

Pengaruh Kombinasi Arang Aktif dan Bentonit dalam Menurunkan Kadar COD, BOD, dan TSS pada Limbah Cair Industri Tahu

The Effect of a Combination of Activated Carbon and Bentonite on Reducing COD, BOD, and TSS Levels in Tofu Industry Wastewater

Barita Aritonang^{1*}, Ahmad Hafizullah Ritonga², Karnirius Harefa³,
Dicky Yuswardi Wiratma⁴, Herlina⁵

^{1,2,3,4,5}Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam, Jl. Sudirman No.38, Petapahan, Kec. Lubuk Pakam,
Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20512
Email: baritaaritonang11@gmail.com

Abstrak

Limbah cair yang dihasilkan dari proses produksi tahu umumnya mengandung zat organik dan padatan tersuspensi dengan konsentrasi yang cukup tinggi, termasuk nilai Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), dan Total Suspended Solid (TSS) yang melampaui ambang batas baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan (Permen LHK) Nomor P.16 Tahun 2019. Kandungan pencemar yang berlebihan dapat mengakibatkan degradasi kualitas air dan berdampak negatif terhadap ekosistem perairan maupun kesehatan masyarakat sekitar. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis efektivitas kombinasi arang aktif dan bentonit, baik sebelum maupun sesudah diaktivasi, dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS pada limbah cair industri tahu. Analisis BOD dilakukan melalui metode inkubasi selama lima hari pada suhu 24 °C, sementara pengujian COD dilakukan dengan metode refluks tertutup dan TSS diukur menggunakan metode gravimetri. Karakterisasi adsorben dilakukan berdasarkan parameter Standar Nasional Indonesia (SNI), analisis gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infrared (FT-IR), serta pengamatan morfologi dengan Scanning Electron Microscope (SEM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa aktivasi mampu memperluas pori serta meningkatkan daya adsorpsi kedua material. Kombinasi arang aktif dan bentonit teraktivasi terbukti efektif menurunkan kadar BOD dari 3.600 mg/L menjadi 140 mg/L, COD dari 1.500 mg/L menjadi 185 mg/L, dan TSS dari 320 mg/L menjadi 270 mg/L. Seluruh parameter hasil pengolahan telah sesuai dengan baku mutu yang berlaku, sehingga kombinasi kedua adsorben ini dinyatakan efektif untuk pengolahan limbah cair industri tahu.

Kata kunci: Limbah cair; arang aktif; bentonite; adsorpsi

Abstract

Wastewater produced from tofu manufacturing typically contains substantial amounts of organic substances and suspended particles. The concentrations of Biochemical Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), and Total Suspended Solids (TSS) frequently surpass the permissible thresholds established in the Regulation of the Minister of Environment and Forestry (Permen LHK) No. P.16 of 2019. Such high levels of pollutants may degrade water quality and pose risks to both aquatic ecosystems and public health in nearby areas. This study investigates the efficiency of combining activated carbon and bentonite, in both raw and activated forms, for reducing BOD, COD, and TSS concentrations in wastewater originating from tofu industries. The BOD test was performed using a five-day incubation at 24 °C, COD was analysed via the closed reflux method, and TSS was quantified using the gravimetric approach. Adsorbent characteristics were examined in accordance with the Indonesian National Standard (SNI), supported by functional group analysis using Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy and morphological observation with Scanning Electron Microscopy (SEM). The results demonstrated that activation enhanced pore development and improved the adsorption capability of both materials. The combined activated carbon and bentonite effectively decreased BOD from 3,600 mg/L to 140 mg/L, COD from 1,500 mg/L to 185 mg/L, and TSS from 320 mg/L to 270 mg/L. All treated parameters met the regulatory quality standards, indicating that the activated mixture of these adsorbents provides an efficient and environmentally sound method for treating tofu processing wastewater.

Keywords: Tofu industry; Wastewater; Activated carbon; Adsorption

*Corresponding author: Barita Aritonang, Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam, Kabupaten Deli Serdang, Indonesia

E-mail : baritaaritonang11@gmail.com

Doi : 10.35451/cbxjb379

Received : October 08, 2025. Accepted: October 25 2025. Published: October 31, 2025

Copyright: © 2025 Barita Aritonang. Creative Commons License This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

1. PENDAHULUAN

Industri tahu memiliki peranan penting dalam meningkatkan kesejahteraan masyarakat melalui penyediaan sumber pangan berprotein tinggi dan peluang usaha bagi masyarakat. Namun, di balik manfaat tersebut, proses produksinya menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar yang berpotensi mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Limbah tersebut mengandung berbagai bahan pencemar seperti zat warna sintetis, logam berat, serta senyawa organik dan anorganik yang sulit terurai secara alami [1–3].

Secara umum, limbah cair dari industri tahu memiliki kadar Chemical Oxygen Demand (COD), Biochemical Oxygen Demand (BOD), dan Total Suspended Solids (TSS) yang jauh melebihi ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.16/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019, yaitu BOD sebesar 150 mg/L, COD sebesar 200 mg/L, dan TSS sebesar 300 mg/L. Pembuangan limbah tanpa pengolahan yang memadai dapat menyebabkan penurunan kualitas air, kerusakan ekosistem perairan, serta meningkatkan risiko penyakit seperti diare, kolera, dan gangguan fungsi hati maupun ginjal [1–3].

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah cair industri tahu memiliki kandungan bahan organik yang sangat tinggi. (Yulianto et al., 2020) [4], melaporkan bahwa kadar BOD mencapai 2.619,06 mg/L dan COD sebesar 2.690,27 mg/L, sedangkan (Pradana et al., 2018) [5], menemukan bahwa kadar BOD dapat mencapai 6.870 mg/L dan COD hingga 10.500 mg/L [4,5]. Nilai-nilai ini menunjukkan perlunya penerapan teknologi pengolahan yang lebih efisien untuk menurunkan kadar bahan pencemar tersebut.

Salah satu alternatif pengolahan limbah cair yang lebih efektif dan ramah lingkungan adalah metode adsorpsi menggunakan bahan berpori seperti arang aktif dan bentonit. Metode ini relatif sederhana, efisien, serta mampu menurunkan konsentrasi bahan pencemar secara signifikan. Penelitian oleh Hemamathi et al., 2023) [6] menunjukkan bahwa arang aktif efektif dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TDS pada limbah cair industri tekstil, sedangkan (Maulani et al., 2021) [7] melaporkan bahwa bentonit mampu menurunkan kadar BOD sebesar 87%, COD sebesar 84%, dan TSS sebesar 53% pada limbah cair industri tahu.

Upaya konvensional yang umum digunakan untuk menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS antara lain proses sedimentasi, filtrasi, serta koagulasi-flokulasi [8]. Meskipun metode tersebut dapat mengurangi sebagian besar padatan tersuspensi, efektivitasnya dalam menghilangkan senyawa organik kompleks, logam berat, dan zat warna sintetis masih terbatas. Selain itu, proses tersebut sering kali menghasilkan lumpur dalam jumlah besar, membutuhkan lahan yang luas, dan memerlukan biaya operasional yang tinggi [3,9].

Dalam penelitian ini, arang aktif dan bentonit dipilih sebagai bahan adsorben karena keduanya memiliki luas permukaan yang besar, porositas tinggi, dan kemampuan pertukaran ion yang baik. Aktivasi arang aktif menggunakan asam fosfat (H_3PO_4) diketahui dapat memperluas ukuran pori serta meningkatkan daya serap terhadap zat pencemar [10,11]. Sementara itu, aktivasi bentonit dengan asam klorida (HCl) dapat memperbesar luas permukaan, meningkatkan jumlah situs aktif, serta menghilangkan kation pengotor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Fe^{3+} [12,13].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas kombinasi arang aktif dan bentonit baik sebelum maupun setelah aktivasi dalam menurunkan kadar BOD, COD, dan TSS pada limbah cair industri tahu.

2. METODE

Bahan

Limbah cair diperoleh dari PT Sari Tahu, Desa Bangun Sari, Kecamatan Tanjung Morawa, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Cangkang telur bebek arang aktif, Bentonit (Bratachem), HCl (Sigma-Aldrich), dan H_3PO_4 (Sigma-Aldrich).

Alat

Furnace (Memmert), labu Erlenmeyer (Pyrex), magnetic stirrer (Heidolph), gelas ukur (Pyrex), gelas beaker (Pyrex), aluminium foil (Alufix), timbangan analitik (Ohaus), ayakan 100 mesh (Endecotts), kertas saring Whatman (Merck), botol Winkler (Pyrex), inkubator (Memmert), FT-IR (PerkinElmer), SEM (Hitachi), penganalisis BOD (Hanna Instruments), penganalisis COD (Merck), dan penganalisis TSS (Hanna Instruments).

Prosedur

2.1 Aktivasi Arang Aktif dengan H₃PO₄

Sebanyak 300 gram arang dimasukkan ke dalam beaker 1000 mL, kemudian ditambahkan larutan asam fosfat (H₃PO₄) dengan konsentrasi 1 M, 2 M, dan 3 M. Campuran diaduk sekitar 30 menit, lalu didiamkan selama 24 jam. Setelah proses perendaman, arang dicuci menggunakan air suling hingga mencapai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C selama 2 jam.

2.2 Aktivasi bentonit dengan HCl

Sebanyak 100 gram bentonit dimasukkan ke dalam beaker 1 L dan dicampur dengan larutan HCl 1 M. Campuran diaduk selama 2 jam pada suhu 80 °C, lalu dibiarkan hingga dingin. Setelah itu, padatan disaring, dicuci dengan air deionisasi sampai pH netral, kemudian dikeringkan pada suhu 105 °C hingga berat stabil. Bentonit kering digiling, diayak, dan disimpan dalam wadah tertutup sebagai adsorben.

2.3 Penentuan Kadar BOD pada Limbah Cair Tahu

Ambil sampel limbah cair tahu, homogenkan, dan jika perlu lakukan pengenceran sesuai kebutuhan. Masukkan sampel ke dalam botol BOD hingga penuh tanpa gelembung udara. Ukur kadar oksigen terlarut awal (DO₀) menggunakan DO meter atau metode Winkler. Inkubasi botol sampel selama 5 hari pada suhu 20°C dalam gelap. Setelah inkubasi, ukur kadar oksigen terlarut akhir (DO₅)[14]

$$BOD_5 = (DO_0 - DO_5) \times \text{Faktor Pengenceran}$$

2.4 Penentuan Kadar COD pada Limbah Cair Tahu

Ambil 10 mL sampel limbah cair tahu ke dalam labu refluks. Tambahkan 5 mL larutan K₂Cr₂O₇ 0,25 N. Tambahkan perlahan 15 mL campuran H₂SO₄-Ag₂SO₄ sambil didinginkan. Sambungkan labu dengan kondensor dan panaskan dengan refluks selama 2 jam. Setelah dingin, bilas dinding kondensor dengan air suling. Titrasi sisa K₂Cr₂O₇ dengan larutan FAS 0,1 N menggunakan indikator ferroin hingga warna berubah dari biru-hijau menjadi merah bata. Lakukan blanko dengan prosedur yang sama tanpa sampel[14]. Hitung kadar COD dengan rumus:

$$COD \text{ (mg/L)} = \frac{(V_b - V_s) \times N \times 8000}{V_{\text{sampel}}}$$

2.5 Penentuan Kadar TSS pada Limbah Cair Tahu

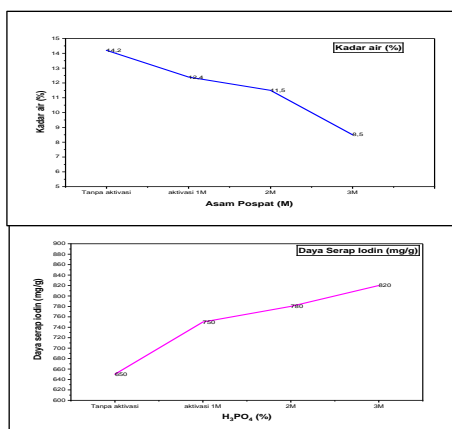
Keringkan kertas saring dalam oven pada suhu 103–105°C selama 1 jam, lalu dinginkan dalam desikator dan timbang (berat awal = W₁). Saring sejumlah volume sampel (misalnya 50–100 mL) melalui kertas saring yang telah ditimbang. Keringkan kertas saring berisi residu dalam oven pada suhu 103–105°C selama ±1 jam. Dinginkan dalam desikator dan timbang kembali (berat akhir = W₂)[14]. Hitung kadar TSS dengan rumus:

$$TSS \text{ (mg/L)} = \frac{(W_2 - W_1) \times 1000}{V_{\text{sampel}}}$$

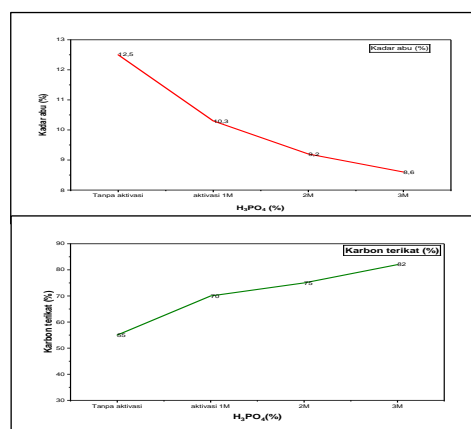
3. HASIL

3.1 Karakterisasi Arang Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi Berdasarkan SNI 06-3730-1995

Pengujian kadar air, abu, daya serap iodin, dan karbon terikat pada arang aktif, baik sebelum maupun sesudah aktivasi, dilakukan mengacu pada SNI 06-3730-1995. Hasilnya terlihat pada Gambar 1a–b dan 2a–b.



Gambar 2a. Daya serap iodin

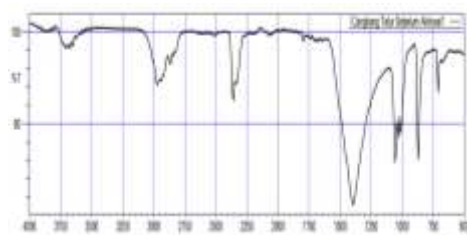


Gambar 2b. Karbon terikat

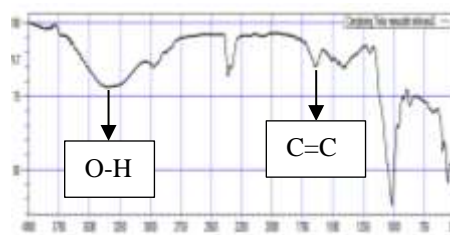
Gambar 1a-1b dan 2a-2b, setelah diaktivasi, arang aktif memiliki kadar air 8,5%, abu 8,6%, daya serap iodin 820 mg/g, dan karbon 87%.

3.2 Karakterisasi Arang Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi dengan FT-IR

FTIR arang sebelum dan sesudah aktivasi menunjukkan perubahan intensitas dan munculnya gugus baru pada Gambar 5a–5b.



Gambar 3a. Spektrum FTIR arang sebelum aktivasi



Gambar 3b. Spektrum FTIR arang setelah aktivasi

Pada Gambar 3b, spektrum FTIR arang setelah aktivasi dengan H₃PO₄ menunjukkan peningkatan intensitas pita –OH pada sekitar 3400 cm⁻¹ dan munculnya pita C=C pada rentang 1600–1650 cm⁻¹. Selain itu, terlihat pula pita baru P–O pada 1200–1250 cm⁻¹, yang menandakan adanya pembentukan gugus fosfat pada permukaan arang setelah aktivasi.”

3.3 Karakterisasi Arang Aktif Sebelum dan Sesudah Aktivasi dengan Scanning Electron Microscopy (SEM)

Untuk melihat bentuk dan permukaan material dengan perbesaran tinggi digunakan SEM. Melalui SEM dapat diamati struktur pori dan permukaan arang baik sebelum dan sesudah aktivasi dapat dilihat pada Gambar 4a-b.



Gambar 4a. SEM arang tanpa aktivasi

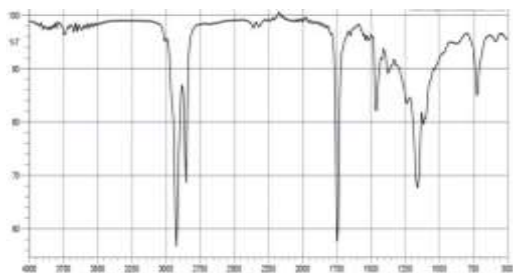


Gambar 4b. SEM arang setelah aktivasi

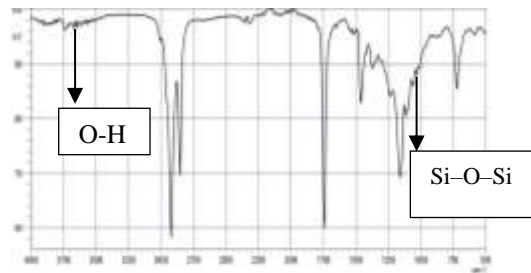
Gambar 4a menunjukkan arang belum diaktivasi dengan pori tertutup, sementara Gambar 4b menampilkan arang teraktivasi dengan pori terbuka.

3.4 Karakterisasi Bentonit Sebelum dan Sesudah Aktivasi Menggunakan FT-IR

Spektrum FTIR menunjukkan adanya perubahan gugus fungsi pada bentonit setelah aktivasi dengan HCl, ditunjukkan pada Gambar 5a dan 5b



Gambar 5a. Spektrum FT-IR bentonit sebelum aktivasi



Gambar 5b. Spektrum FT-IR bentonit sesudah aktivasi

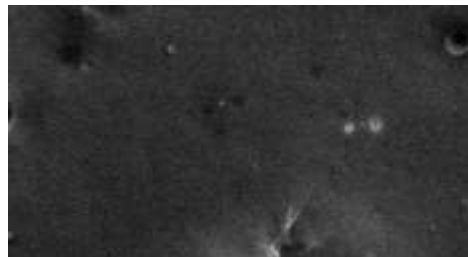
Gambar 5a dan 5b menunjukkan spektrum FTIR bentonit sebelum dan sesudah aktivasi menggunakan HCl. Setelah aktivasi, terlihat adanya penurunan intensitas pita –OH pada sekitar 3620 cm^{-1} dan peningkatan pita Si–O–Si di sekitar 1040 cm^{-1} (ditandai pada gambar). Hal ini menunjukkan terjadinya penghilangan pengotor logam dan peningkatan keteraturan kerangka silika, yang mengindikasikan keberhasilan proses aktivasi serta potensi peningkatan kemampuan adsorpsi bentonit.

3.5 Karakterisasi Bentonit Sebelum dan Sesudah Aktivasi Menggunakan SEM

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah alat yang digunakan untuk melihat bentuk dan permukaan material dengan perbesaran tinggi. SEM menampilkan struktur, ukuran, dan pori-pori permukaan sehingga dapat menunjukkan perubahan morfologi material sebelum dan sesudah perlakuan, dapat dilihat pada Gambar 6a dan 6b



Gambar 6a. SEM bentonit sebelum aktivasi



Gambar 6b. SEM bentonit sesudah aktivasi

Spektrum FTIR arang sebelum dan setelah aktivasi menunjukkan perubahan intensitas dan munculnya gugus baru ditunjukkan pada Gambar 5a dan 5b.

3.6 BOD, COD, dan TSS pada Limbah Cair Industri Tahu

Kombinasi arang aktif dan bentonit dapat menurunkan nilai BOD, COD, dan TSS pada limbah cair tahu sebelum dan sesudah aktivasi, seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan nilai BOD, COD, dan TSS limbah cair tahu sebelum dan sesudah aktivasi.

Parameter uji	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TSS (mg/L)
Tanpa perlakuan	3.600	1.500	320
Kombinasi karbon aktif + bentonit (sebelum ativasi)	2.400	900	105
Kombinasi karbon aktif + bentonit (sesudah aktivasi)	140	185	270
Baku mutu (<i>Permen LHK No. P.16/2019</i>)	150	200	300

Nilai BOD, COD, dan TSS mengalami penurunan signifikan setelah perlakuan. BOD turun dari 3.600 mg/L menjadi 140 mg/L , COD dari 1.500 mg/L menjadi 185 mg/L , dan TSS dari 320 mg/L menjadi 270 mg/L . Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi arang aktif dan bentonit setelah aktivasi mampu menurunkan kadar pencemar hingga memenuhi baku mutu Permen LHK No. P.16 Tahun 2019.

4. PEMBAHASAN

4.1 Aktivasi Arang dengan H_3PO_4 berdasarkan SNI 06-3730-1995, FTIR dan SEM

Aktivasi dengan H_3PO_4 meningkatkan kualitas arang. Pada konsentrasi 3M, arang mengandung air 8,5%, abu 8,6%, daya serap iodin 820 mg/g , dan karbon terikat 87%. Berkurangnya air dan abu menunjukkan arang menjadi lebih bersih dan murni. Penurunan kadar air dan abu menunjukkan penghilangan bahan organik dan mineral pengotor, sehingga kemurnian arang meningkat[15]. Peningkatan daya serap iodin menandakan luas permukaan

dan porositas yang lebih besar, yang berpengaruh terhadap kapasitas adsorpsi senyawa organik pada limbah cair, sesuai temuan[16,17] yang menunjukkan bahwa aktivasi asam fosfat meningkatkan luas permukaan arang. Kadar karbon terikat yang tinggi menandakan terbentuknya gugus aktif pada permukaan arang, memperkuat interaksi dengan polutan. Analisis FTIR menunjukkan peningkatan pita –OH dan C=C serta munculnya gugus P–O ($1200\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$), mendukung mekanisme adsorpsi melalui sifat hidrofilik dan pertukaran ion[18,19] Aktivasi H_3PO_4 3 M mempertahankan gugus fungsi aktif sekaligus meningkatkan kualitas arang, seperti yang dikemukakan oleh[20]. Analisis SEM menunjukkan perubahan morfologi: sebelum aktivasi, permukaan padat dan pori tertutup, setelah aktivasi, permukaan berpori terbuka, meningkatkan luas permukaan efektif, sejalan dengan hasil penelitian [18]. Peningkatan porositas membantu arang aktif menyerap molekul organik penyebab tingginya BOD dan COD pada limbah tahu, sehingga menurunkan parameter tersebut.

4.2 Aktivasi bentonit dengan HCl berdasarkan FTIR dan SEM

Spektrum FTIR menunjukkan perubahan signifikan pada bentonit setelah aktivasi dengan HCl, terutama pada pita Si–O–Si pada sekitar 1040 cm^{-1} yang menjadi lebih kuat, dan intensitas pita –OH yang menurun. Hal ini menunjukkan penghilangan kation pengotor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Fe^{3+} , serta peningkatan keteraturan struktur silika[21,22]. Perubahan ini meningkatkan kapasitas tukar kation dan jumlah situs aktif bentonit, yang penting untuk adsorpsi senyawa organik maupun anorganik dalam limbah cair. Temuan ini mendukung penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa aktivasi bentonit dengan HCl meningkatkan kemampuan adsorpsi terhadap polutan[23]. Hasil SEM bentonit menunjukkan perubahan morfologi setelah aktivasi dengan HCl. Bentonit sebelum aktivasi memiliki permukaan yang padat dan relatif homogen (Gambar 6a), sedangkan bentonit setelah aktivasi menunjukkan permukaan lebih berpori dan terbuka (Gambar 6b). Struktur berpori ini meningkatkan luas permukaan efektif dan memungkinkan interaksi yang lebih besar antara bentonit dan polutan dalam limbah[24,25]. Morfologi ini mendukung peran bentonit dalam mengadsorpsi partikel tersuspensi dan senyawa organik berukuran besar, sehingga membantu menurunkan parameter BOD, COD, dan TSS.

4.3 Penentuan Kadar BOD, COD, dan TSS Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Arang Aktif dan Bentonit

Tabel 1 menunjukkan penurunan signifikan kadar BOD, COD, dan TSS setelah perlakuan kombinasi arang aktif dan bentonit, terutama setelah aktivasi. BOD turun dari 3.600 mg/L menjadi 140 mg/L, COD dari 1.500 mg/L menjadi 185 mg/L, dan TSS dari 320 mg/L menjadi 270 mg/L, yang memenuhi baku mutu limbah cair Permen LHK No. P.16 Tahun 2019. Penurunan ini menunjukkan bahwa kombinasi adsorben teraktivasi bekerja secara sinergis. Arang aktif berperan dominan menurunkan senyawa organik kompleks penyumbang BOD dan COD, sedangkan bentonit membantu menurunkan TSS melalui mekanisme flokulasi dan pertukaran ion[19,26]. Penurunan parameter BOD dan COD ini konsisten dengan laporan[27], sementara penurunan TSS sejalan dengan hasil penelitian[28] yang menunjukkan efektivitas bentonit pada limbah tahu. Perbedaan efektivitas antara sebelum dan sesudah aktivasi menegaskan pentingnya proses aktivasi kimia dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi kedua bahan. Aktivasi secara signifikan meningkatkan interaksi permukaan adsorben dengan kontaminan melalui peningkatan luas permukaan, porositas, dan gugus fungsi aktif[16].

5. KESIMPULAN

Campuran arang aktif dan bentonit efektif mengurangi BOD, COD, dan TSS pada limbah tahu, terutama setelah aktivasi. Aktivasi arang dengan H_3PO_4 memperbesar pori, luas permukaan, dan gugus fungsi, sedangkan aktivasi bentonit dengan HCl memperbaiki struktur silika dan kapasitas tukar kation. Penggunaan keduanya menurunkan BOD dari 3.600 menjadi 140 mg/L, COD dari 1.500 menjadi 185 mg/L, dan TSS dari 320 menjadi 270 mg/L, sesuai standar Permen LHK No. P.16 Tahun 2019. Metode ini sederhana, hemat biaya, dan ramah lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas terselesaikannya penelitian ini. Terima kasih kami sampaikan kepada Institut Kesehatan Medistra Lubuk Pakam dan pihak industri tahu atas dukungan fasilitas, dana, dan sampel, semoga penelitian ini bermanfaat bagi pengelolaan limbah dan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Beyan SM, Prabhu SV, Sissay TT, Getahun AA. Sugarcane bagasse based activated carbon preparation and its adsorption efficacy on removal of BOD and COD from textile effluents: RSM based modeling, optimization and kinetic aspects. *Bioresour Technol Reports* 2021;14:100664. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100664>.
- [2] Widyastuti D, Suprayitno D. Decreasing COD and TSS levels of tofu liquid waste using *Kangkungan* (*Ipomeacracicaulis*) with phytoremediation method. *IOSR J Env Sci Toxicol Food Technol* 2020;14:1–5. <https://doi.org/10.9790/2402-1411020105>.
- [3] Marques DG, Domingos J de MF, Nolasco MA, Campos V. Textile effluent treatment using coagulation-flocculation and a hydrodynamic cavitation reactor associated with ozonation. *Chem Eng Sci* 2024;121094.
- [4] Yulianto R, Prihanto RL, Redjeki S. Penurunan Kandungan COD dan BOD Limbah Cair Industri Tahu dengan Metode Ozonasi. *ChemPro* 2020;1:9–15.
- [5] Pradana TD, Suharno S, Apriansyah A. Pengolahan limbah cair tahu untuk menurunkan kadar TSS dan BOD. *J Vokasi Kesehat* 2018;4:56–62.
- [6] Hemamathi A, Sukumar B, Aishwarya R, Kruthikameenakshy A, Nivetha V, Pradhiksha J, et al. Treatment of textile waste water using activated carbon method. *Mater Today Proc* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.027>.
- [7] Maulani M, Satiyawira B, Nugrahanti A, Apriniyadi M, Nurfajrin ZD, Young H, et al. Pemanfaatan pengolahan limbah industri tahu menggunakan bentonite. *Community Empower* 2021;6:1892–8.
- [8] Raj S, Singh H, Bhattacharya J. Treatment of textile industry wastewater based on coagulation-flocculation aided sedimentation followed by adsorption: Process studies in an industrial ecology concept. *Sci Total Environ* 2023;857:159464. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159464>.
- [9] Fleyfel LM, Matta J, Sayegh NF, El Najjar NH. Olive mill wastewater treatment using coagulation/flocculation and filtration processes. *Heliyon* 2024;10.
- [10] Bennemla M, Semaoune T, Sari MC, Houhoune F, Khemaissia S, Bellaloui M, et al. Preparation and characterization of activated carbon from medlar seed by chemical activation with phosphoric acid and its application in uranium adsorption. *Biomass Convers Biorefinery* 2024;1–14.
- [11] Daniel LS, Rahman A, Hamushembe MN, Kapolo P, Uahengo V, Jonnalagadda SB. The production of activated carbon from *Acacia erioloba* seedpods via phosphoric acid activation method for the removal of methylene blue from water. *Bioresour Technol Reports* 2023;23:101568.
- [12] Maulani M, Satiyawira B, Nugrahanti A, Apriniyadi M, Nurfajrin ZD, Young H, et al. Utilization of tofu industrial waste treatment using bentonite. *Community Empower* 2021;6:1892–8.
- [13] Hasyim UH, Fitriyano G. Pengaruh Konsentrasi HCl dan Massa Adsorbent dalam Pengolahan Limbah Pelumas Bekas dengan Kajian Keseimbangan Adsorpsi Bentonit terhadap Logam Fe. *J Integr Proses* 2017;6:191–6.
- [14] Gaspar E, Irimia O, Stanciu M, Barsan N, Mosnegutu E. Strategies for a Sustainable Economy: Optimizing Processes for BOD, COD and TSS Removal from Wastewater. *Water* 2025;17:318.
- [15] Aritonang B, Ambarwati NF, Sinaga EM, Ritonga AH. Synthesis and Characterization of Activated Charcoal from Salak Skin As an Adsorbent Against BOD, COD, and TSS Levels in Textile Industry Liquid Waste Sintesis dan Karakterisasi Arang Aktif Dari Kulit Salak Sebagai Adsorben Terhadap Kadar BOD, COD dan. *Vol* 2022;2:2611–26.
- [16] Chairunnisa ZN. Efektivitas Adsorben Karbon Aktif dari Tempurung Kelapa untuk Pengolahan Limbah Cair Pabrik Tahu 2023.
- [17] Fanani N, Ulfindrayani IF. Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif dari Limbah bambu Menggunakan Aktivator Asam Pospat (H₃PO₄). *Pros. Semin. Nas. Sains dan Teknol. Terap.*, vol. 1, 2019, p. 741–6.
- [18] WAHYUDI ACHA. Karakterisasi Komposit TiO₂ Karbon Aktif Tandan Pisang Menggunakan FTIR Dan SEM-EDX 2021.
- [19] Aritonang B, Ritonga AH, Harefa K. Reduction of BOD, COD, and TSS in Textile Wastewater Using Bentonite Activated Charcoal Adsorbent. *J Farm* 2025;7:381–9.
- [20] Diharyo S, Damanik Z, Gumiri S. Pengaruh lama aktifasi dengan H₃PO₄ dan ukuran butir arang cangkang kelapa sawit terhadap ukuran pori dan luas permukaan butir arang aktif. *Pros. Semin. Nas. Lingkung. Lahan Basah*, vol. 5, 2020, p. 48–54.
- [21] Aritonang B, Ritonga AH, Harefa K, Wiratma DY. Purification of used Cooking Oil using a Combination of Activated Carbon and Bentonite Adsorbents. *J Farm* 2024;7:31–40. <https://doi.org/10.35451/jfm.v7i1.2331>.
- [22] Bukit BF, Sirait SH. KARAKTERISASI NANOKOMPOSIT BENTONIT DAN KITOSAN SERTA TITANIUM DIOKSIDA MENGGUNAKAN FTIR. *JUITECH J Ilm Fak Tek Univ Qual* 2020;4:49–53.

- [23] Haskim MH. PENGARUH KONSENTRASI ASAM KLORIDA (HCl) TERHADAP AKTIVASI BENTONIT ALAM DAN STUDI KINETIKA PADA ADSORPSI ION KADMIUM (Cd²⁺) UNTUK APLIKASI PENGOLAHAN LIMBAH INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI 2023.
- [24] Rasyida A, Pradipta TR, Wicaksono ST. Studi Pengaruh Penambahan PVA dan Bentonit Terhadap Morfologi dan Sifat Fisik Komposit Berbasis Hidrogel Alginat Sebagai Kandidat Material Perancah untuk Regenerasi Tulang Rawan. *J Tek ITS* 2019;7:F320–5.
- [25] Bukit FRA, Frida E, Bukit N, Bukit BF. KARAKTERISASI DAN ANALISIS BENTONIT ALAM SEBAGAI BAHAN PENGISI KOMPOSIT. *JUITECH J Ilm Fak Tek Univ Qual* 2021;5:54–62.
- [26] Pratiwi AT, Widiatmono BR, Wirosodarmo R. Adsorpsi minyak dan timbal (Pb) pada air limbah bengkel mobil menggunakan bentonit dan cangkang telur ayam (*Gallus domesticus*) sebagai adsorben. *J Ilmu Lingkungan* 2024;22:125–31.
- [27] Al Adawiyah SU, Nur A. PENGARUH PENGGUNAAN KARBON AKTIF CANGKANG KELAPA SAWIT UNTUK MENURUNKAN BOD, CPD, DAN TSS LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT. *Pros. Semin. Nas. Teknol. Ind.*, vol. 8, 2021, p. 436–41.
- [28] Ruskandi C, Siswanto A, Widodo R. Karakterisasi fisik dan kimiawi bentonite untuk membedakan natural sodium bentonite dengan sodium bentonite hasil aktivasi. *J Polimesin* 2020;18:53–60.