

Sintesis dan Karakterisasi Zeolit Terimobilisasi Dithizon (ZAA-D)

Rini Perdana

Universitas Negeri Makassar/ rini.perdana@unm.ac.id

Abstract

This research focuses on the synthesis and characterization of dithizone-immobilized zeolite (ZAA-D) as an innovation in industrial waste treatment. Zeolite, a natural mineral with a crystalline structure and high porosity, was modified to increase the adsorption efficiency towards heavy metals such as Hg(II), Pb(II), and Ca(II). The synthesis process involves the activation of zeolite using HCl to increase the adsorption capacity through removal of impurities and opening of the pore structure. Immobilization of dithizone was carried out with toluene solvent, which allows covalent interaction between the active groups of dithizone and metal ions. Characterization using FTIR and XRD showed the success of dithizone immobilization on the zeolite surface, characterized by the appearance of typical absorption bands of dithizone at wave numbers 2854.65; 1527.62; 1496; 1435; 1211.3 cm^{-1} and changes in diffractogram patterns. The results of this study demonstrate the great potential of ZAA-D in environmentally friendly and efficient waste treatment, opening up new opportunities for the application of innovative adsorbent materials in industry.

Keywords: zeolite, dithizone, immobilization

Abstrak

Penelitian ini berfokus pada sintesis dan karakterisasi zeolit terimobilisasi dithizon (ZAA-D) sebagai inovasi dalam pengolahan limbah industri. Zeolit, mineral alami dengan struktur kristalin dan porositas tinggi, dimodifikasi untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi terhadap logam berat seperti Hg(II), Pb(II), dan Ca(II). Proses sintesis melibatkan aktivasi zeolit menggunakan HCl untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui penghilangan pengotor dan pembukaan struktur pori. Imobilisasi dithizon dilakukan dengan pelarut toluena, yang memungkinkan interaksi kovalen antara gugus aktif dithizon dan ion logam. Karakterisasi menggunakan FTIR dan XRD menunjukkan keberhasilan imobilisasi dithizon pada permukaan zeolit, ditandai dengan munculnya pita serapan khas dithizone pada bilangan gelombang 2854,65; 1527,62; 1496; 1435; 1211,3 cm^{-1} dan perubahan pola difraktogram. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar ZAA-D dalam pengolahan limbah yang ramah lingkungan dan efisien, membuka peluang baru untuk aplikasi material adsorben inovatif di industri.

Keywords: zeolit, dithizon, imobilisasi

PENDAHULUAN

Zeolit merupakan mineral alami yang memiliki struktur kristalin dan porositas tinggi, yang menjadikannya sebagai bahan yang sangat berharga dalam berbagai aplikasi industri, termasuk dalam pengolahan limbah dan pemurnian air (Hanipa et al., 2017). Dalam konteks pengolahan limbah, zeolit terimobilisasi menawarkan potensi yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi adsorpsi dan pemisahan zat-zat berbahaya dari limbah cair. Penelitian ini berfokus pada sintesis dan karakterisasi zeolit terimobilisasi dithizon (ZAA-D), yang diharapkan dapat memberikan solusi inovatif dalam pengolahan limbah industri, khususnya dalam mengatasi pencemaran logam berat dan zat-zat berbahaya lainnya (Jumaeri et al., 2017).

Sifat kimia dan fisik zeolit, seperti kapasitas tukar kation (CTC) dan luas permukaan, sangat mempengaruhi kemampuannya dalam adsorpsi. Zeolit memiliki kemampuan untuk mengikat ion logam berat, yang merupakan salah satu komponen utama pencemaran limbah cair dari berbagai industri, termasuk industri gula dan electroplating (Nafisah, 2023). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa zeolit dapat meningkatkan kualitas air dengan menyerap ion logam seperti Fe^{3+} dan Cr^{3+} , serta mengurangi konsentrasi amonium dalam limbah cair (Hakiki et al., 2021; Ismettulloh et al., 2019; Yulianis et al., 2022). Dengan demikian, pengembangan zeolit terimobilisasi yang lebih efisien dapat menjadi langkah penting dalam pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

Dalam sintesis zeolit terimobilisasi dithizon, proses aktivasi dan modifikasi zeolit menjadi kunci untuk meningkatkan performa adsorpsi. Aktivasi zeolit melalui metode fisika dan kimia dapat meningkatkan luas permukaan dan kapasitas adsorpsi, yang pada gilirannya akan meningkatkan efektivitasnya dalam menyerap kontaminan (Anawati et al., 2012; Atikah, 2017). Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai metode sintesis dan karakterisasi zeolit terimobilisasi, serta menganalisis pengaruh modifikasi terhadap sifat adsorptifnya. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi pengolahan limbah yang lebih efisien dan ramah lingkungan.

Selain itu, karakterisasi zeolit terimobilisasi dithizon akan dilakukan untuk memahami struktur dan sifat-sifat fisikokimianya. Metode karakterisasi seperti analisis permukaan, ukuran pori, dan kapasitas adsorpsi akan digunakan untuk mengevaluasi performa zeolit yang dihasilkan (Maharani & Nurzulla, 2022). Dengan memahami karakteristik ini, diharapkan dapat diperoleh informasi yang lebih mendalam mengenai potensi aplikasi zeolit dalam pengolahan limbah, serta pengembangan material baru yang lebih efisien dan efektif (Karelius, 2008).

Dengan latar belakang tersebut, artikel ini akan membahas secara mendalam mengenai sintesis dan karakterisasi zeolit terimobilisasi dithizon (ZAA-D), serta potensi aplikasinya dalam pengolahan limbah industri. Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan solusi untuk masalah pencemaran, tetapi juga membuka peluang baru dalam pemanfaatan zeolit sebagai material adsorben yang inovatif dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

A. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari PT. Merck antara lain dithizon, etanol 99%, toluena, HNO₃, HCl 36%, NaOH. Bahan lain yang bukan dari PT. Merck antara lain zeolit alam, aquabides, aquades dan kertas saring Whatman 42, indikator universal.

B. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain: alat-alat gelas, pengayak 250 mesh, krus porselin dan penggerus, pengaduk elektrik, oven, pH meter (Digital Titrator), timbangan analitik (mettler-AT 200), *X-Ray Diffraction* (Simadzu XRD 6000), spektrofotometer inframerah (Shimadzu FTIR- Prestige-21), alat pengguncang horisontal, pemanas, pengaduk magnetic

C. Prosedur Penelitian

Aktivasi zeolite

Aktivasi permukaan zeolit alam dilakukan dengan mencampurkan 10 gr zeolit alam yang telah diayak 250 mesh dengan 60 ml HCl 36%. Kemudian diaduk selama 24 jam pada suhu 70°C, selanjutnya disaring dan dicuci sampai filtratnya netral (pH 7). Kemudian hasil yang diperoleh dikeringkan dengan oven pada suhu 160 °C selama 8 jam. Setelah kering, zeolit alam aktif ini diayak dengan ayakan 250 mesh, untuk mendapatkan keseragaman ukuran partikel.

Karakterisasi zeolite alam aktif

Zeolit alam hasil aktivasi selanjutnya diidentifikasi menggunakan spektrofotometer inframerah, dan difraksi sinar X masing-masing untuk mengetahui gugus fungsi dan kristalinitas zeolit alam hasil pencucian.

Imobilisasi dithizon pada zeolit alam aktif

Imobilisasi dithizon pada zeolit alam ini dilakukan secara fisika dengan prosedur sebagai berikut: 4 gr zeolit alam hasil pencucian dicampur dengan 1.024 gr dithizon dan 80 ml toluena. Campuran diaduk menggunakan pengaduk elektrik selama 24 jam pada suhu kamar (tanpa pemanasan). Campuran disaring kemudian dicuci dengan toluena, etanol, dan aquabides masing-masing 50 ml. Kemudian hasil yang diperoleh dikeringkan dengan oven pada suhu 70 °C selama 6 jam. Setelah pengeringan, hasil yang diperoleh diayak dengan ayakan 250 mesh untuk mendapatkan keseragaman ukuran partikel

Karakterisasi zeolit alam terimobilisasi dithizone

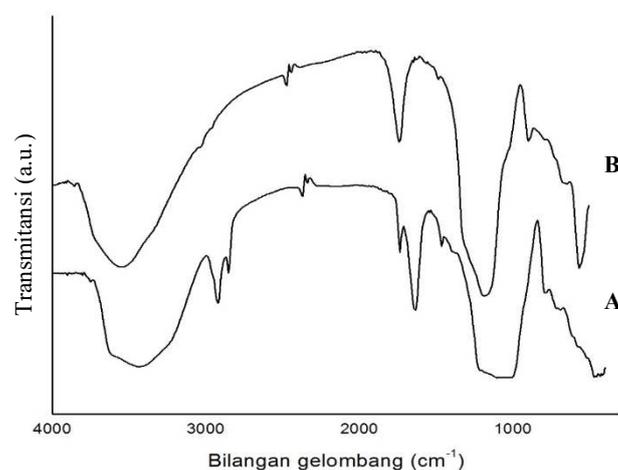
Zeolit alam hasil imobilisasi dithizon selanjutnya diidentifikasi dengan spektrofotometer inframerah dan difraksi sinar X masing-masing untuk mengetahui gugus fungsi dan kristalinitas zeolit alam terimobilisasi dithizone.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Aktivasi dan Karakterisasi Zeolit

Zeolit alam (ZAA) yang hanya mengandung satu jenis mineral zeolit saja sangat jarang ditemukan. Dalam penelitian ini zeolit yang digunakan terlebih dahulu digerus sampai halus dan kemudian diayak dengan menggunakan ayakan 250 mesh untuk memperoleh ukuran partikel zeolit yang homogen. Sebagai perlakuan awal zeolit alam yang sudah disiapkan, dicuci dengan menggunakan HCl 36%. HCl berperan sebagai media yang memberikan suasana asam dan berfungsi untuk menggantikan sebagian gugus silanol (-OH) dengan Cl atau mengubah gugus siloksan silanol dan kemudian OH pada silanol akan tergantikan oleh Cl sehingga memungkinkan dithizon terikat pada zeolite. Kemudian hasil yang diperoleh dikeringkan dengan oven dengan maksud untuk menguapkan molekul air yang masih berada pada permukaan zeolite.

Pencucian zeolit alam bertujuan untuk menghilangkan oksida-oksida logam pengotor seperti SiO₂ bebas dan oksida lainnya, sehingga oksida-oksida tersebut tidak lagi menutupi pori zeolit. Dengan hilangnya pengotor berupa oksida oksida logam akibat pencucian dengan asam klorida tersebut diharapkan kerangka zeolit kemudian menjadi lebih terbuka dan beberapa berupa menjadi situs Si-OH, sehingga sudah siap untuk dijadikan sebagai adsorben dan juga sebagai padatan



Gambar 1 Spektra inframerah zeolit alam (A), zeolit hasil pencucian dengan HCl

pendukung yang baik untuk berinteraksi dengan ligan dithizon. Hasil dari proses ini didapatkan padatan berwarna putih yang kemudian disebut zeolit tanpa imobilisasi (ZAA-T) (Madejova, 2003) .

Karakterisasi pertama dilakukan dengan menggunakan spektroskopi inframerah untuk mengetahui pengaruh pencucian dengan HCl terhadap perubahan-perubahan gugus fungsional, dengan cara membandingkan spektra inframerah zeolit alam sebelum dan sesudah pencucian dengan HCl. Hasil karkterisasi spektra inframerah zeolit alam sebelum dan sesudah pencucian dengan HCl dapat dilihat pada Gambar 1.

Gambar 1 dapat diamati dan dilakukan interpretasi sebagai berikut: zeolit alam mempunyai puncak serapan pada daerah gelombang 3441,01; 1635,64; 1010,7; 455,2 cm^{-1} sedangkan pada zeolit hasil pencucian dengan HCl mempunyai puncak serapan pada 3448,72; 1635,64; 1080,14; 462,92 cm^{-1} . Puncak 3441,01 pada zeolit alam menunjukkan serapan dari gugus O-H pada gugus Si-OH yang berikatan hidrogen, yang mengalami pergeseran bilangan gelombang pada zeolit alam setelah pencucian dengan HCl menjadi 3448,72 yang mungkin terjadi karena keluarnya H_2O dari kerangka zeolit karena pemanasan dan terbentuknya $-\text{OH}_2^+$ setelah dicuci dengan HCl (Anawati et al., 2012). Selain itu gugus silanol (Si-OH) yang berdekatan juga dapat mengalami reaksi penghilangan air untuk kemudian membentuk gugus siloksan (O-Si-O) melalui proses pemanasan. Serapan yang muncul pada 2924,09 dan 2854,65 cm^{-1} pada zeolit alam tidak muncul pada zeolit alam hasil pencucian yang diinterpretasikan sebagai vibrasi C-H dari $-\text{CH}_3$ dan $-\text{CH}_2$ yang berasal dari pengotor yang terdapat pada rongga zeolit, sehingga dapat dikatakan bahwa pencucian dengan HCl telah berhasil membersihkan zeolit dari pengotor (Han et al., 1997). Dan serapan pada 1635,64 pada zeolit alam dan zeolit alam setelah pencucian menunjukkan vibrasi tekuk $-\text{OH}$ dari gugus silanol. Carrado dkk (2001), melaporkan bahwa H_2O yang terjerap memberikan pita serapan pada daerah 3435 dan 1628 cm^{-1} . Madejova (2003) melaporkan hal tersebut pada daerah serapan 3424 dan 1628 cm^{-1} .

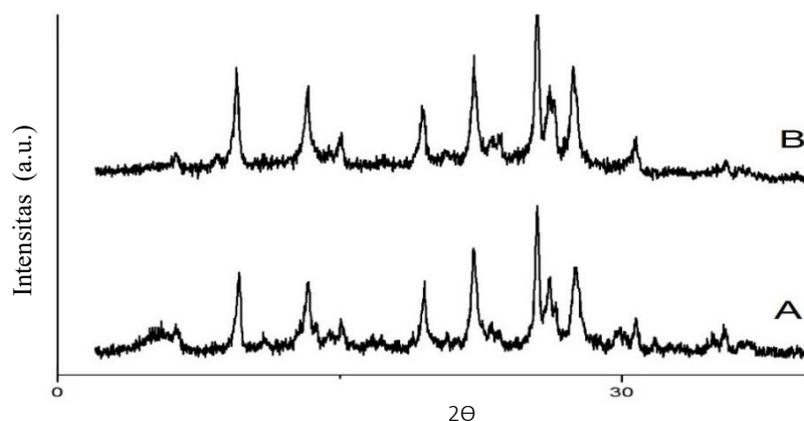
Pergeseran bilangan gelombang dapat diakibatkan terbentuknya silanol (Si-OH) dan Aluminol (Al-OH) baru yang menyebabkan semakin kuat ikatan hidrogen yang terjadi, sehingga menaikkan energi vibrasi molekul (Kurniawidi et al., 2021). Tabel 1 menyajikan data perubahan puncak serapan dari zeolit sebelum dan sesudah pencucian dengan HCl. Berdasarkan fakta diatas terlihat bahwa puncak-puncak serapan yang dihasilkan tidak mengalami perubahan berarti, yang menunjukkan bahwa pencucian dengan HCl tidak merusak kerangka zeolit secara umum.

Tabel 1 Data perubahan puncak serapan dari zeolit sebelum dan sesudah pencucian dengan HCl.

Jenis Vibrasi	Bilangan Gelombang zeolit (cm^{-1})	
	Sebelum Pencucian	Setelah Pencucian
O-H ulur	3441,01	3448,72
O-H tekuk	1635,64	1635,64
Si-O ulur asimetrik	1011,7	1080,14
Si-O-Si tekuk	455,2	462,92
O-Si-O simetrik	794,67	794,67
C-H ulur dari CH_3	2924,09	-
C-H ulur dari CH_2	2854,65	-

Karakterisasi kedua dilakukan dengan menggunakan alat difraksi sinar-x (XRD-spektroskopi) yang merupakan teknik yang umum dipakai untuk karakterisasi padatan kristal. Hasil difratogram zeolit alam tanpa pencucian dan sesudah pencucian dengan HCl dapat dilihat pada Gambar 2.

Secara keseluruhan terlihat adanya perbedaan antara difratogram zeolit alam tanpa aktivasi dan sesudah aktivasi, dimana pada difratogram zeolit alam sesudah aktifasi menghasilkan puncak-puncak yang lebih sedikit dibandingkan puncak-puncak pada zeolit alam tanpa aktivasi. Hal ini terjadi karena diperkirakan puncak-puncak yang hilang tersebut adalah puncak-puncak yang muncul akibat keberadaan oksida-oksida logam pengotor yang kemudian hilang setelah dilakukan pencucian dengan HCl. Tabel 2 menyajikan data perubahan nilai *basal spacing* zeolit alam sebelum dan sesudah pencucian.

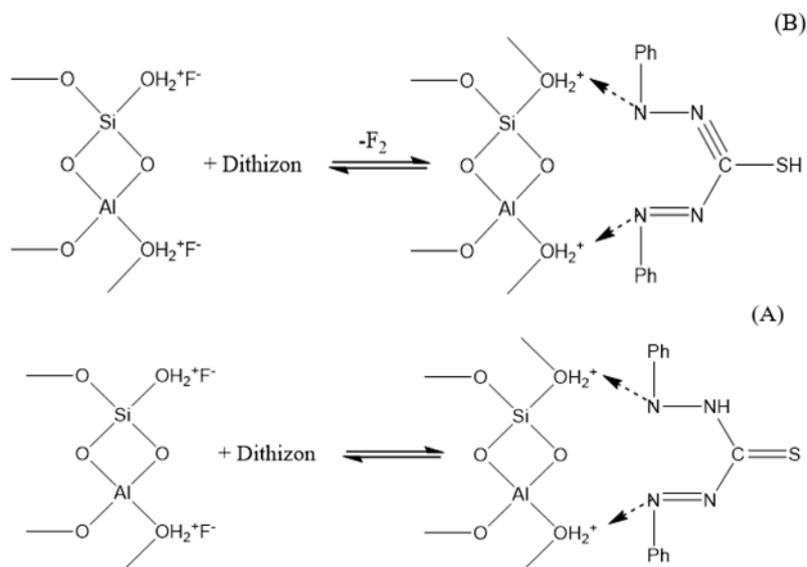


Gambar 2 Difratomogram (A) Zeolit alam ; (B) Zeolit alam hasil pencucian dengan HCl

Tabel 2 Perbandingan nilai *basal spacing* zeolit alam sebelum dan sesudah pencucian dengan HCl

Sebelum pencucian			Sesudah pencucian			Interpretasi
2θ	d	I/I ₀	2θ	d	I/I ₀	
9,5080	9,2940	89	9,6650	9,1440	60	Klinoptilolit
13,2640	6,6700	98	13,2800	6,6620	76	Mordenit
19,3550	4,5820	51	19,4820	4,5530	47	Mordenit
22,1400	4,0120	88	22,1090	4,0170	100	Klinoptilolit
25,4990	3,4905	99	25,5080	3,4893	75	Mordenit
26,2600	3,3910	91	26,1000	3,4110	75	Klinoptilolit
27,4100	3,2510	100	27,5100	3,2390	84	Mordenit
35,8500	2,5030	25	35,5000	2,5270	23	Kuarsa

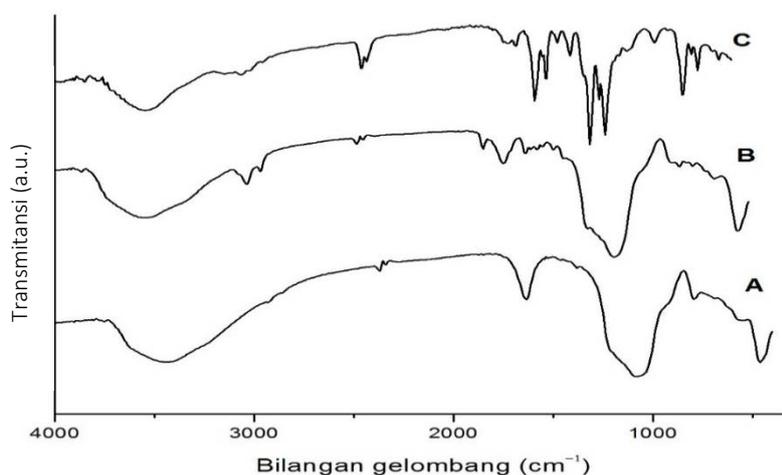
Imobilisasi dan Karakterisasi Zeolit Terimobilisasi Dithizon



Gambar 3 Bentuk thiketo (A); Bentuk enthiol (B)

Adsorben zeolit terimobilisasi dithizon diperoleh dengan mereaksikan zeolit hasil pencucian dengan HCl dengan dithizon menggunakan pelarut toluen. Reaksi ini dilakukan dengan cara memanaskan. Toluene merupakan pelarut non polar yang cocok untuk dithizon sedangkan etanol dan air merupakan pelarut polar (Madejova, 2003). Tujuan dari pencucian dengan toluen adalah untuk menghilangkan sisa dithizon yang tidak terikat pada permukaan zeolit, sedangkan pencucian dengan etanol dan air untuk menghilangkan pengotor baik yang polar maupun semi polar berdasarkan kaidah *like dissolve like*. Kemungkinan interaksi yang terjadi adalah sebagaimana yang diilustrasikan pada Gambar 3.

Pada dithizon terdapat gugus aktif seperti -SH dan -NH yang diharapkan dapat berfungsi untuk mengikat ion-ion logam seperti Hg (II), Pb(II) dan Ca(II) melalui interaksi kovalen (Hong et al., 2011). Hasil imobilisasi dithizon pada zeolit aktif dikarakterisasi dengan spektroskopi inframerah dan xRD untuk mengetahui apakah dithizon telah melapisi permukaan zeolit aktif. Spektra FTIR yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Spektra FTIR (A) Zeolit teraktivasi; (B) Zeolit terimobilisasi dithizon; (C) Dithizon murni

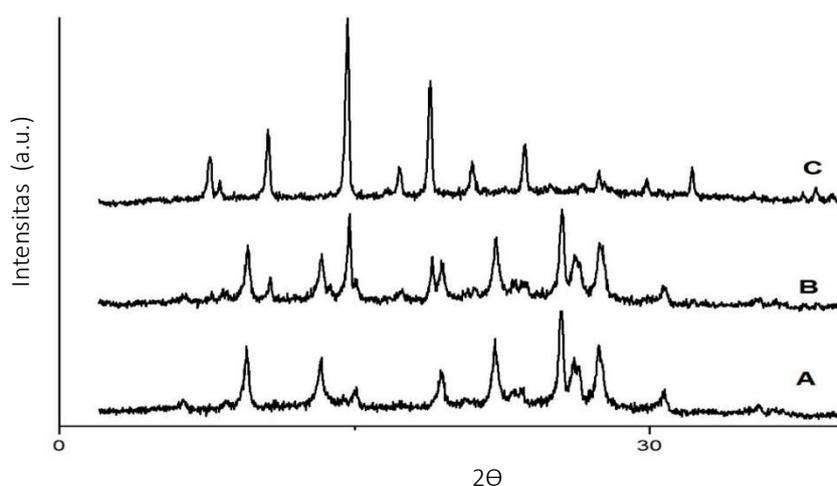
Perbandingan antara spektra inframerah zeolit tanpa imobilisasi (Gambar 4.A) dengan zeolit alam terimobilisasi dithizon (Gambar 4.B) dan spektra dithizon murni (Gambar 4.C) terlihat bahwa imobilisasi dithizon ke permukaan zeolit telah berhasil dilakukan. Hal ini dapat diamati dari munculnya pita-pita serapan yang karakteristik untuk dithizon pada bilangan gelombang 2854,65; 1527,62; 1496; 1435; 1211,3 cm^{-1} yang muncul pada zeolit terimobilisasi dithizon dan tidak ditemukan pada zeolit tanpa imobilisasi dithizon (Fitriyah, 2023). Tabel 3 menunjukkan data puncak serapan dari zeolit terimobilisasi dithizon.

Untuk dapat mendukung data spektra inframerah hasil imobilisasi dithizon, juga dilakukan karakterisasi dengan menggunakan instrumen difraksi sinar-x (xRD). Difraktogram xRD zeolit teraktivasi, zeolit terimobilisasi dithizon dan dithizon murni dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5 dapat dibuat suatu interpretasi dengan cara membandingkan difraktogram zeolit alam teraktivasi, zeolit alam terimobilisasi dan dithizon murni dan hasilnya disajikan pada Tabel 4.

Pada tabel IV.4 terlihat bahwa puncak-puncak dengan *d-space* atau sudut 2θ yang karakteristik untuk dithizon muncul sebanyak 4 puncak pada zeolit alam terimobilisasi dithizon. Sehingga dari hasil pengamatan data FTIR (Gambar IV.4) dan XRD (Gambar IV.5 dan Tabel IV.4) maka dapat disimpulkan bahwa dithizon telah berhasil diimobilisasi ke permukaan zeolit aktivasi.

Tabel 3 Data puncak serapan dari zeolit terimobilisasi dithizon

Bilangan gelombang (cm^{-1})	Jenis Vibrasi	Interpretasi
3425,58	N-H ulur	Dithizon
2854,65	C-H alifatik	Dithizon
1635,64	O-H tekuk	Zeolit
1527,62	N-H tekuk	Dithizon
1496 dan 1435	C=C aromatis	Dithizon
1211,3	Rentang C-N	Dithizon
1080,14	Si-O asimetrik	Zeolit
462,92	Si-O-Si tekuk	Zeolit



Gambar 5 Difraktogram (A) Zeolit teraktivasi; (B) Zeolit terimobilisasi dithizon; (C) Dithizon murni

Tabel 4 Interpretasi harga 2θ dan d serta intensitas relatif difraktogram sinar-x untuk zeolit terimobilisasi dithizon

2θ	d (spacing)	I/I ₀	Interpretasi
9.565	9.239	74	ZAA-T
10.68	8.275	17	Dithizon
13.3	6.654	81	ZAA-T
14.72	6.013	100	Dithizon
18.927	4.685	28	Dithizon
19.42	4.566	36	ZAA-T
22.163	4.008	63	ZAA-T
23.63	3.763	25	Dithizon
25.523	3.4872	86	ZAA-T
26.21	3.397	78	ZAA-T
27.482	3.243	90	ZAA-T

PENUTUP

Penelitian ini berhasil mensintesis dan mengkarakterisasi zeolit terimobilisasi dithizon (ZAA-D) sebagai material adsorben inovatif untuk pengolahan limbah industri. Aktivasi zeolit dengan HCl efektif membersihkan pengotor dan membuka pori-pori zeolit tanpa merusak struktur kerangka kristalnya, sebagaimana ditunjukkan melalui karakterisasi FTIR dan XRD. Proses imobilisasi dithizon menggunakan pelarut toluena menghasilkan interaksi kovalen antara gugus aktif dithizon (-SH dan -NH) dengan permukaan zeolit, terbukti dari munculnya pita serapan khas dithizon dan perubahan pola difraktogram zeolit.

Material ZAA-D yang dihasilkan memiliki kemampuan adsorpsi yang potensial terhadap logam berat seperti Hg(II), Pb(II), dan Ca(II), menjadikannya solusi efisien dan ramah lingkungan untuk pengolahan limbah. Penelitian ini menunjukkan bahwa ZAA-D dapat berkontribusi secara signifikan dalam mendukung pengelolaan limbah berkelanjutan dan membuka peluang aplikasi lebih luas untuk material adsorben berbasis zeolit di berbagai industri

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penelitian ini. Terima kasih kepada Universitas Negeri Makassar atas fasilitas laboratorium dan dukungan teknis yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anawati, F., Suseno, A., & Taslimah, T. (2012). Sintesis dan karakterisasi zeolit berbahan dasar limbah padat industri kertas (dregs) dengan penambahan abu sekam padi. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 15(1), 18–23. <https://doi.org/10.14710/jksa.15.1.18-23>
- Atikah, W. (2017). Karakterisasi zeolit alam gunung kidul teraktivasi sebagai media adsorben pewarna tekstil. *Arena Tekstil*, 32(1). <https://doi.org/10.31266/at.v32i1.2650>
- Fitriyah, F. (2023). Review: Sintesis zeolit dari bahan alam dan limbah buangan. *Jurnal Serambi Engineering*, 8(3). <https://doi.org/10.32672/jse.v8i3.6079>

- Hakiki, M., Makiyi, M., Nuryoto, N., Rahmayetty, R., Kustiningsih, I., & Kurniawan, T. (2021). Pengaruh lokasi zeolit alam bayah terhadap adsorpsi amonium: Studi kinetika dan kesetimbangan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22(1), 018–028. <https://doi.org/10.29122/jtl.v22i1.4403>
- Han, Y. S., Matsumoto, H., & Yamanaka, S. (1997). Preparation of New Silica Sol-based Pillared Clays with High Surface Area and High Thermal Stability. *Chem. Mater*, 9, 2013–2018.
- Hanipa, P., Pardoyo, P., Taslimah, T., Arnelli, A., & Astuti, Y. (2017). Pengaruh variasi waktu hidrotermal terhadap sintesis dan karakterisasi nanokristal zeolit a dari abu sekam padi. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 20(2), 79–83. <https://doi.org/10.14710/jksa.20.2.79-83>
- Hong, M. Y., Song, H., & Chen, M. L. (2011). Dithizone Immobilized Silica Gel On-Line Preconcentration of Trace Copper With Detection by Flame Atomic Adsorption Spectrometry. *Talanta*, 85, 625–630.
- Ismettulloh, M., Gumelar, F., Nuryoto, N., & Kurniawan, T. (2019). Modifikasi zeolit alam bayah menggunakan asam dan pengaplikasiannya dalam pengurangan amonium pada kolam ikan bandeng. *Jurnal Integrasi Proses*, 8(1), 07. <https://doi.org/10.36055/jip.v8i1.5506>
- Jumaeri, J., Astuti, W., & Lestari, W. (2017). Preparasi dan karakterisasi zeolit dari abu layang batu bara secara alkali hidrotermal. *Reaktor*, 11(1), 38. <https://doi.org/10.14710/reaktor.11.1.38-44>
- Karelius. (2008). *Imobilisasi ditizon pada zeolit alam dan pemanfaatannya sebagai adsorben Hg(II)*. Tesis. Kimia UGM.
- Kurniawidi, D., Alaa, S., Mulyani, S., & Rahayu, S. (2021). Sintesis zeolit dari batu apung (pumice) daerah ijobalit lombok timur sebagai adsorben logam fe. *Orbita Jurnal Kajian Inovasi Dan Aplikasi Pendidikan Fisika*, 7(2), 313. <https://doi.org/10.31764/orbita.v7i2.6010>
- Madejova, J. (2003). Review: FTIR Techniques in Clay Mineral Studies. *Vibrational Spectroscopy*, 31, 1–10.
- Maharani, D., & Nurzulla, W. (2022). Sifat mekanik film kitosan/pva dengan zeolit tersubstitusi perak sebagai kemasan aktif. *Unesa Journal of Chemistry*, 11(1), 61–68. <https://doi.org/10.26740/ujc.v11n1.p61-68>
- Nafisah, N. (2023). Analisis metode pengolahan limbah pabrik gula guna mengurangi pencemaran air di lingkungan sekitar. *Phydogogic Jurnal Fisika Dan Pembelajarannya*, 6(1), 28–32. <https://doi.org/10.31605/phy.v6i1.3097>
- Yulianis, Y., Husna, R., Zulva, N., & Mahidin, M. (2022). Adsorpsi ion logam fe³⁺ dalam air asam tambang menggunakan nano zeolit alam. *Indonesian Mining Professionals Journal*, 4(1), 29–38. <https://doi.org/10.36986/impj.v4i1.51>