

Karakterisasi Arang Aktif Tempurung Lontar Teraktivasi KOH dan Uji Kinerjanya pada Adsorpsi Limbah Cair Tahu

Madalena Da Costa^{1*}, Maria Imaculata Seko¹, Oktavina G.LP Manulangga², dan Martinho Dos Santos Martins²

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik dan Perencanaan, Universitas San Pedro, Kupang, Indonesia ; e-mail: madalenadacosta042@gmail.com

²Program Studi Kimia, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Katolik Widya Mandira Kupang, Indonesia

ABSTRAK

Limbah cair industri tahu memiliki beban polutan organik tinggi sehingga dapat meningkatkan parameter BOD, COD dan TSS apabila dibuang ke lingkungan tanpa pengolahan berpotensi mencemari, sehingga diperlukan pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang efisien dan berkelanjutan, seperti metode adsorpsi menggunakan arang aktif berbahan baku lokal, yaitu tempurung lontar teraktivasi kalium hidroksida (KOH). Penelitian ini terdiri 3 tahap yang meliputi persiapan dan pembuatan arang aktif dari tempurung lontar, karakterisasi sifat fisik arang, analisis SEM-EDX dan FTIR, serta tahap uji kinerja arang aktif melalui adsorpsi batch menggunakan variasi pH. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas media arang aktif lontar secara fisik mengandung kadar air 3,37%; kadar abu 2,59%; dan kadar zat terbang 42,68%. Arang aktif lontar tersebut memiliki morfologi permukaan berpori serta komponen carbon dan oksigen. Gugus aktif yang ada pada permukaan adalah OH, C-H, C=C, C=O. Kinerja adsorpsi arang secara batch pada variasi pH, penurunan parameter secara konsisten pada rentang kondisi asam. Efisiensi adsorpsi arang aktif tempurung lontar terhadap polutan limbah cair tahu menunjukkan tren penurunan konsisten seiring peningkatan pH dari asam ke basa. Pada pH 4 (optimal), persentase penurunan tertinggi dicapai oleh parameter TSS sebesar 84,17% diikuti oleh COD 58,87 % dan BOD 55,18%. Kinerja pengolahan menurun pada pH 9, di mana TSS hanya turun menjadi 36,37%, COD menjadi 33,69%, dan BOD menjadi 44,37%. Karakterisasi arang aktif tempurung lontar secara fisik, morfologi dan komponen kimia serta gugus aktif menunjukkan kemampuan arang aktif tempurung lontar untuk adsorpsi limbah cair. Variasi pH limbah cair 4,7 dan 9 berpengaruh terhadap pengolahan limbah cair tahu.

Kata kunci: Karakterisasi, Arang Aktif, Tempurung lontar, Adsorpsi, Limbah Cair Tahu

ABSTRACT

Industrial tofu wastewater has a high organic pollutant load, which can increase BOD, COD, and TSS parameters if discharged into the environment without treatment. Therefore, it is necessary to develop efficient and sustainable wastewater treatment technologies, such as adsorption methods using locally sourced activated carbon, namely KOH activated palm shells. This research consisted of three stages, including the preparation and production of activated charcoal from palm shells, characterization of the physical properties of charcoal, SEM-EDX and FTIR analysis, and the stage of testing the performance of activated charcoal through batch adsorption using pH variations. The results of the study showed that the physical quality of the medium contained 3.37% moisture content of 2.59%, and a volatile matter content of 42.68%. It has a porous surface morphology and components of carbon and oxygen. The active groups present on the surface are OH, C-H, C=C, C=O. The batch adsorption performance of the charcoal at varying pH levels showed a consistent decrease in parameters under acidic conditions. The adsorption efficiency of activated palm shell charcoal toward tofu wastewater pollutants shows a consistent decreasing trend as pH increases from acidic to basic conditions. At pH 4 (optimal), the highest percentage reduction was achieved TSS at 84.17%, followed by COD at 58.87% and BOD at 55.18%. Adsorption performance decreased at pH 9, where TSS only decreased to 36.37%, COD to 33.69%, and BOD to 44.37%. The physical, morphological, and chemical composition characterization of palm shell activated carbon, along with its active groups, demonstrates the ability of palm shell activated carbon for the adsorption of liquid waste. Variations in liquid waste pH of 4.7 and 9 affect the treatment of tofu wastewater.

Keywords: Characterization, Activated Charcoal, Palm Shell, Adsorption, Tofu Wastewater

Citation: Costa, M. D., Seko, M. I., Manulangga, O. G. LP., dan Martins, M. D. S, (2026). Karakterisasi Arang Aktif Tempurung Lontar Teraktivasi KOH dan Uji Kinerjanya pada Adsorpsi Limbah Cair Tahu. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(4), 971-978, doi:10.14710/jil.24.4.971-978

1. PENDAHULUAN

Penurunan kualitas perairan akibat pembuangan limbah efluen industri yang tidak terolah telah menjadi tantangan lingkungan global yang memerlukan pengembangan teknologi pengolahan air limbah yang efisien dan berkelanjutan (Nieto dkk, 2021). Salah satu sumber pencemar potensial adalah pabrik tahu, yang termasuk industri skala kecil dan menengah (Wang dkk, 2019). Industri ini menghasilkan limbah cair dengan beban polutan organik tinggi seperti protein, lemak, dan karbohidrat yang secara langsung meningkatkan konsentrasi parameter seperti COD (Chemical Oxygen Demand), BOD (Biochemical Oxygen Demand), dan partikel padat seperti ampas tahu yang berkontribusi pada TSS (Total Suspended Solid) (Chua dkk, 2019). Menurut penelitian Da Costa dan Leko (2025) diketahui konsentrasi parameter kimia dalam limbah cair tahu di salah satu industri X di Kota Kupang cukup tinggi, seperti BOD mencapai 1016,09 mg/l, COD 2789,57 mg/l, dan TSS 282 mg/l. Konsentrasi tinggi ini menunjukkan bahwa pembuangan air limbah tahu tanpa pengolahan berpotensi mencemari lingkungan, terutama dapat merusak ekosistem akuatik dan menimbulkan risiko kesehatan (Syaripuddin dkk, 2019).

Mengatasi permasalahan ini, berbagai skema pengolahan air limbah dapat diterapkan, termasuk metode biologis, kimia, dan fisik. Di antara metode fisik, adsorpsi diakui memiliki keunggulan operasional yang substansial, terutama karena efisiensi yang tinggi dalam menurunkan polutan organik maupun anorganik (Nayl dkk., 2017). Mekanisme utama adsorpsi adalah perpindahan massa polutan ke permukaan padatan (adsorben), yang didorong oleh adanya interaksi atau reaksi kimia antara polutan dan gugus aktif pada permukaan media. Keberhasilan metode adsorpsi secara fundamental bergantung pada karakteristik media adsorben yang digunakan (Pacini dkk, 2005), di mana kemampuan adsorpsi suatu media sangat dipengaruhi oleh struktur pori yang berkembang dan luas permukaan spesifik yang tinggi (Rofikoh dkk, 2024).

Meskipun arang aktif komersial merupakan adsorben yang umum diaplikasikan dalam pengolahan limbah industri, biayanya cenderung mahal. Sejalan dengan implementasi prinsip ekonomi sirkular, kini terdapat pergeseran fokus penelitian ke arah pemanfaatan biomassa lignoselulosa sebagai bahan baku untuk sintesis arang aktif berbiaya rendah dan berkelanjutan. Salah satu sumber daya lokal yang potensial dari NTT adalah tempurung lontar (*Borassus flabellifer*) (Nitsae dkk, 2021). Potensi ini didukung oleh penelitian Lano dkk. (2020) yang menunjukkan bahwa arang aktif tempurung lontar teraktivasi basa memiliki kemampuan tinggi untuk mengadsorpsi metilen biru, menjadikannya potensial sebagai bahan baku untuk pengolahan limbah cair tahu (Nitsae dkk, 2020).

Dalam upaya mengoptimalkan kapasitas adsorpsi dari tempurung lontar, biochar yang dihasilkan melalui proses karbonisasi (pirolisis) selanjutnya dimodifikasi permukaannya melalui proses aktivasi menggunakan aktivator KOH (Nitsae dkk, 2020). Proses ini dipilih mengingat KOH telah terbukti efektif menghilangkan polutan dalam limbah cair. Meskipun kemampuan adsorpsi arang aktif tempurung lontar telah teridentifikasi, masih terdapat kesenjangan ilmiah terutama terkait studi komprehensif yang mengintegrasikan karakterisasi material tingkat lanjut (seperti morfologi, gugus fungsi, dan sifat tekstural dari arang aktif tempurung lontar teraktivasi KOH) serta aplikasi langsungnya pada pengolahan limbah cair tahu yang kompleks dengan parameter BOD, COD, dan TSS yang tinggi (Da Costa dan Leko, 2025).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk melakukan karakterisasi fisikokimia terhadap material adsorben yang digunakan, serta mengevaluasi pengaruh pH terhadap efektivitas penyisihan BOD, COD, dan TSS dalam limbah cair tahu. Hasil studi ini diharapkan dapat menyediakan basis data empiris mengenai korelasi antara sifat fisik dan kimia arang aktif dengan efisiensi penurunan polutan, sebagai upaya pengolahan air limbah yang efisien, berkelanjutan berbasis kearifan lokal.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium dan dilaksanakan di Laboratorium Dasar Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik dan Perencanaan Universitas San Pedro sejak Oktober 2024. Penelitian dilakukan dalam 3 (tiga) tahapan yaitu tahap pembuatan media yang meliputi karbonisasi dan aktivasi KOH, tahap karakterisasi, tahap uji kinerja adsorpsi limbah cair tahu dengan melakukan variasi pH, serta tahap analisis data hasil laboratorium. Analisis morfologi permukaan dengan SEM-EDX dan gugus fungsi dengan FTIR dalam karbon aktif dilakukan di LPPT Universitas Gadjah Mada.

2.1. Pembuatan Arang Aktif

Pembuatan arang aktif terdiri dari tahap persiapan, dehidrasi, karbonisasi dan aktivasi arang. Tahap persiapan meliputi pengumpulan tempurung lontar, kemudian dibersihkan dengan air. Tahap dehidrasi meliputi penjemuran di bawah sinar matahari selama 4 hari. Tahap karbonisasi dilakukan dengan metode kiln drum selama 3 jam pada suhu 400°C. Arang yang terbentuk dikeluarkan dari kiln drum kemudian didinginkan. Arang digerus dengan ayakan berukuran 12 mesh. Tahap aktivasi dilakukan dengan cara granul arang hasil ayakan 12 mesh direndam dalam larutan KOH 0,1 M dengan perbandingan massa arang dan volume larutan KOH sebesar 1:2 (g:ml) selama 24 jam. Arang yang sudah diaktivasi disaring lalu dicuci dengan aquadest

hingga pH netral kemudian dikeringkan dengan oven pada suhu 105°C selama 24 jam.

2.2. Karakterisasi Kandungan Arang Aktif

Karakteristik fisik dan kimia arang aktif tempurung lontar hasil aktivasi KOH dilakukan dengan uji kualitas fisik meliputi kadar air, kadar abu, dan kadar zat terbang. Prosedur analisis karakteristik fisik dilakukan berdasarkan SNI 06-3730-1995. Analisis Struktur dan morfologi arang aktif menggunakan SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray*) Hitachi Model S-3200 N dilakukan di Laboratorium LPPT UGM. Analisis kandungan gugus fungsi dengan FTIR dilakukan di LPPT Universitas Gadjah Mada.

2.3. Uji Kinerja Arang Sistem Batch

Proses adsorpsi secara batch limbah cair tahu dengan tempurung lontar teraktivasi KOH dalam penelitian ini dilakukan dengan variasi pH. Pada variasi pH, disiapkan 3 gelas beaker dan diberi label perlakuan. arang aktif ditimbang 5 g dan dimasukkan ke-3 gelas beker. 0,5 L air limbah yang telah diatur pH menjadi 4, 7 dan 9 ditambahkan ke gelas beker. Larutan diaduk menggunakan jar test kecepatan 100 rpm dalam waktu kontak 60 menit, kemudian larutan disaring menggunakan kertas saring dan dianalisis konsentrasi BOD, COD dan TSS. Analisa laboratorium untuk BOD dengan prinsip inkubasi sampel selama 5 hari (SNI-6989.72:2009), COD dengan metode refluks tertutup titrimetri (SNI 6989.73:2019), dan TSS dengan metode gravimetri (SNI-6989.3:2019).

2.4. Analisis Data

Pada penelitian ini, analisis data yang digunakan adalah analisis deskriptif, yang meliputi efisiensi penurunan efisiensi penurunan yang dapat dihitung menggunakan persamaan (1)

$$\% \text{Penyisihan} = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \dots \dots \dots (1)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pembuatan Arang Aktif

Pembuatan arang aktif tempurung lontar dalam penelitian ini terdiri dari proses dehidrasi, karbonisasi dan aktivasi. Proses dehidrasi meliputi penjemuran di bawah sinar matahari terik selama 4 hari untuk menghilangkan kadar air. Proses karbonisasi menggunakan drum kiln pada suhu 400-500 C selama 3 jam. Kiln drum merupakan metode pirolisis sederhana untuk proses pengarangan, selama proses ini suhu pembakaran harus dikontrol sehingga penguraian selulosa dapat berjalan efektif. Dalam proses ini, suhu sangat berperan penting untuk memperoleh kualitas arang yang baik. Adapun mekanisme penguraian selulosa terbagi dalam tahapan suhu, dimulai dengan pemutusan ikatan hidrogen dan penguapan air pada 25-150°C, dilanjutkan dengan dehidrasi gugus hidroksil pada

150-240°C yang memutuskan ikatan glikosidik, menghasilkan oligosakarida, asam, keton, dan gas (CO₂) (Shellyanti dkk, 2023). Selama proses pembakaran ini dihasilkan asap cair. Asap cair ini adalah hasil kondensasi uap pembakaran bahan-bahan yang mengandung lignin, selulosa, hemiselulosa. Pada tahap dihilangkan pula senyawa non-karbon seperti H₂O, CO, CO₂ sehingga ukuran pori permukaan semakin besar. Selanjutnya ketika suhu dinaikan 400-500°C, akan terbentuk senyawa dengan 4 atom karbon yang merupakan pembentuk struktur graphite penyusun arang dan adanya pelepasan gas H₂. Proses karbonisasi dengan kiln drum dihentikan ketika asap putih yang keluar dari kiln drum telah berhenti (Goa dkk, 2012).

Hasil arang yang diperoleh dalam penelitian ini yaitu memiliki sedikit abu (Costa dan Leko, 2025). Selanjutnya arang hasil karbonisasi digerus dan diayak dengan ayakan 12 mesh untuk memperoleh granul arang. Tujuan penggerusan untuk memperoleh arang yang seragam dan spesifik untuk adsorpsi. Proses aktivasi dilakukan dengan merendam 500 g arang dalam 1000 ml larutan KOH 0,1 M selama 24 jam. Selama proses perendaman campuran tampak kehitaman. Hal ini menunjukkan bahwa KOH yang bersifat basa kuat dan korosif menyebabkan banyak abu yang terlepas atau tercuci dari arang (Nitsae dkk, 2020). Sebelum digunakan sebagai adsorben, arang tersebut dicuci dengan aquadest hingga netral lalu dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C hingga siap untuk digunakan dalam proses karakterisasi untuk menentukan kualitas fisik kimianya (Sutyasmi kk, 2013).

3.2. Uji Kualitas Arang Aktif

Kualitas arang aktif sangat ditentukan oleh sifat-sifat fisika dan kimia permukaan yang terbentuk selama proses karbonisasi dan aktivasi. Berdasarkan SNI 06-3730-1995 terkait penentuan kualitas arang aktif terdiri dari 6 tahap yaitu penentuan kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat, daya adsorpsi iodine, dan daya adsorpsi metilen blue. Dalam penelitian ini uji kualitas arang tempurung lontar teraktivasi KOH hanya meliputi kadar air, kadar abu, kadar zat terbang (Nitsae dkk, 2020). Kualitas arang aktif ditunjukkan pada Tabel 1.

Penetapan kadar air dari arang aktif tempurung lontar ini bertujuan menentukan kemampuan arang aktif menyerap uap air dari lingkungan. Berdasarkan hasil uji kadar air (Tabel 1) diperoleh 3,75%. Nilai ini telah sesuai dengan SNI 06-3730-1995 bahwa kadar air minimum yaitu 4,5%. Kadar air yang rendah dapat menghasilkan pori arang yang besar sehingga meningkatkan luas permukaan arang aktif dan efektif untuk proses adsorpsi. Nilai kadar air yang rendah ini dapat dipengaruhi oleh proses karbonisasi dengan suhu tinggi. Selain itu dipengaruhi oleh KOH sebagai aktivator yang berperan mendehidrasi air karena sifatnya yang higroskopis (Nitsae dkk, 2020).

Tabel 1. Uji Kualitas Arang Aktif

Perlakuan	Kadar Air (KA) (%)	Kadar Abu (%)	Kadar Zat Terbang (%)
SNI 06-3 730-1995	4,5	2,5	<25
Aktivasi KOH	3,75	2,59	42,68

Sumber data diolah dari hasil uji Laboratorium Exacta Universitas Kristen Wacana Kupang

Kadar abu merupakan zat yang tertinggal setelah material organik dibakar pada suhu tinggi. Hasil analisis kadar abu pada penelitian ini adalah 2,59%. Berdasarkan SNI 06-3730-1995, kadar abu maksimum untuk arang aktif berbentuk butiran adalah 2,5%. Dengan demikian, kadar abu yang diperoleh belum memenuhi persyaratan SNI karena melebihi batas maksimum sebesar 0,09%. Meskipun demikian, nilai tersebut menunjukkan bahwa kandungan residu anorganik pada arang aktif relatif rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sampel arang aktif masih mengandung abu mineral sisa dari tempurung lontar sehingga dapat mempengaruhi kinerja dalam proses adsorpsi.

Sementara itu, kadar zat terbang sebesar 42,68% menunjukkan nilai yang relatif tinggi yang melebihi batas maksimum yang dipersyaratkan. Kadar zat terbang adalah parameter kualitas yang menunjukkan persentase massa sisa padat anorganik berupa oksida-oksida mineral dalam karbon seperti magnesium, silikon, kalsium. Tingginya kadar zat terbang mengindikasikan bahwa masih terdapat fraksi volatil dalam material yang menunjukkan proses karbonisasi belum menghasikan tingkat karbonisasi yang optimal.

3.3. Karakterisasi SEM-EDX

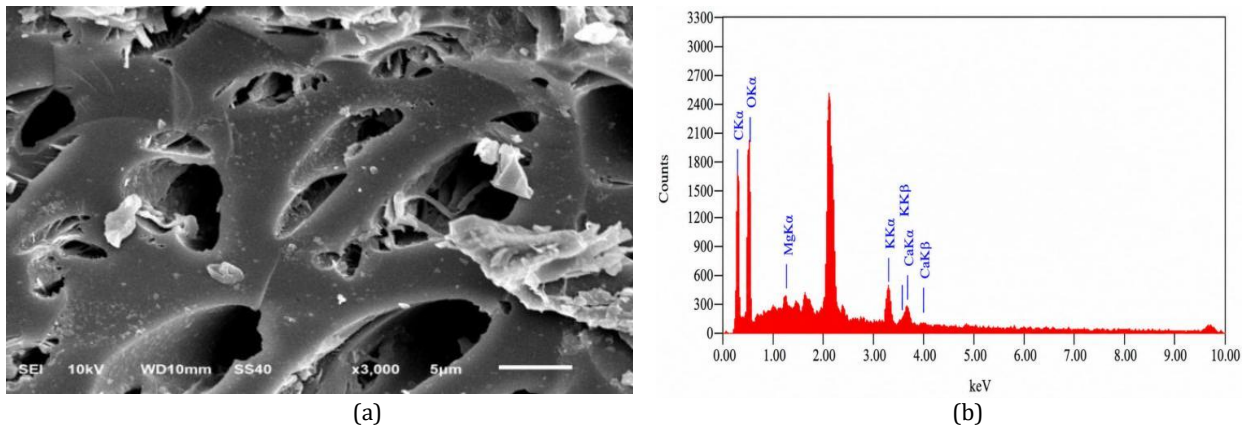
Karakterisasi arang aktif tempurung lontar dengan SEM-EDX dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik permukaan adsorben dan sifat kimia berupa komponen yang ada pada permukaan arang aktif sehingga memengaruhi kemampuan adsorpsinya Gambar 1. Dari analisis SEM, pada pembesaran 3.000 kali dengan skala bar sepanjang 5µm tampak menunjukkan morfologi permukaan arang aktif yang tidak rata, berbentuk tidak beraturan, memiliki banyak rongga yang ukurannya bervariasi. Beberapa rongga tampak besar dan memanjang (makropori) dan beberapa pori tampak kecil dan dalam (mikropori).

Adanya variasi porositas ini menunjukkan arang aktif tempurung lontar memiliki potensi yang baik untuk aplikasi adsorpsi. Selanjutnya pada analisis EDX (Gambar b), spektrum EDX menampilkan

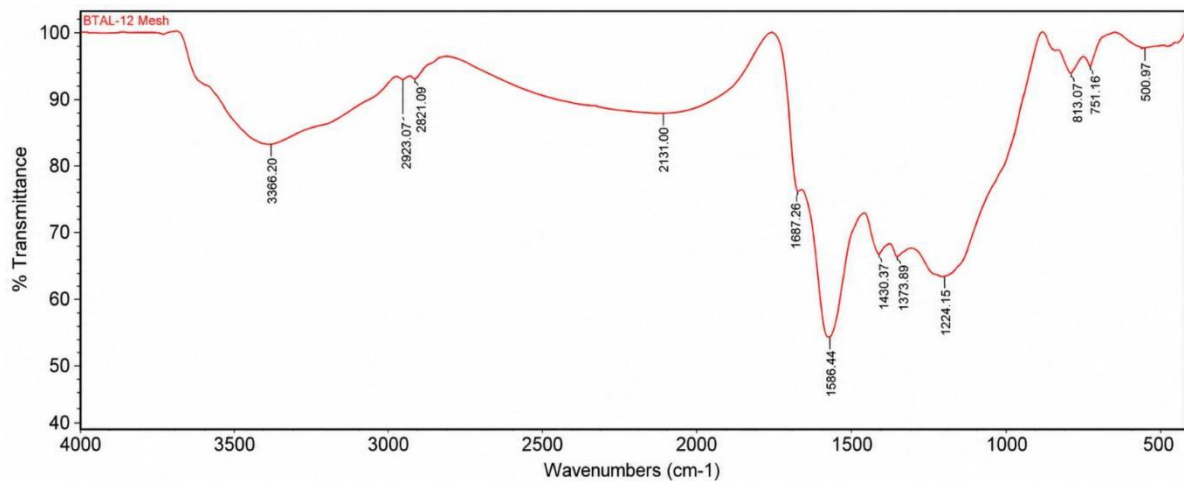
intensitas (counts) dan energi sinar-X (keV) dari unsur-unsur yang terkandung dalam sampel arang aktif. Puncak-puncak yang paling dominan dalam spektrum ini adalah karbon (C) pada puncak energi 0.27 keV dan oksigen (O) pada 0.52 keV. Hal ini menunjukkan komponen utama penyusun material adalah kedua unsur tersebut. Selain C dan O, terdapat beberapa puncak intensitas yang lebih rendah, yang mewakili unsur-unsur anorganik (mineral) yang berasal dari bahan baku tempurung lontar seperti magnesium (Mg), kalium (K), dan kalsium (Ca)(Costa dkk, 2025).

3.4. Karakterisasi FTIR

Karakterisasi arang aktif tempurung lontar dengan FTIR dalam penelitian ini bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang ada pada permukaan adsorben (Gambar 2). FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia atau gugus aktif yang terdapat pada permukaan arang aktif dan menentukan sifat kimia dan kemampuan adsorpsinya. Pada hasil analisis FTIR terdapat spektrum yang menampilkan persentase transmitansi (% T) terhadap bilangan gelombang (Wavenumbers, cm^{-1}). Dalam penelitian ini (Gambar 2), hasil karakterisasi permukaan arang aktif tempurung lontar memiliki beberapa puncak serapan tinggi, yang menunjukkan vibrasi ikatan kimia diantaranya serapan pada bilangan gelombang 3385.20 cm^{-1} yang menunjukkan -OH (hidroksil), bilangan gelombang 3385.20 cm^{-1} yang menunjukkan gugus C=O (karbonil), bilangan gelombang 1667.82 yang menunjukkan gugus C=C (karbon aromatik), dan bilangan gelombang 1430.37 cm^{-1} dan 1373.05 cm^{-1} menunjukkan C-H. Dengan demikian hasil karakterisasi FTIR arang aktif tempurung lontar ini mendukung hasil analisis EDX sebelumnya yang menunjukkan kandungan karbon dan oksigen yang tinggi. Keberadaan gugus-gugus aktif pada permukaan arang aktif ini yang berperan dalam mekanisme adsorpsi spesifik antara adsorbat dalam limbah cair tahu dengan adsorben arang aktif.



Gambar 1. (a) Pori Arang Aktif Hasil Analisis SEM, (b) Analisis EDX Berpa Spektra Komponen Kimia



Gambar 2. Hasil Karakterisasi FTIR

Tabel 2.Karakteristik Awal Limbah Cair Tahu

Parameter	Satuan	Nilai	Baku Mutu
pH	-	4	-
BOD	mg/l	1019,81	150
COD	mg/l	1188,34	300
TSS	mg/l	297	200

Sumber data diolah dari hasil uji Laboratorium DLHK Provinsi NTT

3.5. Karakteristik Awal Limbah Cair Tahu

Karakteristik awal limbah limbah cair tahu sebelum proses adsorpsi ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasarkan pada Tabel 3, menunjukkan bahwa karakteristik dari limbah cair tahu yang diambil dari salah satu industri X di kota Kupang memiliki nilai pH 4, BOD 1019,81 mg/L, COD 1188,34mg/L, dan TSS 297 mg/l. Hal ini mengindikasikan bahwa konsentrasi BOD, COD, TSS telah melebihi baku mutu limbah cair tahu menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 5 Tahun 2014. Kandungan konsentrasi BOD dan COD yang tinggi ini menunjukkan tingginya beban organik dalam limbah cair tahu, sehingga apabila dibuang tanpa pengolahan memadai, proses degradasi bahan organik dapat mengonsumsi oksigen terlarut dalam perairan sehingga menurunkan ketersediaan oksigen dan berpotensi menyebabkan kondisi hipoksia hingga anaerob yang menghasilkan senyawa berbau yang menurunkan kualitas lingkungan.

3.6. Kinerja Adsorpsi Limbah Cair Tahu

Penentuan daya adsorpsi adsorbat dalam limbah cair tahu dilakukan dengan menggunakan variasi pH. Variabel pH (derajat keasaman) merupakan salah satu faktor yang sangat berpengaruh dalam proses adsorpsi. Parameter pH menunjukkan tingkat konsentrasi ion H^+ di dalam air (You et al. 2021). Pengaruh parameter ini berkaitan dengan keadaan ionisasi permukaan adsorben dan keadaan ionisasi molekul adsorbat untuk interaksi elektrostatis (Angraini et al.,2022)

Pengaruh pH terhadap proses adsorpsi pada limbah cair tahu dengan menggunakan arang aktif tempurung lontar dilakukan dengan variasi pH air limbah pada pH 4, pH 7 dan pH 9. Berdasarkan hasil variasi pH terhadap proses adsorpsi diperoleh persentase efisiensi penurunan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar 3a, 3b, dan Gambar 4.

Data hasil pengaruh pH terhadap pengolahan limbah cair tahu dengan arang aktif tempurung

lontar di tunjukkan pada Tabel 3 dan Gambar (3a, 3b, 4.) secara konsisten menunjukkan bahwa efisiensi adsorpsi arang aktif terhadap kandungan limbah cair tahu cenderung menurun seiring dengan meningkatnya pH dari kondisi asam ke basa hal ini ditunjukkan dari hasil kandungan BOD, COD dan TSS. Persentase penurunan BOD dari pH 4 pH 7 dan pH 9 dengan media arang aktif tempurung lontar secara berturut-turut adalah sebesar 55,18%, 51,84% dan 44,37%.

Efisiensi penurunan BOD pada pH asam (pH 4) lebih tinggi daripada pH netral (pH 7) dan basa (pH 9) sesuai Tabel 3. Hal ini dapat dijelaskan berdasarkan sifat kimia adsorben dan adsorbat yang dimiliki. Secara struktur dan kandungan komponen kimia, parameter BOD di dalam limbah cair tahu di dominasi oleh degradasi senyawa protein menjadi asam amino (*tyrosin, cystin, glutamic acid dan aspartic acid*), gula sederhana, peptida kecil (Fathana et al., 2023). Asam-asam amino ini berada sebagai *zwitterion*, yaitu molekul yang bermuatan positif dan negatif karena memiliki dua gugus utama yaitu gugus amino ($-NH_3$) dan karboksilat ($-COOH$). Selanjutnya media arang aktif teraktivasi KOH berdasarkan hasil analisis FTIR diketahui memiliki gugus aktif O-H dan C=O yang kaya akan elektron. Keberadaan gugus ini pada permukaan media akan cenderung lebih negatif (anionik) sehingga pada saat variasi pH, lingkungan media cenderung dominan ion H^+ sehingga akan diikat oleh gugus aktif dari permukaan media terjadi interaksi elektrostatik

polar dan terjadi penyerapan. Selain adsorpsi kimia, pada suasana ini terjadi pula penyerapan secara fisik yakni molekul asam amino terserap ke dalam pori-pori media. Sehingga senyawa organik dalam limbah akan mengalami pengendapan pada permukaan media dan menurunkan konsentrasi BOD.

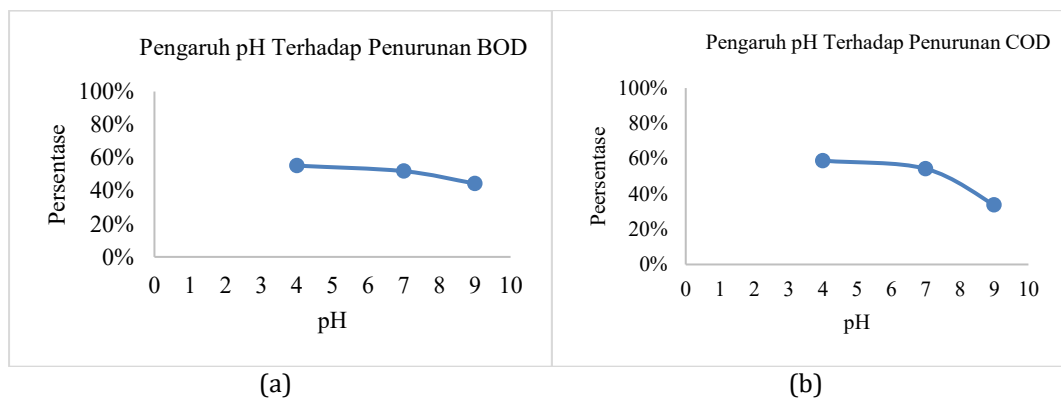
Persentase penurunan COD dari pH 4 pH 7 dan pH 9 secara berturut-turut adalah sebesar 58,87%, 53,29% dan 33,69%. Air limbah hasil pengolahan memiliki nilai COD yang belum memenuhi standar baku mutu. Penurunan nilai COD pada ke-3 variasi pH tersebut menunjukkan bahwa penurunan COD tertinggi terjadi pada pH 4 dengan persentase penurunan sebesar 58,87%.

Efisiensi penurunan COD pada pH asam lebih tinggi daripada pH netral (pH 7) dan basa (pH 9) dapat dijelaskan melalui sifat kimia adsorben (arang aktif tempurung lontar) dan adsorbat (polutan air limbah) yang dimiliki. Secara struktur dan kandungan komponen kimia, parameter COD di dalam limbah cair tahu di dominasi oleh protein terlarut, peptida, asam amino, polisakarida, oligosakarida, lipid, asam organik, hingga senyawa kompleks hasil degradasi biomassa kedelai (Aretzy et al., 2022). Senyawa-senyawa tersebut memiliki gugus fungsional yang dapat mengalami protonasi dan deprotonasi, seperti gugus karboksilat ($-COOH$), dan amina ($-NH_3$), sehingga perubahan pH dapat mempengaruhi muatan dan interaksinya selama proses adsorpsi (Nieto et al., 2021).

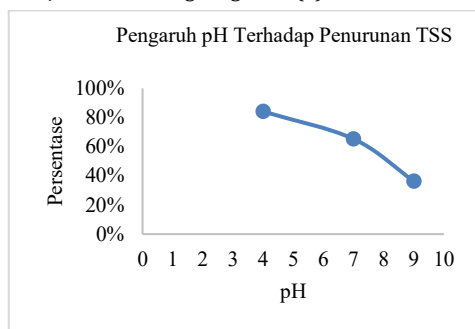
Tabel 3. Perbandingan Kualitas Air Limbah Tahu Sebelum dan Sesudah Pengolahan dengan Adsorpsi

Parameter	Konsentrasi awal (mg/L)	pH Perlakuan	Konsentrasi Akhir (mg/L)	Efisiensi (%)	Baku Mutu* (mg/L)	Status
BOD	1019,81	4	497,88	51,18	150	Belum Memenuhi
BOD	1019,81	7	488,72	51,84	150	Belum Memenuhi
BOD	1019,81	9	567,32	44,37	150	Belum Memenuhi
COD	1188,34	4	488,72	58,87	300	Belum Memenuhi
COD	1188,34	7	555,13	53,29	300	Belum Memenuhi
COD	1188,34	9	756,15	33,69	300	Belum Memenuhi
TSS	297	4	47	84,17	200	Memenuhi
TSS	297	7	103	65,32	200	Memenuhi
TSS	297	9	188,98	36,37	200	Memenuhi

Keterangan: * Standar Baku Mutu PerMen LH No. 5 Tahun 2014



Gambar 3. (a) Pengaruh pH Terhadap Penurunan BOD, (b) Pengaruh pH Terhadap Penurunan COD



Gambar 4. Pengaruh pH Terhadap Penurunan TSS

Parameter TSS menunjukkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi dibandingkan parameter BOD dan COD. Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi penurunan TSS mencapai 84,78% pada pH 4, 65,32% pada pH 7, dan 36,37% pada pH 9, dengan konsentrasi akhir berturut-turut sebesar 45,20 mg/L, 103,00 mg/L, dan 188,98 mg/L. Seluruh konsentrasi tersebut telah berada di bawah baku mutu TSS sebesar 200 mg/L. Tingginya penyisihan TSS dibandingkan BOD dan COD menunjukkan bahwa sistem pengolahan lebih efektif dalam memisahkan komponen partikulat dibandingkan komponen organik yang berada dalam fase terlarut. Perbedaan karakteristik tersebut penting karena keberadaan suspended solids juga dapat memengaruhi proses adsorpsi senyawa organik oleh karbon aktif, baik terhadap kapasitas maupun laju adsorpsinya (Matsui et al., 1982).

Penyisihan TSS dalam penelitian ini tidak hanya dapat dikaitkan dengan mekanisme adsorpsi, tetapi juga dipengaruhi oleh proses filtrasi yang berlangsung selama pengolahan pada mekanisme adsorpsi. Pada proses filtrasi, partikel tersuspensi yang berukuran relatif besar maupun partikel flok tertahan secara fisik pada pori dan permukaan media. Sementara itu, adsorpsi memungkinkan komponen tertentu dalam limbah berinteraksi dengan situs aktif pada permukaan arang aktif. Karbon aktif memiliki struktur berpori dan berbagai gugus fungsi permukaan yang memungkinkan terjadinya interaksi dengan kontaminan melalui mekanisme fisik maupun kimia (Rashidi et al., 2021). Dengan demikian, tingginya penyisihan TSS pada penelitian ini kemungkinan merupakan kontribusi simultan dari pemisahan partikel secara fisik dan interaksi permukaan pada adsorben.

Pola penyisihan TSS selanjutnya menunjukkan adanya pengaruh kondisi pH terhadap kinerja sistem. Efisiensi penyisihan menurun dari 84,78% pada pH 4 menjadi 65,32% pada pH 7 dan 36,37% pada pH 9. Perubahan tersebut dapat dikaitkan dengan perubahan sifat permukaan adsorben dan karakteristik fisikokimia adsorbat akibat perubahan konsentrasi ion H^+ dan OH^- . pH merupakan salah satu parameter penting dalam proses adsorpsi karena dapat memengaruhi muatan permukaan adsorben, spesiasi adsorbat, serta interaksi

elektrostatik antara adsorben dan adsorbat (Rashidi et al., 2021).

TSS pada limbah cair tahu dapat tersusun atas partikel koloid dan mikropartikel biomassa yang berasal dari bahan organik kedelai. Komponen tersebut dapat memiliki gugus fungsional seperti karboksil/karboksilat ($-COOH/-COO^-$), hidroksil ($-OH$), fosfat, serta gugus yang berasal dari protein. Gugus-gugus tersebut dapat mengalami protonasi dan deprotonasi akibat perubahan pH sehingga mengubah karakter muatan permukaan dan interaksi partikel dengan adsorben. Pada karbon aktif, gugus yang mengandung oksigen seperti karboksil, hidroksil, karbonil, dan eter juga berperan dalam menentukan sifat kimia permukaan dan interaksinya dengan kontaminan (Pradnya et al., 2026).

Pada kondisi asam, peningkatan konsentrasi H^+ dapat meningkatkan protonasi gugus fungsional sehingga mengubah distribusi muatan permukaan partikel maupun adsorben. Perubahan tersebut berpotensi memengaruhi kestabilan koloid dan interaksi elektrostatik antara adsorbat dan permukaan karbon aktif. Menurut Alzawy et al., (2022) menjelaskan bahwa perubahan pH dapat mengubah muatan permukaan karbon relatif terhadap nilai point of zero charge (pH_{pzc}), sehingga dapat meningkatkan atau menurunkan gaya tarik maupun tolak-menolak antara adsorben dan adsorbat. Dalam sistem penelitian ini, kondisi asam pada pH 4 diduga menghasilkan kondisi yang lebih mendukung terjadinya agregasi partikel dan interaksi dengan permukaan adsorben, sehingga partikel lebih mudah tertahan selama filtrasi dan menghasilkan efisiensi penyisihan TSS yang lebih tinggi.

4. KESIMPULAN

Karakterisasi arang aktif tempurung lontar secara fisik yang diuji antara lain: kadar air memenuhi, kadar abu dan kadar zat terbang belum memenuhi berdasarkan SNI 06-3730-1995. Karakterisasi morfologi dan komponen kimia serta gugus fungsi yang tersedia pada permukaan efektif meningkatkan kemampuan arang aktif tempurung lontar untuk mengadsorpsi limbah cair tahu. Uji kinerja arang aktif melalui variasi pH 4, 7 dan 9 pada adsorpsi secara batch menunjukkan penurunan pH mempengaruhi penurunan BOD, COD dan TSS dalam

limbah cair tahu. Efisiensi penurunan tertinggi BOD, COD dan TSS terjadi pada pH 4 secara berturut-turut sebesar 55,18%; 58,87% dan 84,17%.

DAFTAR PUSTAKA

- Nieto-veloza A, Zhong Q, Kim W seok, Souza DD, Krishnan HB, Dia VP. Utilization of tofu processing wastewater as a source of the bioactive peptide lunasin. *Food Chem.* 2021;362(May):130220. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130220>.
- Wang F, Gao B, Su M, Dai C, Huang L, Zhang C. Integrated biorefinery strategy for tofu wastewater biotransformation and biomass valorization with the filamentous microalga *Tribonema minus*. *Bioresour Technol* [Internet]. 2019;292(July):121938. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121938>
- Chua JY, Liu SQ. Soy whey: More than just wastewater from tofu and soy protein isolate industry. *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 2019;91(June):24–32. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.016>
- Costa M Da, Leko LL. Pemanfaatan Tempurung Lontar Dan Zeolit Alam Sebagai Media Vertical Roughing Filter Pada Pengolahan Limbah Cair Tahu. 2025;10(2):100–9.
- Syaripuddin MS, Harjanto, Cahyo SB. Pembuatan dan Karakterisasi Arang Aktif dari Bonggol Singkong dengan Aktivasi Fisika. *Pros Semin Nas Penelit Pengabdian Kpd Masy.* 2019; 2019:94–9.
- Nayl AEA, Elkhatab RA, Malah T El, Yakout SM, El-khateeb MA, Ali MS, et al. Adsorption studies on the removal of COD and BOD from treated sewage using activated carbon prepared from date palm waste. 2017;24(28):22284–93.
- Pacini VA, Ingallinella AM, Sanguinetti G. Removal of iron and manganese using biological roughing up flow filtration technology. *Water Res.* 2005;39(18):4463–75.
- Rofikoh V, Zaman B, Samadikun BP. Penyisihan BOD, Minyak Dan Lemak Dalam Air Limbah Domestik Dengan Menggunakan Karbon Aktif Dari Kulit Pisang. *J Kesehat Lingkung Indones.* 2024;23(1):59–66.
- Nitsae M, Solle HRL, Martinus SM, Emola IJ. STUDI Adsorpsi Methylene Blue Terhadap Arang Aktif Tempurung Lontar (*Borassus flabellifer* L.) Asal Nusa Tenggara Timur. *J Kim Ris.* 2021;6(1):46.
- Lano LA, Ledo MES, Nitsae M. Pembuatan arang aktif dari tempurung Siwalan (*Borassus flabellifer* L.) yang diaktivasi dengan Kalium Hidroksida (KOH). *Biota J Ilm Ilmu Hayati.* 2020;5(1):8–15. <https://doi.org/10.24002/biota.v5i1.2948>
- Shellyanti M, Komari N. Pembuatan dan Karakterisasi Arang Aktif dari Kayu Alaban (*Vitex Pinnata* L.) Menggunakan Asam Asetat. *J Nat Sci.* 2023;3(2):33–7.
- Goa Aa, Gauru I, Apriani A, Solo M, Mere Jk, Kimia J, Et Al. Tempurung Lontar Asal Ntt Untuk Menurunkan Kadar Logam Fe Dan Mn Dalam Limbah Cucian Mangan Di Desa Noebesa. 2012;1–6.
- Sutyasmi S, Susanto HB. Penggunaan tanaman air (bambu air dan melati air) pada pengolahan air limbah penyamakan kulit untuk menurunkan beban pencemar dengan sistem wetland dan adsorpsi. *Maj Kulit, Karet, dan Plast.* 2013;29(2):69.
- You SJ, Murti RHA. Effects of pH on Adsorption of Remazol Turquoise Blue Dye on MgO/TiO₂ Nanocomposite. *Biomedical and Mechanical Engineering Journal (BIOMEJ).* 2021;1(1):15–20. <https://doi.org/10.33005/biomej.v1i1.26>
- Angraini N, Agustina TE, Hadiah F. Pengaruh pH dalam Pengolahan Air Limbah Laboratorium Dengan Metode Adsorpsi untuk Penurunan Kadar Logam Berat Pb, Cu, dan Cd. *J Ilmu Lingkungan.* 2022;20(2):345–355. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.345-355>
- Fathana H, Iqhrammullah M, Rahmi R, Adlim A, Lubis S. Tofu wastewater-derived amino acids identification using LC-MS/MS and their uses in the modification of chitosan/TiO₂ film composite. *Chem Data Collect.* 2021;35:100754. doi:10.1016/j.cdc.2021.100754.
- Aretzy, A., Syamsir, E., & Sitanggang, A. B. (2022). Karakterisasi aktivitas fungsional senyawa bioaktif dari whey hasil samping produksi tahu. *Jurnal Teknologi dan Industri Pangan*, 33(1), 60–68. doi.org/10.6066/jtip.2022.33.1.60
- Matsui, Y., Kuroda, K., dan Kamei, T. (1982). The effects of pH and suspended solids in the removal of organics from waters and wastewaters by the activated carbon adsorption process. *Water Research*, 16(1), 73–82. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(82\)90055-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90055-0)
- Rashidi, N.A., Yusoff, M.S., dan Zainura Zainon, N. (2021). A comprehensive review on the synthesis, performance, modifications, and regeneration of activated carbon for the adsorptive removal of various water pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106177. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106177>
- Alsawy, T., Rashad, E., El-Qelish, M., and Mohammed, R.H., (2022), A comprehensive review on the chemical regeneration of biochar adsorbent for sustainable wastewater treatment, *npj Clean Water*, 5, 29. <https://doi.org/10.1038/s41545-022-00172-3>.