

INOVASI ALAT PENYARING AIR KOMUNAL MENGGUNAKAN SISTEM FILTRASI MODULAR DENGAN MEDIA KAOLIN TERMODIFIKASI

Alfian Putra^{1*}, Syafruddin², Een Setiawati³

^{1,3} Teknik Kimia, Politeknik Negeri Lhokseumawe, Jl. Banda Aceh-Medan Km. 280,3, Buketrata, Masjid Punteut, Blang Mangat, Kota Lhokseumawe, Aceh 24301, Indonesia

^{1*}alfianputra2021@gmail.com (penulis korespondensi)

²syafruddin.pnl@gmail.com

³eensetiawaty@gmail.com

Abstrak— Keterbatasan teknologi penyaringan air yang efisien, ekonomis dan mudah diterapkan pada skala komunal masih menjadi tantangan dalam penyediaan air bersih. Penelitian ini mengembangkan sistem filtrasi modular dengan media kaolin termodifikasi. Kaolin dimodifikasi menggunakan surfaktan anionik, dan diproses lebih lanjut dengan bantuan ultrasonik untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi. Proses adsorpsi dilakukan baik dengan kaolin termodifikasi (KDM) maupun kaolin tanpa modifikasi (KTM), dengan variasi waktu iradiasi (10, 20, 30, 40 dan 50) menit pada suhu 55 °C. Evaluasi kinerja dilakukan melalui analisis FTIR, SEM, pengukuran TDS, dan uji efisiensi penyisihan logam. Hasil FTIR menunjukkan keberadaan gugus fungsional utama pada kaolin termodifikasi, meliputi -OH, Si-OH, Al-OH, serta ikatan CH dan CN, dengan variasi intensitas pita yang menandakan terjadinya modifikasi struktur. Setelah adsorpsi Hg(II), peningkatan intensitas transmisi mengindikasikan adanya interaksi aktif antara ion logam dan permukaan kaolin. Analisis SEM memperlihatkan morfologi kubik berukuran rata-rata ±100 nm dengan distribusi homogen, serta perubahan pori besar menjadi pori-pori kecil setelah adsorpsi sebagai bukti mekanisme penyerapan. Hasil uji kualitas air menunjukkan nilai TDS sebesar 400 mg/L, masih di bawah ambang batas maksimum kualitas air bersih menurut standar Indonesia (500 mg/L). Uji kinerja adsorpsi memperlihatkan efisiensi tertinggi 78,35% pada waktu kontak 40 menit, lebih tinggi dibandingkan kaolin alami yang hanya mencapai 68,76% pada 50 menit. Temuan ini membuktikan bahwa penerapan ultrasonik pada sistem filtrasi modular berbasis kaolin termodifikasi dapat meningkatkan kinerja penyisihan kontaminan, sehingga berpotensi sebagai solusi penyediaan air bersih komunal yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan

Kata kunci— kaolin, adsorben, logam hg, TDS, filtrasi komunal, ultrasonik

Abstract— The limitations of efficient, economical, and easily applicable water filtration technology on a communal scale remain a challenge in the provision of clean water. This study developed a modular filtration system using modified kaolin media. Kaolin was modified using anionic surfactants and further processed with ultrasonic assistance to increase adsorption effectiveness. The adsorption process was carried out with both modified kaolin (KDM) and unmodified kaolin (KTM), with variations in irradiation time (10, 20, 30, 40, and 50 minutes) at a temperature of 55 °C. Performance evaluation was carried out through FTIR analysis, SEM, TDS measurement, and metal removal efficiency testing. FTIR results show the presence of major functional groups in modified kaolin, including -OH, Si-OH, Al-OH, as well as CH and CN bonds, with variations in band intensity indicating structural modification. After Hg(II) adsorption, increased transmission intensity indicates active interaction between metal ions and the kaolin surface. SEM analysis shows a cubic morphology with an average size of ±100 nm with homogeneous distribution, as well as a change from large pores to small pores after adsorption as evidence of the adsorption mechanism. Water quality test results show a TDS value of 400 mg/L, which is still below the maximum threshold for clean water quality according to Indonesian standards (500 mg/L). The adsorption performance test showed the highest efficiency of 78.35% at a contact time of 40 minutes, higher than natural kaolin, which only reached 68.76% at 50 minutes. These findings prove that the application of ultrasound in a modular filtration system based on modified kaolin can improve contaminant removal performance, thus potentially serving as an efficient, environmentally friendly, and sustainable solution for communal clean water supply.

Keywords— kaolin, adsorbent, mercury metal, TDS, communal filtration, ultrasonic

I. PENDAHULUAN

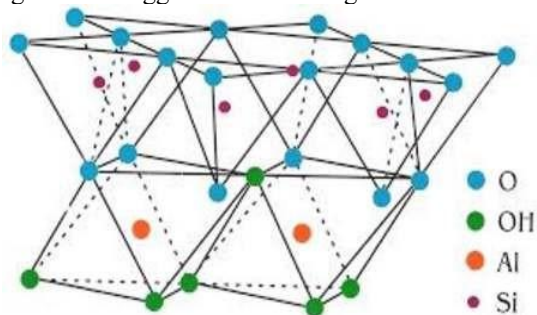
Kaolinit atau kaolin ($Al_2Si_2H_4(OH)_4$) merupakan salah satu mineral yang berpotensi digunakan sebagai adsorben alternatif. Kaolin memiliki karakteristik berupa ekspansi yang kecil, ketahanan kimia tinggi, serta kapasitas tukar kation yang cukup baik. Berdasarkan strukturnya, mineral ini termasuk ke dalam kelompok trioktahedral dan dioktahedral. [1–2] Keunggulan kaolin adalah ketersediaannya yang melimpah secara global, biaya yang rendah, serta sifatnya yang aman dan mudah diperoleh. [3–4] Akan tetapi, kemampuan adsorpsinya masih terbatas jika dibandingkan dengan material seperti zeolit, karbon aktif, maupun bentonit. [5] Untuk meningkatkan kinerjanya, kaolin dapat dimodifikasi dengan bantuan surfaktan sebagai agen pengubah.

Kaolin terbentuk melalui pelapukan yang umumnya terjadi di permukaan atau dekat dengan permukaan tanah, dan paling

sering ditemukan pada batuan beku. [6] Mekanisme lainnya adalah alterasi hidrotermal, yaitu ketika cairan hidrotermal melewati retakan, patahan, dan daerah permeabel lain, sehingga batu kapur berubah menjadi endapan kaolin. [7] Endapan kaolin diklasifikasikan menjadi dua jenis: residu dan sedimen. Kaolin residu ditemukan di lokasi pembentukannya bersama batuan induk, tidak mengalami perpindahan, kristalnya teratur, dan proses pergantian ion jarang terjadi. [8] Adapun kaolin sedimen merupakan hasil transportasi oleh air, angin, atau gletser, kemudian diendapkan di cekungan dengan bentuk kristal yang lebih tidak teratur. Struktur kaolin dapat dilihat pada Gambar 1.

Kaolinit mempunyai permukaan kristal dengan muatan negatif tetap, yang sifatnya tidak bergantung pada variasi pH. Muatan tersebut berasal dari adanya penggantian atom dalam struktur kristal yang tidak mengubah konfigurasi dasarnya. Misalnya, atom aluminium bermuatan +3 menggantikan atom

silikon bermuatan +4, sehingga jumlah muatan positif berkurang dan meninggalkan muatan negatif berlebih.



Gambar 1. Struktur Kaolinit

Dengan adanya modifikasi, kemampuan kaolin dalam menyerap anion meningkat melalui pertukaran ion. Penelitian [9] menunjukkan bahwa kaolin alami dapat dimodifikasi dengan cara memasukkan surfaktan Alkyl Benzene Sulfonate (ABS) ke dalam celah antar lapisan. Adsorben yang diperoleh setelah modifikasi memiliki kapasitas adsorpsi maksimum berkisar antara 2,3 hingga 2,88 m²/g. Artinya, bantuan teknologi ultrasonic dapat secara signifikan meningkatkan kemampuan adsorpsi adsorbent. Ultrasonic telah terbukti menjadi alat yang sangat berguna dalam memecah ikatan antara adsorben dan adsorbat serta mempercepat proses transfer massa.[10-11] Setelah melalui proses aktivasi dengan bantuan teknologi ultrasonik, adsorben yang dihasilkan selanjutnya diaplikasikan ke dalam sistem penyaring air komunal guna mengoptimalkan kinerja proses filtrasi.

Inovasi alat penyaring air komunal dengan sistem filtrasi modular berbasis media kaolin termodifikasi memiliki sejumlah keunggulan yang menjadikannya solusi tepat untuk penyediaan air bersih di masyarakat. Alat ini mampu menyaring logam berat seperti Fe, Mg, maupun Hg secara lebih efisien berkat media kaolin yang telah dimodifikasi sehingga daya adsorpsinya meningkat. Sistem modular yang diterapkan membuat rancangan alat fleksibel dan dapat diperluas sesuai kebutuhan kapasitas air atau jumlah pengguna. Selain itu, penggunaan kaolin sebagai material lokal menjadikannya ramah lingkungan, mudah diperoleh, dan berbiaya rendah. Biaya operasional juga lebih hemat karena sistem filtrasi ini tidak memerlukan energi listrik besar, serta mudah dalam perawatan karena komponen modulernya dapat diganti atau dibersihkan dengan sederhana. Tidak hanya meningkatkan kualitas air dengan menurunkan TDS dan menormalkan pH, alat ini juga dirancang untuk kebutuhan komunal sehingga mampu menyediakan air bersih bagi masyarakat dengan cara yang lebih praktis, efektif, dan terjangkau.

II. METODOLOGI PENELITIAN

II.I Bahan

Kaolin yang digunakan berasal dari Nisam, Aceh Utara. N-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) dan Alkyl Benzene Sulfonate (ABS) diperoleh dari Merck. Polyethersulfone (PESf) sebagai bahan pengikat didapatkan dari Amoco Chemicals dan CRODA (Article 135). Kaolin dan PESf dipanaskan pada suhu 100°C untuk mengurangi kelembapan, kemudian kaolin

diaktivasi dengan HCl 1N, dicuci, dikeringkan pada suhu 85°C, dan disaring dengan ayakan 110 mesh sebelum penyimpanan dalam desikator. Limbah cair penelitian diambil dari Reservoir Limbah Kota Lhokseumawe, yang teridentifikasi mengandung merkuri dan beberapa logam berat, lalu difiltrasi dengan kertas saring untuk memisahkan padatan sebelum uji karakterisasi dilakukan.

II.II Metodologi

a. Sintesis Kaolin dengan Surfaktan ABS

Sebelum proses sintesis, kaolin terlebih dahulu diaktivasi dengan larutan HCl 1 M. Sebanyak 134 kg kaolin teraktivasi kemudian dicampurkan dengan 89 L larutan surfaktan Alkyl Benzene Sulfonate (ABS), dan campuran tersebut diinkubasi menggunakan inkubator pengocok pada suhu 35°C dengan kecepatan 150 rpm selama 24 jam. Residu hasil inkubasi dicuci berulang kali dengan air suling untuk menghilangkan sisa surfaktan, dikeringkan dalam oven pada suhu 55°C selama 12 jam, kemudian digiling hingga melewati ayakan berukuran 115 mesh. Dari proses ini diperoleh kaolin termodifikasi sebanyak 2 kg, sedangkan tanpa modifikasi diperoleh dengan massa yang sama. Modifikasi KDM digunakan sebanyak 1,8 g dan KTM dengan berat yang sama adalah 1,8 g. setiap adsorben diradidiasi dengan ultrasonic menggunakan sampel limbah dalam wadah 100 ml. Selanjutnya, masing-masing adsorben dimasukkan ke dalam alat penyaring air untuk menguji kinerjanya dalam menurunkan kadar logam berat dan parameter kualitas air lainnya, seperti pH dan TDS.

b. Karakterisasi

Kaolin termodifikasi maupun kaolin tanpa modifikasi terlebih dahulu dianalisis menggunakan FTIR untuk mengidentifikasi gugus fungsional dan memastikan adanya modifikasi struktur permukaan. Selanjutnya, karakterisasi morfologi dilakukan dengan SEM untuk mengamati bentuk partikel, distribusi pori, dan perubahan struktur akibat modifikasi maupun adsorpsi. Setelah itu, kedua jenis kaolin diuji kinerjanya dalam prototipe alat penyaring air, dengan parameter kualitas air difokuskan pada pengukuran Total Dissolved Solids (TDS). Rangkaian pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas kaolin termodifikasi dibandingkan kaolin alami, baik dari sisi struktur, morfologi, maupun kemampuan filtrasi, sehingga dapat diketahui potensi penerapannya sebagai media filtrasi dalam sistem pengolahan air bersih.

II.III Alat Sistem Filtrasi Modular



(a)



(b)

Gambar 2. Alat Filtrasi Modular

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

III.I Kaolin Termodifikasi

Penelitian ini bertujuan untuk menilai efisiensi kinerja adsorben serta mekanisme proses adsorpsi yang dibantu ultrasonic untuk menghilangkan ion Hg(II) dalam limbah dan dikombinasikan dengan penerapan alat penyaring air komunal menggunakan sistem filtrasi modular dalam upaya penghilangan kandungan logam pada air di Desa Jeulikat. Parameter waktu kontak digunakan sebagai variabel penting, mengingat perannya dalam menentukan efektivitas adsorben hingga tercapainya kondisi kesetimbangan adsorpsi. Rangkaian pengujian dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi waktu kontak terhadap proses penyerapan logam pada media kaolin termodifikasi dan kaolin tanpa modifikasi. Hasil penelitian memperlihatkan adanya perbedaan signifikan, di mana kaolin termodifikasi menunjukkan kapasitas adsorpsi logam yang lebih unggul dibandingkan dengan kaolin alami.

Tabel 1. Hasil Analisa pada sampel sebelum dan sesudah proses adsorpsi.

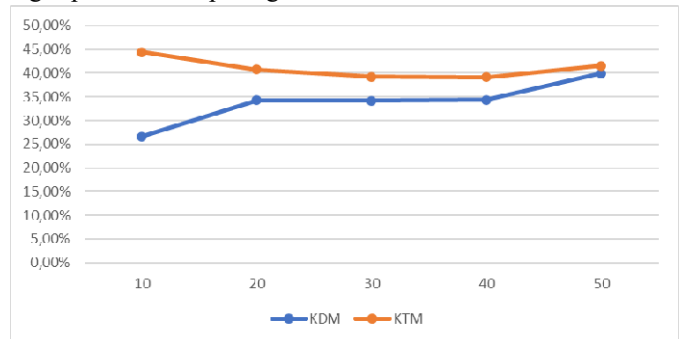
Waktu Iradiasi	Suhu Iradiasi	Sampel air	Konsentrasi Hg setelah Proses Adsorpsi (ml)
----------------	---------------	------------	---

Ultrasonik (menit)	Ultrasonik (°C)	limbah waduk (ml)	Modifikasi	Non-Modifikasi
10	55°C	100	26,5791	44,4152
20			34,3123	40,7683
30			34,1985	39,2345
40			34,3530	39,1569
50			39,9561	41,5481

Tabel 2. Efisiensi penyisihan air di Desa Jeulikat dengan KDM

Waktu Iradiasi Ultrasonik (menit)	Suhu Iradiasi Ultrasonik (°C)	Sampel air limbah waduk (ml)	Efisiensi Penyisihan logam Hg (%)	
			Modifikasi	Non-Modifikasi
10	55°C	100	70,3509	58,1012
20			69,8314	60,2435
30			68,5146	63,3809
40			78,3833	64,9110
50			67,4150	68,7601

a. Perbandingan Hasil Penyerapan Kaolin Modifikasi (KDM) dan Tanpa Modifikasi (KTM) pada Limbah Air di Desa Jeulikat Penyisihan logam Hg dengan menggunakan adsorben kaolin yang diiradiasi ultrasonik menunjukkan perubahan konsentrasi Hg seperti terlihat pada gambar di bawah ini.



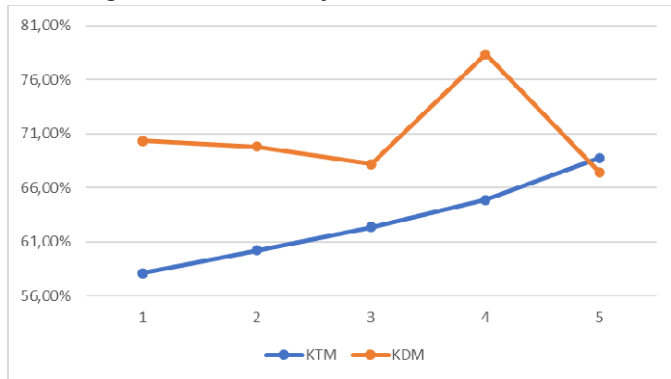
Gambar 3. Perbandingan Konsentrasi Hg pada sampel KDM pada suhu 55°C

Dari Gambar 2. Konsentrasi Hg yang terdapat dalam limbah waduk semakin berkurang setelah di adsorpsi, proses adsorpsi menggunakan 2 perlakuan adsorben yaitu adsorben yang dimodifikasi dan juga tidak dimodifikasi, Konsentrasi terendah Hg menggunakan Kaolin yang dimodifikasi pada waktu iridiasi 10 menit pada dengan konsentrasi 26,5791 % sedangkan pada kaolin yang tidak di modifikasi terendah pada waktu 40 menit dengan konsentrasi 39,1569 %. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi dengan menggunakan kaolin

yang di modifikasi efektif untuk penyerapan logam Hg dalam air limbah.

b. Efisiensi Penyisihan Limbah dengan KDM dan KTM

Efisiensi adsorpsi pada kaolin tanpa modifikasi menunjukkan hasil optimal pada waktu kontak 50 menit sebesar 68,76%, sedangkan kaolin termodifikasi mencapai efisiensi tertinggi sebesar 78,38% pada waktu kontak 40 menit. Peningkatan ini disebabkan oleh terikatnya logam pada pori-pori kaolin termodifikasi. Selain itu, pergerakan molekul dalam limbah cair yang lebih cepat meningkatkan frekuensi interaksi antara kaolin termodifikasi dan ion logam. Namun, dengan bertambahnya waktu kontak ultrasonik, efisiensi adsorpsi cenderung menurun akibat kejenuhan adsorben.



Gambar 4. Efisiensi Penyisihan logam Hg terhadap waktu iradiasi pada suhu 55°C

Kaolin yang dimodifikasi surfaktan menunjukkan peningkatan efisiensi adsorpsi karena ion logam menempel pada permukaan kaolin dan berinteraksi dengan molekul surfaktan. Interaksi tersebut membentuk struktur bilayer yang memperbesar luas permukaan aktif dan meningkatkan jumlah ion logam yang dapat terikat. Selain itu, surfaktan memberikan kontribusi tambahan berupa peningkatan ketersediaan ion pada permukaan adsorben, sehingga proses penyerapan ion dari limbah cair menjadi lebih efektif.[12]

Penggunaan kaolin yang dimodifikasi surfaktan anionik untuk adsorpsi logam Cr(IV) menghasilkan efisiensi sebesar 95,08% pada waktu kontak optimum 180 menit. Penerapan teknik ultrasonik berkecepatan tinggi dalam proses ini mampu memperluas area permukaan adsorben dan mempercepat mobilitas molekul, sehingga laju adsorpsi meningkat.[13]

Menurut [14] menjelaskan bahwa fenomena ini dipengaruhi oleh terjadinya kavitasi, yaitu proses pembentukan, pertumbuhan, serta runtuhnya gelembung gas mikro, disertai fluktuasi tekanan tinggi akibat iradiasi ultrasonik.

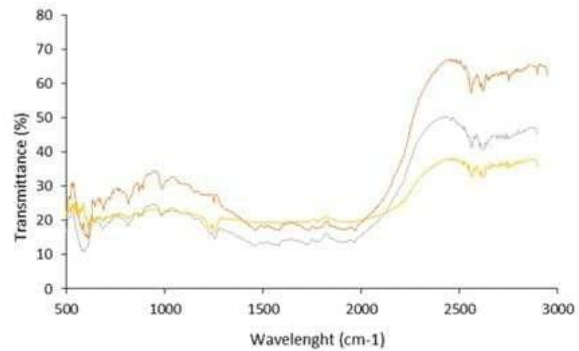
III.II Karakteristik

a. Analisa Inframerah Transformasi Fourier (FTIR)

Spektrum FTIR bahan digunakan untuk menentukan komposisi dan pola kelompok fungsional. Spektum FTIR KTM (garis kuning) dan KDM (garis jingga) ditampilkan

pada gambar 3. Untuk KTM, pita penyerapan pada 364,20 cm⁻¹ dan 1637,20 cm⁻¹ menunjukkan getaran regangan -OH dalam air diserap secara fisik. Pita pada 1014,50 cm⁻¹ dan 972,54 cm⁻¹ terkait dengan getaran ikatan Si-OH dan Al-OH. Pita pada 1609,45 cm⁻¹ menunjukkan getaran fleksibilitas CC-C yang terkait dengan kelompok metilen. Pita pada Panjang gelombang yang lebih rendah menunjukkan getara jaringan Al-O-Si dan Si-O-Si.

Spektrum ABS (garis abu) menunjukkan pita penyerapan yang lebih kuat didaerah 2913,51 cm⁻¹ dan 2955,06 cm⁻¹, yang terkait dengan getaran regangan ikatan CH pada kelompok -CH₃ dan -CH₂. Pita pada 925,72 cm⁻¹ dan 946,4 cm⁻¹ sesuai dengan getaran ikatan CN. Pada Panjang gelombang 2854,25 dan 2985,32 cm⁻¹, dapat dilihat pada adsorben kaolin yang dimodifikasi, yang diduga berasal dari getaran ikatan CH. Setelah adsorpsi merkuri, tidak perubahan yang diamati pada spektrum kaolin yang dimodifikasi. Namun, terdapat peningkatan intensitas transmisi pita tersebut. Hal ini dapat menjadi indikasi bahwa Hg(II) dapat menyebabkan peningkatan afinitas adsorpsi terhadap kontaminan.



Gambar 5. Spektrum FTIR

b. Screening Electron Microscope (SEM)

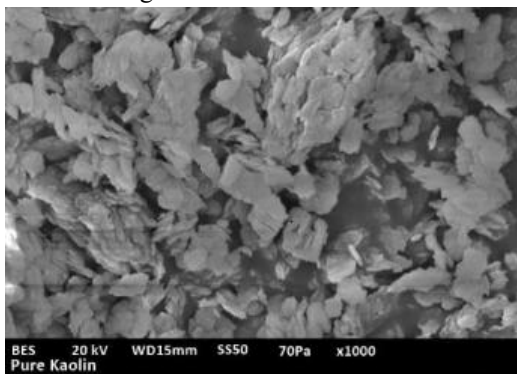
Hasil analisis pada pengujian SEM menunjukkan bahwa setelah dimodifikasi dengan surfaktan ABS, luas permukaan total mineral tanah liat kaolin menurun drastis dari 19,10 m²/g menjadi 9,36 m²/g. Di sisi lain, diameter pori dan volume pori meningkat dari 0,05 cc/g menjadi 0,09 cc/g dan 9,48 menjadi 24,31 nm. Masing-masing peningkatan diameter pori dan volume pori serta penurunan luas permukaan yang disebabkan oleh surfaktan yang mengisi sebagian besar ruang pada permukaan tanah liat mengakibatkan peningkatan volume pori dan diameter pori. Hasil yang diperoleh dalam studi ini dua kali lipat luas permukaan 4,3 m²/g.[15-16-17]

Tabel 3. Luas permukaan, volume pori, dan diameter pori KTM dan KDM.

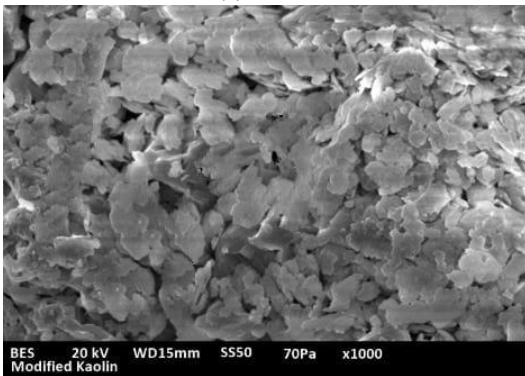
Jenis Adsorben	BET Surface area (m ² /g)	Pore (cc/g)	Pore Diameter (nm)

KTM	19,10	0,05	9,48
KDM	9,36	0,09	24,31

Morfologi kaolin termodifikasi surfaktan yang diproses dengan bantuan ultrasonik ditampilkan pada Gambar 4. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa morfologi kaolin termodifikasi surfaktan dengan surfaktan ABS memiliki sifat homogen tanpa terbentuk agregasi, serta membentuk nanokomposit berstruktur kubik dengan ukuran rata-rata sekitar 100 nm. Sebelum proses adsorpsi ion Hg(II), permukaan kaolin termodifikasi (Gambar 4a) masih terlihat didominasi oleh pori-pori besar. Namun, setelah proses adsorpsi (Gambar 4b), permukaan mengalami perubahan berupa rongga yang rusak dan membentuk pori-pori berukuran lebih kecil. Perubahan morfologi ini mengindikasikan adanya proses penyerapan ion Hg(II) pada permukaan morfologi kaolin termodifikasi surfaktan.



(a) KTM



(b) KDM

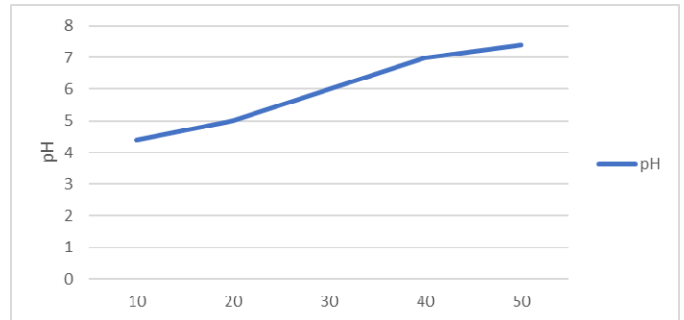
Gambar 6. Analisa Analisa SEM: Kaolin (a) Sebelum dan (b) Sesudah Adsorpsi

c. Total Dissolved Solids (TDS)

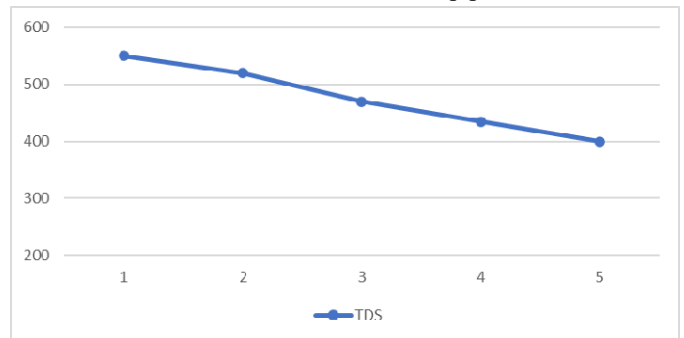
Tabel 4. Pengukuran pH dan TDS

No	Waktu Pengolahan (menit)	pH	TDS (mg/L)
1	10	4,5	550

2	20	5	520
3	30	6	470
4	40	7	435
5	50	7,3	400



Gambar 7. Kurva Waktu Kontak Terhadap pH



Gambar 8. Kurva Waktu Kontak Terhadap TDS

Hasil uji Total Dissolved Solid (TDS) pada sampel air keluaran alat penyaring menunjukkan nilai sebesar 400 mg/L, yang masih berada di bawah ambang batas yang ditetapkan oleh Permenkes RI No. 492/Menkes/Per/IV/2010, yaitu 500 mg/L untuk standar kualitas air minum. Kondisi ini menegaskan bahwa sistem filtrasi berbasis kaolin termodifikasi mampu menurunkan kadar zat padat terlarut secara signifikan, sekaligus memenuhi persyaratan kualitas air bersih yang berlaku di Indonesia. Efektivitas ini semakin didukung oleh hasil pengamatan terhadap pengaruh waktu kontak adsorben KDM dengan limbah, di mana pencatatan pH dan TDS yang dilakukan setiap 10 menit menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak, pH limbah mendekati kondisi normal dan nilai TDS semakin menurun. Fenomena tersebut berkaitan dengan kejenuhan adsorben dalam penyerapan ion Hg(II) yang menurunkan efisiensi adsorpsi seiring lamanya iradiasi ultrasonik, sehingga sebagian logam mengendap. Secara keseluruhan, temuan ini mengindikasikan bahwa penerapan alat penyaring berbasis kaolin termodifikasi tidak hanya efektif dalam mengurangi kontaminan terlarut, tetapi juga memiliki potensi besar sebagai solusi alternatif penyediaan air bersih, khususnya di wilayah dengan kualitas air rendah. Selain ramah lingkungan dan bernilai ekonomis,

teknologi sederhana ini berpeluang dikembangkan lebih lanjut untuk pemanfaatan berkelanjutan.

d. Kesimpulan

Analisis FTIR mengonfirmasi keberadaan gugus fungsional utama pada kaolin termodifikasi, termasuk -OH, Si-OH, Al-OH, serta ikatan CH dan CN, dengan variasi intensitas pita yang menunjukkan terjadinya modifikasi struktur material. Setelah proses adsorpsi Hg(II), peningkatan intensitas transmisi tanpa pergeseran pita signifikan mengindikasikan adanya interaksi antara ion logam dan permukaan kaolin termodifikasi. Hasil SEM mendukung temuan ini dengan memperlihatkan morfologi berstruktur kubik berukuran rata-rata ± 100 nm, distribusi homogen, dan permukaan berpori yang setelah adsorpsi mengalami perubahan menjadi pori-pori kecil sebagai bukti mekanisme penjerapan Hg(II). Uji kinerja adsorpsi menunjukkan bahwa kaolin termodifikasi dengan bantuan ultrasonik lebih unggul dibandingkan kaolin alami, dengan efisiensi maksimum 78,38% pada waktu kontak 40 menit, dipengaruhi oleh pembentukan bilayer dan fenomena kavitasi ultrasonik. Sementara itu, hasil filtrasi menghasilkan nilai TDS sebesar 400 mg/L, masih sesuai dengan batas aman yang ditetapkan Permenkes RI No. 492/Menkes/Per/IV/2010. Secara keseluruhan, kaolin termodifikasi ultrasonik berpotensi diaplikasikan sebagai teknologi filtrasi komunal yang efisien, ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk penyediaan air bersih.

IV. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan tinggi Kepada Kementerian Pendidikan Tinggi Sains Dan Teknologi serta Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah mendanai melalui hibah nomor 75/SPK/C.C4/PPK.DHK/VII/2025.

REFERENSI

- [1] Abdurrahman, Suhendrayatna, D.S., Syahiddin (2016). *Pengaruh Aktivasi Adsorben Biomassa Terhadap Gugus Hidroksil Pada Proses Adsorpsi Ion Logam Timbal (Pb)*. Jurnal Teknik Kimia USU, Vol. 5, No. 3 (September 2016), pp. 7-11.
- [2] A. K. Giri, R. Patel, and S. Mandal, *Removal of Cr(VI) from aqueous solution by Eichhornia crassipes root biomass-derived activated carbon*, Chem. Eng. J., 185, (2012) 71–81.
- [3] A. Bhatnagar, V.J.P. Vilar, C.M.S. Botelho, and R.A.R. Boaventura, *Coconut-based Biosorbents For Water Treatment; a review of the recent literature*. Advances in Colloid and Interface Science, 160(1-2), (2010) 1–15.
- [4] A. Dada, A. Olalekan, A. Olatunya, and O. Dada, *Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin – Radushkevich Isotherms Studies of Equilibrium Sorption of Zn²⁺ Unto Phosphoric Acid Modified Rice Husk*. IOSR Journal of Applied Chemistry, 3(1), (2012) 38–45
- [5] Darmono, *Lingkungan Hidup dan Pencemaran Hubungannya dengan Toksikologi Senyawa Logam*, Penerbit Universitas Indonesia Press. Jakarta, 2001, p. 46.
- [6] M.H. Karaoğlu, M. Doğan, and M. Alkan, *Removal of Reactive Blue 221 by Kaolinite from Aqueous Solutions*, Industrial & Engineering Chemistry Research, 49(4), (2010) 1534–1540.
- [7] M. Faisal, *Efisiensi Penyerapan Logam Pb²⁺ dengan Menggunakan Campuran Bentonit Dan Enceng Gondok*, Jurnal Teknik Kimia USU, Vol. 4, No. 1 (Maret 2015), pp. 20-25.
- [8] Jin, X., Jiang, M., Du, J., Chen, Z. 2013. *Removal of Cr(VI) from aqueous solution by surfactant-modified kaolinite*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Hal: 08
- [9] Jorfi, S., Soltani, R. D. C., Merlin, A., Ahmadi, M., Khataee, A., Safari, M. 2017. *Sono-assisted adsorption of a textile dye on milk vetch-derived charcoal supported by silica nanopowder*. Journal of Environmental Management, Vol187. Hal: 111-121
- [10] Khamdahsag, P., Thongkao, W., Saowapakpongchai, A., Tanboonchuy, V. 2017. *Kaolin-modified nano zero-valent iron synthesis via box-Behnken design optimization*. Applied Environmental Research, Hal: 55-65.
- [11] Suryani, H Agusnar, B Wirjosejono, T Rihayat, Nurhanifa. 2018. *Thermal degradation of Aceh's bentonite reinforced poly lactic acid (PLA) based on renewable resources for packaging application*. AIP Conference Proceedings 2049 (1), 020040
- [12] Leal, P. V., Magriotis, Z. M., Sales, P. F., Papini, R. M., Viana, P. R. 2017. *Effect of the acid treatment conditions of kaolinite on ether amine adsorption: A comparative analysis using chemometric tools*. Journal of Environmental Management, Vol.197. Hal: 393-403
- [13] Olaremu, A. G. 2015. *Physico-Chemical Characterization of Akoko Mined Kaolin Clay*. Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, Vol.3. Hal: 353-361
- [14] Purnama, H., Musthofa, M., Akhwan, A.H., Dewi, I.K. 2014. *Effect of ultrasound on zeolite preparation from rice husk ash*. Proceedings of the 3rd Applied Science for Technology Innovation, Hal: 24-30
- [15] Shaban, M., W., Hassouna, N. E., Nasief, F. M., Abukhadra, M. R. 2017. *Adsorption properties of kaolinite-based nanocomposites for Fe and Mn pollutants from aqueous solutions and raw groundwater: kinetics and equilibrium studies*. Environ SciPollut Res
- [16] Sharifpour, E., Khafri, H. Z., Ghaedi, M., Asfaram, A., Jannesar, R. 2017. *Isotherms and kinetic study of ultrasound-assisted adsorption of malachite green and pb²⁺ ions from aqueous samples by copper sulfide nanorods loaded on activated carbon: experimental design optimization*. Ultrasonics Sonochemistry, Vol.17
- [17] M. Wegmuller, J. P. von der Weid, P. Oberson, and N. Gisin, "High resolution fiber distributed measurements with coherent OFDR," in Proc. ECOC'00, 2000, paper 11.3.4, p. 109.