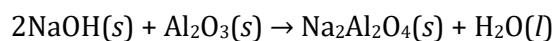
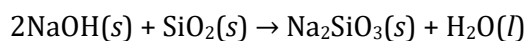
mechanical grinding selama 10 menit. Lalu, hasilnya dipindahkan ke dalam autoklaf dan dimasukkan oven untuk proses *thermal reaction* dengan temperatur 120°C selama 2 jam 30 menit.

Tahap ketiga yaitu proses kristalisasi. Hasil pengovenan menggunakan autoklaf dicuci dengan akuades dan dilakukan penyaringan, dimana filtrat yang didapatkan diukur nilai pH-nya menggunakan kertas indikator universal. Nilai pH untuk zeolite secara umum berkisar antara 12,3 hingga 13,8. Padatan hasil pencucian pada kertas saring kemudian dilakukan pengovenan dengan temperatur 100°C selama 3 jam. Padatan yang didapatkan digerus kembali hingga dihasilkan kristal berbentuk powder. Senyawa kompleks hasil sintesis dikarakterisasi dengan XRD serbuk (Rigaku Miniflex 600, Cu K α dengan detektor D/teX ultra1-D yang diperasikan pada 40 kV dan 15 mA).

3. Hasil dan Pembahasan

Sintesis Zeolite-Y

Sintesis zeolite-Y dilakukan dengan cara mereaksikan abu layang dan campuran garam alkali, yaitu NaOH dan Na₂CO₃. Kombinasi campuran kedua garam tersebut memiliki peran dalam meningkatkan alkalinitas yang sangat mempengaruhi tingkat kristalinitas dan stabilitas struktur zeolit (Patuwan & Arshad, 2021). Selain itu, NaOH berperan sebagai *mineralizer* dan Na₂CO₃ sebagai stabilisator, dimana zeolit memiliki muatan negatif berlebih pada ion alumina dan kation-kation dibutuhkan sebagai pendukung untuk menetralisasi, sehingga kelarutan Si dan Al yang membentuk garam natrium silikat dapat meningkat (Kordala & Wyszowski, 2024). Pencampuran abu layang dan garam alkali dilakukan dengan penggerusan dalam mortar. Abu layang digunakan karena mengandung senyawa oksida logam seperti silika 36,50% (SiO₂) dan alumina 19,00% (Al₂O₃) sehingga digunakan sebagai sumber unsur Si dan Al (Karyawan et al., 2017). Reaksi yang terjadi dalam proses penggerusan adalah pembentukan natrium silikat dan natrium aluminat berdasarkan persamaan reaksi berikut.



Penggerusan menghasilkan padatan coklat tua yang dikalsinasi pada suhu 750°C selama 2 jam untuk menguapkan air dalam pori-pori zeolit sehingga luas permukaannya membesar. Selain itu, zat-zat organik seperti karbon akan hilang dan terjadi *rearrangement* alumina-silika yang tidak stabil menjadi bentuk yang lebih stabil. Padatan hijau dihasilkan sebagai hasil dari perlakuan tersebut. Padatan yang dihasilkan tidak sesuai dengan penelitian oleh Shi & Chang (2021), dimana hasil kalsinasi diperoleh padatan putih keabu-abuan. Hal ini mungkin terjadi karena padatan hasil kalsinasi mengandung kontaminan berupa garam anorganik yang berasal dari abu layang. Abu layang merupakan limbah hasil pembakaran batubara dengan kandungan garam anorganik bervariasi, sehingga memungkinkan ikut bereaksi pada proses kalsinasi. Kemungkinan tersebut dapat dihindari dengan melakukan preparasi abu layang secara *leaching* menggunakan asam kuat untuk melarutkan pengotor-pengotor anorganik dalam

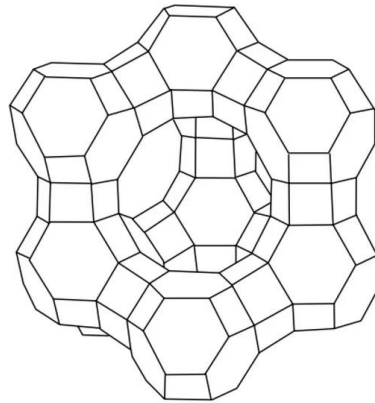
asam (Febrianti et al., 2022). *Leaching* merupakan proses ekstraksi mineral atau zat terlarut dari padatan dengan melarutkannya dalam suatu pelarut yang merupakan pengoksidasi kuat (Sartifa et al., 2022)

Mekanisme lanjutan dari sintesis zeolit adalah penggerusan secara *mechanical grinding*. Mekanisme ini dipilih sebagai interpretasi pendekatan *solvent-free reaction* karena bebas pelarut. Padatan yang diperoleh digerus selama 10 menit dengan penambahan $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Penambahan tersebut bertujuan untuk menambahkan kandungan Si dalam sintesis, sehingga rasionya dapat disesuaikan dengan teori yang menerangkan bahwa zeolite-Y umumnya memiliki kandungan Si yang tinggi (Mohamed et al., 2015).

Zeolite Y yang disintesis dipindahkan dalam autoklaf dan dipanaskan pada suhu 120°C selama 2,5 jam. Tahapan ini dilakukan untuk menyempurnakan dan menyeragamkan pertumbuhan kristal kristal zeolite yang terbentuk. Pemilihan waktu termal disesuaikan dengan kristalinitas tinggi zeolite Y dari bahan alam abu layang dengan waktu termal 24 jam pada suhu 120°C . Namun, waktu pemanasan dikurangi karena keterbatasan pemakaian alat laboratorium. Zeolite-Y yang dihasilkan dari proses ini berupa padatan kuning-coklat. Diduga pada proses yang dilakukan zeolite-Y telah terbentuk sempurna. Secara umum, pembentukan zeolite-Y sesuai dengan persamaan berikut.



Proses lanjutan sintesis zeolite-Y adalah pencucian berulang menggunakan akuades yang bertujuan untuk menghilangkan pengotor dan kelebihan basa tertinggal. Sintesis zeolit dilakukan pada pH 12-14, karena pada pH basa ini terbentuk anion $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ atau AlO_2^- yang merupakan anion pembentuk zeolite yang berasal sumber alumina. Kerangka zeolit juga dipengaruhi oleh keberadaan anion dari silikat. Pada $\text{pH} > 12$, akan terbentuk ion $\text{Si}(\text{OH})_4$, yang merupakan ion utama dalam pembentukan kerangka zeolit (Andarini et al., 2023). Ion-ion silikat dan aluminat merupakan monomer pembentuk kerangka zeolit. Hasil filtrat diukur nilai pH dan dihasilkan pada rentang 12-13. Nilai pH untuk faujasite berkisar antara 12,3 hingga 13,8 (Ocelli & Robson, 1989). Pengeringan lanjutan diperlukan untuk menghilangkan kelebihan air yang terikat pada hasil sintesis. Padatan dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 3 jam. Bentuk umum dari kerangka zeolite-Y ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Framework structure of zeolite-Y

Zeolite-Y hasil sintesis dihitung nilai yield dengan perhitungan sebagai berikut.

Berat kertas saring + zeolite-Y = 10,326 g

Berat kertas saring = 0,555 g

Berat zeolite-Y = (10,326 – 0,555) g

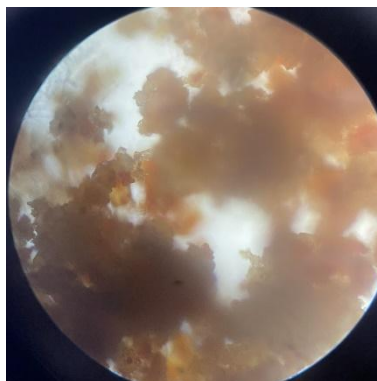
$$= 9,771 \text{ g}$$

Total bahan = (6,304 + 2,251 + 5,029) g = 13,584 g

$$\% \text{ Yield} = \frac{9,771 \text{ g}}{13,584 \text{ g}} \times 100\% = 71,93\%$$

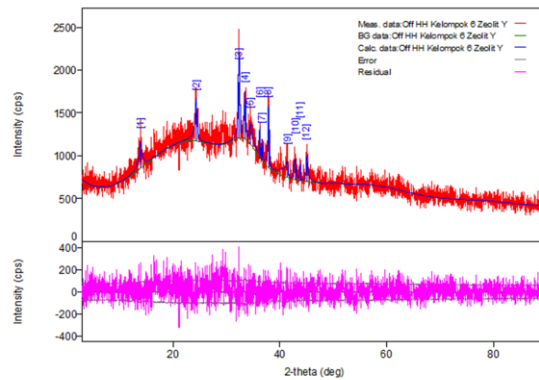
Karakterisasi Zeolite-Y

Zeolite-Y hasil sintesis yang telah didapatkan dilihat strukturnya menggunakan mikroskop, untuk melihat struktur permukaan pada kristal. Perbesaran yang dihasilkan dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Hasil mikroskop Zeolite-Y.

Karakterisasi kristal zeolite-Y menggunakan PXRD (*Powder X-ray Diffraction*). X-ray diffraction secara umum digunakan untuk menentukan komposisi mineral dari senyawa kristalin. Gambaran kristalinitas suatu senyawa atau materi dapat diperoleh melalui difraktogram. Difraktogram dengan pola pemisahan puncak yang jelas, intensitas tinggi, dan ketajaman yang baik menunjukkan kristalinitas yang tinggi. Hasil analisis difraktogram menunjukkan munculnya puncak 2θ yang serupa menunjukkan bahwa zeolit hasil sintesis memiliki jenis mineral yang sama. Selain itu, didapatkan pula informasi terkait tingkat kemurnian dan kristalinitas dari zeolite-Y. Zeolite-Y hasil sintesis dengan yang dikarakterisasi dengan PXRD menunjukkan difraktogram dengan intensitas dan puncak yang berbeda-beda. Difraktogram zeolite-Y hasil sintesis dapat dilihat pada **Gambar 3**.



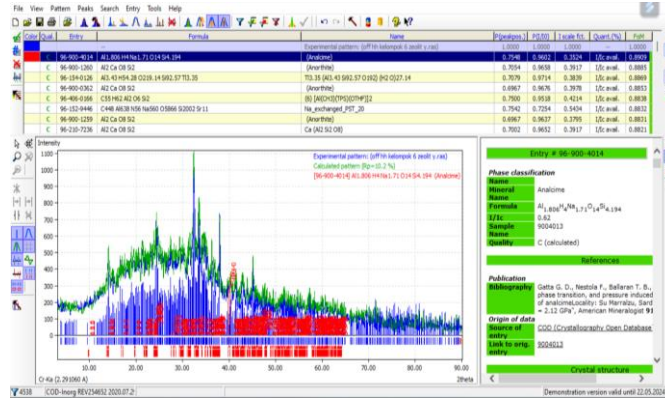
Gambar 3. Pola XRD SZY

Pada **Gambar 3** dihasilkan pola XRD dari hasil sintesis SZY. Pola yang didapatkan menunjukkan zeolite-Y memiliki kristalinitas yang rendah yang dapat dilihat dari pola intensitas yang cenderung melandai. Berdasarkan difraktogram **Gambar 3** zeolite hasil sintesis terdapat campuran dengan zeolite lain yaitu zeolite-P, juga campuran dengan zeolite analcime. Hasil puncak SZY ditampilkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Daftar puncak hasil XRD SZY

No.	2-theta (deg)	d (ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)
1	13.95(5)	6.35(2)	207(42)	0.50(10)
2	24.38(3)	3.649(4)	334(53)	0.42(7)
3	32.34(3)	2.766(3)	659(74)	0.34(3)
4	33.529(19)	2.6705(15)	396(57)	0.28(5)
5	34.55(7)	2.594(5)	160(36)	0.56(9)
6	36.286(12)	2.4737(8)	247(45)	0.15(3)
7	36.66(2)	2.4495(15)	171(38)	0.16(7)
8	37.89(2)	2.3726(15)	553(68)	0.23(4)
9	41.46(3)	2.1761(17)	126(32)	0.74(19)
10	42.90(3)	2.1062(16)	161(37)	0.46(8)
11	43.84(5)	2.063(2)	141(34)	0.18(5)
12	45.03(2)	2.0116(9)	226(43)	0.35(10)

Analisa lanjutan dilakukan dengan *software* “Match” yang diharapkan memberikan informasi lebih lanjut tentang kristal. Hasil analisa ditampilkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Analisa data XRD dari SZY menggunakan Match

Pada **Gambar 4** dilakukan analisa hasil uji PXRD menggunakan *software* Match untuk mengetahui fasa yang terkandung, sistem kristal, dan ukuran kristal dalam sampel. Dilakukan pemilahan spesifik untuk atom Si dan Al karena struktur zeolite-Y memiliki susunan utama atom Si dan Al. Dari hasil uji XRD didapatkan 12 peak, dimana dilakukan indikasi kecocokan tertinggi berupa nilai Figure of Merit (FoM). Ketika nilai FoM semakin mendekati 1, maka dapat dikatakan data eksperimen memiliki kecocokan dengan data referensi. Dari sini dipilih satu peak dengan nilai FoM sebesar 0,8909. FoM tersebut mengarahkan pada kristal analcime dengan rumus kimia $Al_{1,806}H_4Na_{1,71}O_{14}Si_{4,194}$. Data kristal dapat diperoleh dari *Crystallography Open Database* (COD) nomor 9004013. Data disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Data kristal 9004013 pada COD

Space Group	P -1 (2)
Crystal System	Triclinic (Anorthic)
Cell parameters	$a = 13,4464 \text{ \AA}$ $b = 13,3657 \text{ \AA}$ $c = 13,449 \text{ \AA}$ $\alpha = 89,691^\circ$ $\beta = 88,152^\circ$ $\gamma = 90,034^\circ$
FWHM	0,1200
Wavelength	2,291060 \AA
D	34,3833 \AA
2 theta	3,82°
Density	2,40400 g/cm ³

Berdasarkan hasil dan interpretasi data, sintesis zeolite-Y belum berhasil dilakukan. Hal ini kurang sesuai dengan harapan, ketika mencoba untuk menyintesis zeolite-Y (Faujasite) namun proses tersebut menghasilkan zeolite jenis yang berbeda yaitu analcime. Zeolite-Y memiliki rumus kimia $[\text{Na}_x(\text{AlO}_2)_y(\text{SiO}_2)_z \cdot \text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ dan analcime yang terbentuk memiliki rumus kimia $\text{Al}_{1,806}\text{H}_4\text{Na}_{1,71}\text{O}_{14}\text{Si}_{4,194}$. Kemungkinan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti komposisi abu layang, kondisi reaksi yang tidak optimal, atau proses preparasi pra-sintesis yang tidak dilakukan.

Dalam kasus seperti ini, analisis yang cermat diperlukan untuk memahami apa yang menyebabkan hasil yang tidak sesuai. Hal yang dapat dilakukan karakterisasi material abu layang menggunakan teknik seperti difraksi sinar-X, yaitu XRF (X-Ray Fluorescence) untuk menentukan jenis oksida logam yang berada dalam abu layang dan mengevaluasi kandungan Si/Al yang dapat digunakan serta mengetahui jenis garam-garam anorganik lain sebagai pengotor untuk nantinya dihilangkan pada pra-sintesis agar meminimalisasi terjadinya kegagalan.

4. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa sintesis zeolite-Y menggunakan abu layang dengan metode bebas pelarut belum berhasil, hal ini dikarenakan terbentuknya zeolite jenis analcime. Potensi penggunaan abu layang sebagai alternatif material berharga dari limbah industri dengan kombinasi campuran alkali perlu dikaji ulang, dimana dihasilkan serbuk zeolite berwarna kuning kecoklatan dengan berat 9,771 gram dengan %Yield sebesar 71,93%. Proses yang menyebabkan perubahan jenis zeolite dapat dipahami dan dikaji ulang untuk mengoptimalkan sintesis atau bahkan mengeksplorasi aplikasi baru dari zeolite yang terbentuk secara tidak sengaja. Hal ini menunjukkan pentingnya fleksibilitas dan kreativitas dalam penelitian yang dilakukan.

Ucapan Terima Kasih

Semua penulis menyampaikan terima kasih kepada (1) Husni Wahyu Wijaya, Ph.D dan Danar, M.Sc selaku dosen pengampu perkuliahan Praktikum Sintesis Anorganik (Genap 2023/2024) dan (2) Dr. Yessi Permana dan Siti Hartinah Qurbayni (Yessi Lab, Kimia, ITB) yang memfasilitasi karakterisasi sampel hasil sintesis.

Daftar Rujukan

- Andarini, N., Maziyyah, D. S., Haryati, T., Sulistiyo, Y. A., & Suwardiyanto. (2023). Synthesis Zeolite Y From Lapindo Mud With Variations Filling Autoclave And Ratio Molar Si/Al. *Berkala Sainstek*, 11(3), 166–173. <https://doi.org/10.19184/bst.v11i3.39422>
- Febrianti, R. F., Zahara, T. A., & Adhitiyawarman, A. (2022). Sintesis Zeolit a Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Limbah Pt. Indonesia Chemical Alumina (Ica) Menggunakan Metode Alkali Hidrotermal (Synthesis of Zeolite a Base on Fly Ash Waste Pt. Indonesia Chemical Alumina (Ica) Using Hydrothermal Alkaline Method). *Indones. J. Pure Appl. Chem*, 5(1), 28. <https://doi.org/doi: 10.26418/indonesian.v5i1.53072>
- Grabias-Blicharz, E., Panek, R., Franus, M., & Franus, W. (2022). Mechanochemically Assisted Coal Fly Ash Conversion into Zeolite. *Materials*, 15(20), 7174. <https://doi.org/10.3390/ma15207174>
- Guo, Q., Li, G., Liu, D., & Wei, Y. (2019). Synthesis of zeolite Y promoted by Fenton's reagent and its application in photo-Fenton-like oxidation of phenol. *Solid State Sciences*, 91, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2019.03.016>

- Hosseini Hashemi, M. S., Eslami, F., & Karimzadeh, R. (2019). Organic contaminants removal from industrial wastewater by CTAB treated synthetic zeolite Y. *Journal of Environmental Management*, 233, 785–792. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.003>
- Karimzadeh, R., Honarmand, S., & Mousavi, E. S. (2020). Synthesis of zeolite y from kaolin and its model fuel desulfurization performance: optimized by box-behnken method. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 39(1), 79–90. <https://doi.org/10.30492/IJCCE.2020.32874>
- Karyawan, I. D. A., Ahyudanari, E., & Ekaputri, J. J. (2017). Potential Use of Fly Ash Base-Geopolymer Aggregate Substitution in Asphalt Concrete Mixtures. *Int. J. Eng. Technol*, 9(5), 3744–3752. <https://doi.org/doi:10.21817/ijet/2017/v9i5/170905005>
- Kordala, N., & Wyszowski, M. (2024). Zeolite Properties, Methods of Synthesis, and Selected Applications. *Molecules*, 29(5), 1069. <https://doi.org/doi:10.3390/molecules29051069>
- Krongkrachang, P., Thungngern, P., Asawaworarit, P., Houngkamhang, N., & Eiad-Ua, A. (2019). Synthesis of Zeolite Y from Kaolin via hydrothermal method. *Materials Today: Proceedings*, 17, 1431–1436. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.164>
- Mei, J., Duan, A., & Wang, X. (2021). A Brief Review on Solvent-Free Synthesis of Zeolites. *Materials*, 14(4), 788. <https://doi.org/10.3390/ma14040788>
- Mohamed, R. M., Mkhaliid, I. A., & Barakat, M. A. (2015). Rice husk ash as a renewable source for the production of zeolite NaY and its characterization. *Arab. J. Chem*, 8(1), 48–53. <https://doi.org/doi:10.1016/j.arabjc.2012.12.013>
- Occelli, M. L., & Robson, H. E. (1989). *Zeolite Synthesis* (ACS Sympos). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1989-0398>
- Pangesti, G. G., Pandiangan, K. D., Simanjuntak, W., Sascori, S., & Rilyanti, M. (2021). Synthesis of zeolite-Y from rice husk silica and food grade aluminum foil using modified hydrothermal method. *Journal of Physics: Conference Series*, 1751, 012089. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1751/1/012089>
- Patuwan, S. Z., & Arshad, S. E. (2021). Important Synthesis Parameters Affecting Crystallization of Zeolite T: A Review. *Materials (Basel)*, 14(11), 2890. <https://doi.org/doi:10.3390/ma14112890>
- Sartifa, W. O., Harimu, L., & Mulyana, W. O. (2022). Variasi Konsentrasi Asam Klorida (HCl) dan Lama Perendaman Slag Nikel Dalam Proses Leaching Serta Variasi Volume NH₄OH untuk Mengendapkan Besi (fe). *Sains: Jurnal Ilmu Kimia Dan Pendidikan Kimia*, 11(2), 84–89.
- Shi, B., & Chang, Q. (2021). Green synthesis of fly ash-based zeolite Y by mixed alkali fusion method. *Micro & Nano Letters*, 16(11), 540–545. <https://doi.org/10.1049/mna2.12083>

Lampiran



Massa *Fly ash* (abu layang)



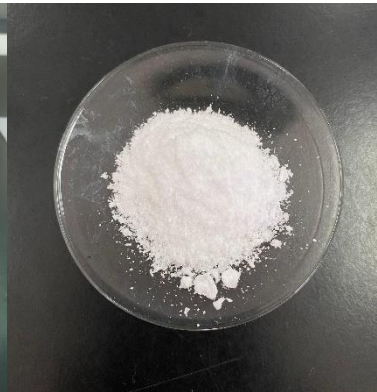
Fly ash



Massa NaOH



Penggerusan NaOH dan Na_2CO_3



Hasil pencampuran NaOH dan Na_2CO_3



Hasil pencampuran campuran alkinasi dan *fly ash*



Penambahan Na_2SiO_3 pada padatan kalsinasi



Hasil pencampuran Na_2SiO_3 dan padatan kalsinasi



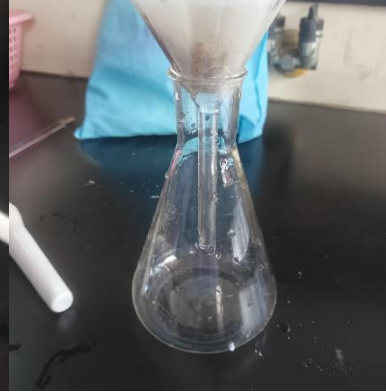
Hasil Autoklaf



Berat kertas saring



Pencucian padatan



Filtrat hasil pencucian



Padatan hasil pencucian



Hasil pengujian pH dengan kertas indikator universal



Berat kristal zeolite-Y + kertas saring