

Sintesis dan Karakterisasi Al-MCM-41 dari Kaolin: Pengaruh Konsentrasi HCl terhadap Struktur dan Kapasitas Adsorpsi Iodin

Affan Zein Abdullah, Alisyah Ananda Putri, Srie Muljani, Reva Edra Nugraha

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

Koresponden email: sriemuljani.tk@upnjatim.ac.id; reva.edra.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 20 Maret 2025

Disetujui: 24 Maret 2025

Abstract

Al-MCM-41 can be synthesized using kaolin from Bangka Belitung without requiring additional sources of silica or aluminum. The process begins with calcination of kaolin to produce metakaolin, followed by HCl treatment for dealumination, which helps remove impurities and excess alumina. This step is crucial to achieve the optimal $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mole ratio, making the material effective as an adsorbent or catalyst. The hydrothermal process enhances silica polymerization and pore formation due to the strong electrostatic interactions between CTAB and silicate anions, increasing the pore size. The mesoporous structure and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of Al-MCM-41 are influenced by the CTAB concentration and the extent of dealumination through HCl treatment. In this synthesis, CTAB acts as a structure-directing agent, forming the hexagonal mesoporous framework, while HCl concentration regulates the removal of alumina from kaolin. To optimize the process, HCl concentrations of 2M, 4M, and 6M were tested to evaluate the extent of alumina and impurity removal. The 6M HCl treatment produced a $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of 25.359, which aligns with the commercial Al-MCM-41 standard from ACS Material. Additionally, the iodine adsorption test demonstrated significantly higher adsorption capacity (653.14 mg/g) for Al-MCM-41 compared to kaolin (76.2 mg/g).

Keywords: *Kaolin, hydrothermal, HCl concentration, Al-MCM-41*

Abstrak

Sintesis Al-MCM-41 dapat menggunakan kaolin dari Bangka Belitung tanpa penambahan aluminium dan silika. Adanya treatment menggunakan HCl sebelum sintesis Al-MCM-41 pada metakaolin yaitu untuk mengurangi impuritas dan kandungan alumina yang cukup tinggi sehingga mendapatkan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang dapat digunakan sebagai adsorben maupun katalis. Proses hidrotermal dilakukan untuk polimerisasi silikat selama proses kondensasi akibat interaksi elektrostatis yang kuat antara CTAB dan anion silikat, sehingga ukuran pori akan meningkat. CTAB dan konsentrasi HCl merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi struktur mesopori dan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dari Al-MCM-41. Pada sintesis Al-MCM-41 menggunakan CTAB sebagai surfaktan pengarah struktur heksagonal mesopori berdasarkan bentuk misel surfaktan. Sedangkan konsentrasi HCl mempengaruhi dealuminasi atau pengurangan alumina dari kaolin. Pada penelitian ini dilakukan variasi konsentrasi HCl 2M, 4M, dan 6M untuk mengetahui seberapa banyak alumina dan impuritas yang berkurang. Hasilnya pada konsentrasi 6M mendapatkan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang sudah sesuai dengan produk komersil Al-MCM-41 yang dijual ACS Material yaitu sebesar 25,359. Pada hasil uji daya serap iodin diperoleh hasil yang jauh lebih tinggi yaitu sebesar 653,14 mg/g pada Al-MCM-41 dan kaolin yang hanya 76,2 mg/g.

Kata Kunci: *Kaolin, hidrotermal, konsentrasi HCl, Al-MCM-41*

1. Pendahuluan

Zeolit [1], silika mesopori [2], dan karbon aktif adalah material berpori kompleks yang memiliki fungsi di bidang proses kimia misalnya katalis dan adsorben [3]. Kelebihan silika mesopori yaitu memiliki luas permukaan yang tinggi dan ukuran pori yang seragam dapat digunakan sebagai katalis dan adsorben [4]. Senyawa MCM (*Mobil Composition of Matter*) merupakan materi yang memiliki struktur mesopori dan ukuran pori yang seragam [5]. Salah satu jenis dari MCM yaitu MCM-41 yang berupa silika mesopori dengan luas permukaan yang besar, pori-pori seragam berbentuk heksagonal, stabilitas termal yang baik, dan lain-lain [6]. Beberapa bahan kimia komersil yang digunakan dalam sintesis Al-MCM-41 meliputi TMOS (Tetra Methyl Ortho Silicate), TEOS (Tetra Ethyl Ortho Silicate) dan Natrium Alumina. Akan tetapi penggunaan bahan komersil tersebut relatif mahal dan berbahaya bagi lingkungan sehingga penggunaan sumber alami seperti *fly ash*, sekam padi, kaolin, lumpur geotermal mulai banyak dikembangkan saat ini

[7]. Kaolin dari Bangka Belitung memiliki kandungan SiO_2 sebesar 61% dan Al_2O_3 sebesar 31%. Kandungan silika yang cukup tinggi ini dapat dimanfaatkan sebagai prekursor pada sintesis Al-MCM-41 yang selanjutnya dapat digunakan sebagai adsorben dan katalis [8].

Terdapat beberapa metode sintesis Al-MCM-41 antara lain sol-gel, hidrotermal, pertukaran ion, dan lain-lain [9]. Metode yang umum digunakan yaitu sol-gel dan hidrotermal. Keuntungan metode hidrotermal yaitu relatif sederhana tanpa menggunakan peralatan yang rumit, selain itu juga mempunyai beberapa keuntungan lainnya seperti pemanasan cepat, reaksi cepat, hasil lebih bagus, kemurnian tinggi dan efisiensi transformasi energi tinggi [10]. Sedangkan keuntungan metode sol-gel yaitu proses yang mudah, alat yang digunakan murah, dan waktu yang relatif singkat [11]. Dengan kelebihan tersebut, penelitian ini menggunakan metode hidrotermal untuk menghasilkan Al-MCM-41 dari kaolin yang sesuai standar atau peneliti terdahulu. Metode pre-treatment kalsinasi dan dealuminasi dilakukan untuk meningkatkan reaktivitas kaolin sebelum dilakukan sintesis [12]. Kaolin yang dikalsinasi berubah strukturnya menjadi metakaolin dan selanjutnya dilakukan dealuminasi menggunakan HCl. Tujuan dari dealuminasi menggunakan HCl yaitu untuk mengurangi kandungan alumina [8] sehingga mendapatkan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang sesuai standar produk komersil ACS Material.

Pada penelitian ini dilakukan sintesis Al-MCM-41 sebagai sumber silika dan alumina tanpa adanya tambahan bahan komersil lainnya. Sintesis Al-MCM-41 dilakukan dengan metode sol gel saat penambahan larutan NaOH dan CTAB sebagai surfaktan pembentuk atau template pori heksagonal. Setelah itu dilanjutkan dengan proses hidrotermal untuk polimerisasi silikat selama proses kondensasi akibat interaksi elektrostatik yang kuat antara CTAB dan anion silikat, sehingga ukuran pori akan meningkat [13]. Konsentrasi HCl yang digunakan akan mempengaruhi komposisi silika dan alumina pada kaolin yang dapat mempengaruhi karakteristik Al-MCM-41 yang dihasilkan. Penelitian ini akan mensintesis Al-MCM-41 dari kaolin tanpa penambahan silika ataupun alumina serta mengkaji pengaruh konsentrasi HCl untuk memperoleh standar Al-MCM-41 [15].

2. Metode Penelitian

1) Alat dan Bahan

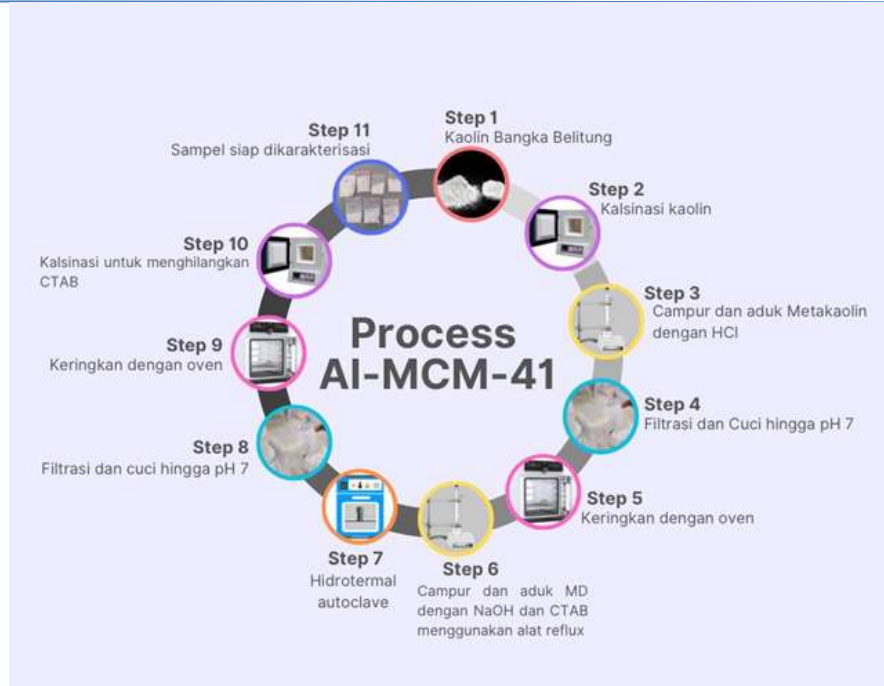
Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain kaolin $\text{Al}_4(\text{OH})_8(\text{Si}_4\text{O}_{10})$ dari Bangka Belitung, NaOH (Merck, 99%), N-Cetyl-N,N,N-trimethylammonium bromide (CTABr, $\text{C}_{19}\text{H}_{42}\text{BrN}$, Sigma Aldrich, 99%), HCl (Merck, 37%) dan air demineralisasi. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain oven sebagai media pengeringan dan proses hidrotermal, neraca analitik untuk menimbang bahan, stirrer magnetic bar untuk proses pengadukan, furnace, labu ukur sebagai media pencampuran bahan, pipet tetes, erlenmeyer sebagai media filtrat dari penyaringan, beaker glass sebagai media bahan, kaca arloji, thermometer untuk pengukur suhu pada saat pengadukan, kertas pH untuk mengukur pH, kertas saring untuk menyaring residu dan filtrat dari bahan, aluminium foil, corong kaca sebagai media penyaringan, autoclave sebagai media hidrotermal, spatula, refluks, oil bath, statif, klem, labu leher 3, dan gelas ukur.

2) Pre-Treatment

Kalsinasi kaolin dengan furnace pada suhu $750\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam. Metakaolin yang terbentuk dicampur dan diaduk dengan larutan HCl dengan variasi konsentrasi (2, 4 dan 6 M) pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Setelah itu campuran difiltrasi dan ukur pH filtrat. Pencucian dengan air demineralisasi hingga pH filtrat menjadi 7. Setelah pH 7 keringkan residu dengan oven pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam. Setelah 2 jam padatan ditumbuk hingga halus terbentuk Metakaolin Dealuminasi (MD) dan dilakukan uji XRF dan XRD untuk mengetahui struktur dan komposisi senyawa.

3) Sintesis Al-MCM-41

MD dicampur dengan CTAB 0,005 mol dan larutan NaOH 6M 10 ml pada suhu $60\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Setelah itu campuran tersebut dimasukkan dalam autoclave dan dimasukkan ke oven untuk perlakuan hidrotermal pada suhu $100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 24 jam. Setelah 24 jam dilakukan filtrasi dan pengukuran pH. Kemudian lakukan pencucian sampai pH 7. Setelah pH 7 residu dikeringkan dengan oven pada suhu $80\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 jam. Kemudian produk dikalsinasi dengan furnace pada suhu $550\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam pada atmosfer N_2 dan 5 jam pada atmosfer udara. Mekanisme sintesis Al-MCM-41 dari kaolin ditampilkan di **Gambar 1**.



Gambar 1. Sintesis Al-MCM-41 Dari Kaolin Bangka Belitung

4) Uji Daya Serap Iodin

Pengujian daya serap iodin dilakukan dengan cara menimbang kaolin/MD/Al-MCM-41 sebanyak 1 gram dan campurkan dengan 20 ml larutan iodium 0,1 N. Aduk dengan magnetic stirrer selama 15 menit. Setelah itu saring dan ambil 10 ml filtrat dan titrasi dengan larutan natrium tiosulfat 0,1 N. Jika warna kuning pada larutan mulai samar, tambahkan larutan amilum 1 % sebagai indikator hingga warna coklat gelap. Titrasi kembali dengan natrium tiosulfat 0,1N hingga menjadi warna bening. Rumus perhitungan daya serap Iodium yaitu sebagai berikut :

$$\text{Daya Serap Iodin} \left(\frac{\text{mg}}{\text{g}} \right) = \frac{(\text{Vblanko} - \text{Vsampel Na}_2\text{SO}_3) \times (\text{Konsentrasi Na}_2\text{SO}_3 \times \text{BE I}_2 \times \text{fp})}{\text{Massa}}$$

Keterangan :

Vblanko : Volume blanko (ml)

Vsampel Na₂SO₃ : Volume Na₂SO₃ yang dibutuhkan (ml)

BE I₂ : Berat Ekuivalen I₂

Massa : Massa kaolin/Metakaolin Dealuminasi/Al-MCM-41 (g)

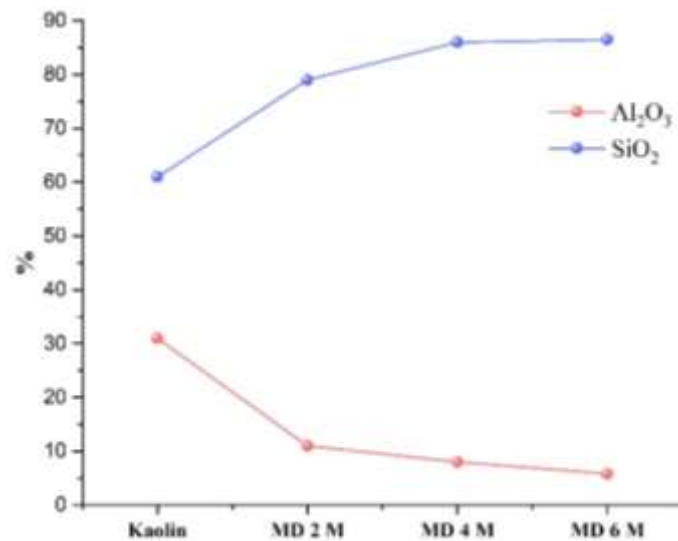
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengaruh dari Konsentrasi HCl pada Metakaolin

Pada sintesis Al-MCM-41 dilakukan variasi konsentrasi HCl (2M, 4M, dan 6M) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap rasio SiO₂/Al₂O₃ yang dihasilkan dari metakaolin. Analisis komposisi senyawa dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF) yang hasilnya disajikan pada **Gambar 2**. Berdasarkan data pada gambar tersebut, terlihat bahwa peningkatan konsentrasi HCl berbanding lurus dengan penurunan kandungan Al₂O₃ dan peningkatan kadar SiO₂. Pada konsentrasi HCl 6M, terjadi dealuminasi paling signifikan, dengan kandungan Al₂O₃ tersisa hanya 5,8%, sementara SiO₂ meningkat menjadi 86,5%. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa perlakuan HCl efektif dalam mengurangi kadar Al₂O₃ pada kaolin. Semakin tinggi konsentrasi HCl, semakin besar pelepasan Al dari struktur kaolin, meningkatkan rasio SiO₂/Al₂O₃ dalam material [8]. Mekanisme dealuminasi ini terjadi karena SiO₂ bersifat lebih stabil dalam larutan asam, sehingga tidak larut dalam HCl, kecuali dalam asam yang lebih agresif seperti HF atau F₂, maupun larutan basa kuat.

Sebaliknya, Al₂O₃ lebih mudah bereaksi dengan HCl, memungkinkan pengurangan kandungan alumina secara bertahap. Proses ini menjadi penting karena Al-MCM-41 komersial, seperti yang diproduksi oleh ACS Material, memiliki rasio molar SiO₂/Al₂O₃ sekitar 25. Oleh karena itu, reduksi Al₂O₃ pada

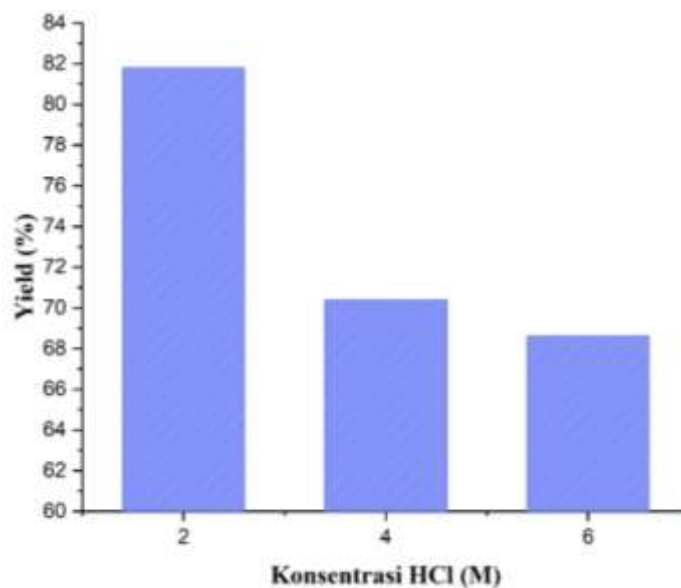
metakaolin melalui perlakuan HCl harus dikontrol agar memenuhi standar tersebut, sehingga material yang dihasilkan memiliki karakteristik optimal sebagai katalis atau adsorben dalam berbagai aplikasi industri.



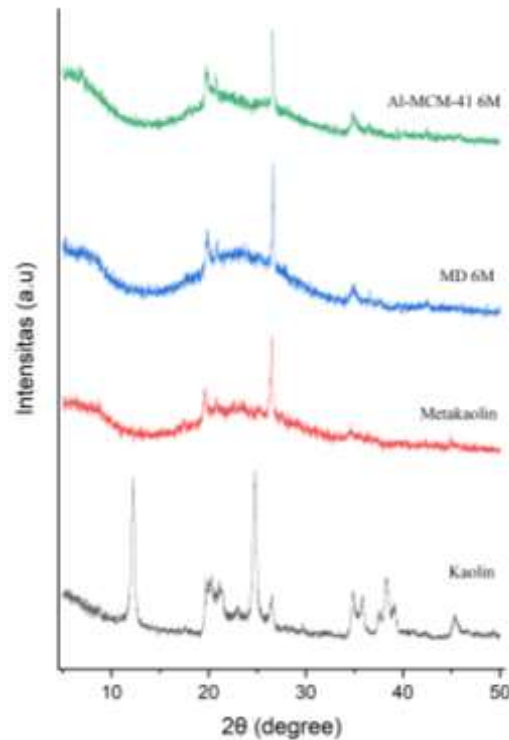
Gambar 2. Analisis komposisi senyawa SiO₂ dan Al₂O₃ dengan variasi konsentrasi HCl

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara yield metakaolin dealuminasi (MD) dan konsentrasi HCl dalam proses leaching. Variasi konsentrasi HCl 2M, 4M, dan 6M menghasilkan yield MD berturut-turut sebesar 81,8%, 70,4%, dan 68,6%, menunjukkan tren penurunan yield seiring dengan meningkatnya konsentrasi HCl. Penurunan yield ini terjadi karena semakin tinggi konsentrasi HCl, semakin banyak Al₂O₃ dan pengotor (impuritis) yang terlarut dan terlepas dari struktur metakaolin. Proses dealuminasi ini menyebabkan pengurangan massa metakaolin secara keseluruhan, sehingga yield yang diperoleh semakin kecil. Namun, pada HCl 6M, penurunan yield tidak terlalu signifikan dibandingkan HCl 4M, yang kemungkinan disebabkan oleh kejenuhan HCl dalam larutan, sehingga kapasitas pelarutan alumina tidak bertambah secara signifikan meskipun konsentrasi HCl lebih tinggi.

Hasil ini menunjukkan bahwa HCl merupakan agen dealuminasi yang efektif dalam mengurangi kandungan Al₂O₃ dan pengotor dalam kaolin, memungkinkan peningkatan rasio SiO₂/Al₂O₃ secara optimal. Berdasarkan hasil analisis komposisi setelah dealuminasi, MD dengan perlakuan HCl 6M dipilih sebagai kondisi terbaik karena menghasilkan rasio mol SiO₂/Al₂O₃ sebesar 25,359 yang mendekati standar komersial Al-MCM-41. Oleh karena itu, penggunaan HCl 6M dalam proses dealuminasi dapat menjadi metode yang efektif untuk meningkatkan kemurnian silika dalam material berbasis kaolin.



Gambar 3. Grafik pengaruh konsentrasi HCl terhadap yield metakaolin dealuminasi (MD).



Gambar 4. Difraktogram kaolin, metakaolin, MD dan Al-MCM-41

Gambar 4 menampilkan pola difraksi X-Ray Diffraction (XRD) dari kaolin, metakaolin, MD dan Al-MCM-41. Berdasarkan hasil analisis XRD, kaolin mengandung beberapa jenis mineral utama, termasuk kaolinite ($2\theta = 12.26^\circ, 24.81^\circ$), chlorite ($2\theta = 19.84^\circ$), quartz ($2\theta = 21.22^\circ; 26.57^\circ$), cristobalite ($2\theta = 22.96^\circ$), halloysite ($2\theta = 11.86^\circ$), dan clay ($2\theta = 34.94^\circ; 38.35^\circ$). Setelah proses kalsinasi pada suhu 750°C dihasilkan puncak difraksi metakaolin yang melebar dan intensitasnya menurun. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar struktur kristalin kaolin (kaolinite, cristobalite, chlorite, dan clay) telah hancur dan membentuk fasa amorf yang lebih reaktif. Dealuminasi metakaolin dengan HCl 6M menyebabkan perubahan struktur metakaolin dimana intensitas difraksi semakin melemah dan pola semakin amorf yang menandakan bahwa sebagian besar fasa kristalin telah larut atau berubah menjadi material amorf dengan rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang lebih tinggi. Namun, masih terdapat sisa kuarsa (quartz) pada $2\theta = 21.22^\circ; 26.57^\circ$, menunjukkan bahwa silika belum sepenuhnya bereaksi.

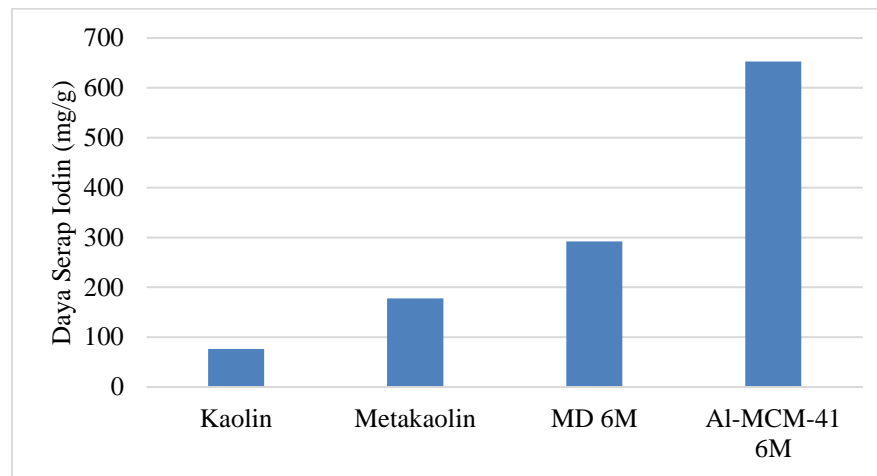
Keberadaan quartz yang tersisa kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya adalah pH pada saat alkalisasi dengan NaOH yang terlalu tinggi. pH yang tinggi dapat menyebabkan aluminosilikat yang kurang stabil dapat larut dan menghasilkan fase yang lebih stabil [8]. Hal ini menunjukkan bahwa kontrol kondisi sintesis, termasuk pH larutan, waktu reaksi, dan suhu hidrotermal, menjadi faktor kunci dalam memastikan konversi mineral yang optimal serta meningkatkan efisiensi pembentukan material mesopori Al-MCM-41.

Tabel 1. Analisa komposisi fasa kristalin dan amorf menggunakan aplikasi Match

Sampel	Analisa Fase	
	Fase Kristal (%)	Fase Amorf (%)
Kaolin	52	48
Metakaolin	11,88	88,12
MD 6M	25,54	74,46
Al-MCM-41 6M	23,13	76,87

Analisis selanjutnya dilakukan menggunakan aplikasi Match untuk mengetahui komposisi fasa kristalin dan amorf pada kaolin, metakaolin, MD dan Al-MCM-41 yang dihasilkan. Berdasarkan hasil analisis XRD menggunakan aplikasi Match, diperoleh informasi bahwa senyawa yang muncul pada puncak difraksi $2\theta = 21.22^\circ; 26.57^\circ$ diidentifikasi sebagai SiO_2 (Quartz) sedangkan puncak melebar pada rentang pada $2\theta = 15-30^\circ$ adalah silika amorf. Hal ini menunjukkan bahwa masih terdapat sisa silika yang tidak bereaksi selama proses dealuminasi dan sintesis Al-MCM-41. Pada Produk MD 2M, 4M, 6M, serta Al-

MCM-41 2M, 4M, dan 6M cenderung mengalami kenaikan kristalinitas. Hal ini dapat terjadi karena pH dari NaOH terlalu tinggi yang menyebabkan pembentukan aluminosilikat dan proses polimerisasi menjadi tidak stabil sehingga fase amorf dari aluminosilikat yang terbentuk berkurang [8].



Gambar 5. Kapasitas adsorpsi iodin menggunakan kaolin, metakaolin, MD dan Al-MCM-41

Pada **Gambar 5** diperoleh grafik hasil daya serap iodin dari kaolin hingga menjadi Al-MCM-41. Kaolin, metakaolin, metakaolin dealuminasi (MD 6M), dan Al-MCM-41 6M memiliki daya serap iodin berturut-turut yaitu 76,2 mg/g; 177,8 mg/g; 292,1 mg/g dan 653,14 mg/g. Hasil ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan signifikan dalam kapasitas adsorpsi iodin selama proses konversi kaolin menjadi Al-MCM-41. Peningkatan ini disebabkan oleh perubahan struktur material yang semakin berpori selama proses sintesis. Kaolin awalnya memiliki struktur lapisan tertutup yang membatasi daya serapnya. Setelah dikalsinasi menjadi metakaolin, terjadi peningkatan porositas yang lebih lanjut diperbesar melalui proses dealuminasi. Sintesis Al-MCM-41 menghasilkan struktur mesopori yang sangat teratur dengan luas permukaan dan volume pori yang lebih besar, sehingga mampu menyerap iodin dengan jauh lebih efektif dibandingkan material awal.

Selain itu, rasio $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang lebih tinggi pada Al-MCM-41 juga meningkatkan stabilitas termal dan hidrotermalnya, menjadikannya lebih unggul dibandingkan zeolit konvensional yang hanya memiliki daya serap sekitar 100-120 mg/g [18]. Dengan kemampuan adsorpsi yang lebih tinggi, Al-MCM-41 memiliki potensi besar sebagai adsorben dalam penyerapan polutan organik dan logam berat, serta sebagai katalis dalam berbagai reaksi seperti cracking dan deoxygenation pada produksi biofuel. Oleh karena itu, sintesis Al-MCM-41 tidak hanya meningkatkan kapasitas adsorpsi tetapi juga membuka peluang aplikasi yang lebih luas di bidang lingkungan dan industri.

4. Kesimpulan

Kaolin dari Bangka Belitung dapat dibuat menjadi Al-MCM-41 dengan fungsi yang lebih advance yaitu sebagai adsorben dan katalis. Pengaruh dari konsentrasi HCl saat proses dealuminasi membuat rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ menjadi meningkat. Konsentrasi HCl yang paling mendekati standar komersil yaitu 6M dengan rasio mol $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ sebesar 25,359. Al-MCM-41 yang terbentuk memiliki daya serap iodin sebesar 653,14 mg/g yang meningkat dari bahan baku awal berupa kaolin sebesar 76,2 mg/g. Hal tersebut telah menjadi bukti bahwa Al-MCM-41 dapat digunakan sebagai adsorben maupun katalis.

5. Ucapan Terima kasih

Penulis ingin mengucapkan terima kasih Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur untuk pendanaan penelitian melalui skema Penelitian Dasar Lanjutan dengan nomor kontrak SPP/130/UN.63.8/LT/V/2024.

6. Referensi

- [1] A. Hamid and D. Prasetyoko, “Formation Of Mesoporous Zsm-5 From Natural Kaolin And Colloidal Silica With Two-Step Crystallization,” *Proceeding of International Conference On Research, Implementation And Education Of Mathematics And Sciences*. 2015.

- [2] R. K. Vempati, R. Borade, R. S. Hegde, and S. Komarneni, "Template free ZSM-5 from siliceous rice hull ash with varying C contents," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 93, no. 1–3, pp. 134–140, 2006, doi: 10.1016/j.micromeso.2006.02.008.
- [3] E. Sasaoka, M. Hatori, N. Sada, and M. A. Uddin, "Role of H₂O in oxidative regeneration of ZnS formed from high-temperature desulfurization ZnO sorbent," *Ind Eng Chem Res*, vol. 39, no. 10, pp. 3844–3848, 2000, doi: 10.1021/ie0004747.
- [4] Z. A. Allothman, "A review: Fundamental aspects of silicate mesoporous materials," *Materials*, vol. 5, pp. 2874–2902, 2012. doi: 10.3390/ma5122874.
- [5] T. Ali-Dahmane, L. Brahmi, R. Hamacha, S. Hacini, and A. Bengueddach, "Comparison of lewis acidity between Al-MCM-41 pure chemicals and Al-MCM-41 synthesized from bentonite," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, vol. 14, no. 2, pp. 358–368, 2019, doi: 10.9767/bcrec.14.2.3367.358-368.
- [6] C. Du and H. Yang, "Investigation of the physicochemical aspects from natural kaolin to Al-MCM-41 mesoporous materials," *J Colloid Interface Sci*, vol. 369, no. 1, pp. 216–222, 2012, doi: 10.1016/j.jcis.2011.12.041.
- [7] J. P. Lorenti, E. Scolari, P. H. Finger, W. Plass, and J. M. R. Gallo, "Synthesis of Sn-MCM-41 at Low Temperature: Effect of the Synthesis Parameters on the Structural, Textural, and Catalytic Properties," *Eur J Inorg Chem*, vol. 2021, no. 23, pp. 2231–2240, 2021, doi: 10.1002/ejic.202100162.
- [8] H. Hartati *et al.*, "Synthesis of amorphous aluminosilicate from impure Indonesian kaolin," *Open Chem*, vol. 18, no. 1, pp. 295–302, 2020, doi: 10.1515/chem-2020-0033.
- [9] M. A. Fadhlulloh, T. Rahman, A. Bayu, D. Nandiyanto, and A. Mudzakir, "Review Tentang Sintesis SiO₂ Nanopartikel," *Jurnal Integrasi Proses*, vol. 5, 2014. <http://jurnal.untirta.ac.id/index.php/jip>
- [10] M. Sadat-Shojai, M. T. Khorasani, and A. Jamshidi, "Hydrothermal processing of hydroxyapatite nanoparticles - A Taguchi experimental design approach," *J Cryst Growth*, vol. 361, no. 1, pp. 73–84, 2012, doi: 10.1016/j.jcrysgro.2012.09.010.
- [11] N. V. Roik and L. A. Belyakova, "Sol-gel synthesis of MCM-41 silicas and selective vapor-phase modification of their surface," *J Solid State Chem*, vol. 207, pp. 194–202, 2013, doi: 10.1016/j.jssc.2013.09.027.
- [12] M. Claverie *et al.*, "Structural and chemical changes in kaolinite caused by flash calcination: Formation of spherical particles," *Appl Clay Sci*, vol. 114, pp. 247–255, 2015, doi: 10.1016/j.clay.2015.05.031.
- [13] Trisunaryanti, W., *Material Katalis dan Karakternya*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, 2018
- [14] N. M. Wulandari *et al.*, "Effect of CTAB ratio to the characters of mesoporous silica prepared from rice husk ash in the pyrolysis of α -cellulose," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, vol. 16, no. 3, pp. 632–640, 2021, doi: 10.9767/BCREC.16.3.10828.632-640.
- [15] S. Side, S. Eka Putri, D. Eka Pratiwi, A. Rahma, and A. Rahman, "The Effect of Acid Treatment on The Characteristics of Modernite Zeolite," vol. XII, no. 2, pp. 114–123, 2023, <http://ojs.unm.ac.id/index.php/sainsmat>
- [16] D. Nur'aeni *et al.*, "Adsorpsi Ion Logam Mn²⁺ dan Cu²⁺ Oleh Silika Gel Dari Abu Ampas Tebu," *Al-Kimiya*, vol. 4, pp. 70–80, 2017.
- [17] R. Dewi, H. Agusnar, Z. Alfian, and Tamrin, "Characterization of technical kaolin using XRF, SEM, XRD, FTIR and its potentials as industrial raw materials," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, 2018. doi: 10.1088/1742-6596/1116/4/042010.
- [18] S. Xu, J. Wang, Y. Feng, Y. Liu, and J. Liu, "Study on the adsorption mechanism and properties of silver-loaded zeolite for radioactive iodine," *Nuclear Materials and Energy*, vol. 37, 2023, doi: 10.1016/j.nme.2023.101517.