

Efektivitas Arang Karbon Aktif Dari Limbah Bahan Pertanian Dalam Menurunkan Polusi Mikroplastik

Marchel Putra Garfansa^{1*}, Siti Holifah¹, Iswahyudi¹, Dan Yenni Arista Cipta Ekalaturrahmah²

¹Program Studi Agroteknologi, Universitas Islam Madura, Pamekasan, Jawa Timur, Indonesia

²Program Studi Agrobisnis Perikanan, Universitas Islam Madura, Pamekasan, Jawa Timur, Indonesia

*E-mail: Marchel@uim.ac.id

Received: 07 06 2025 / Accepted: 26 12 2025 / Published online: 21 01 2026

ABSTRAK

Polusi mikroplastik (MPs) semakin meningkat setiap tahun dan hamper dijumpai di lingkungan sekitar terutama perairan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi arang karbon aktif berbasis limbah pertanian dalam mengurangi tingkat mikroplastik pada air irigasi pertanian. Penelitian ini menggunakan teknik filtrasi kolom, di mana berbagai bahan baku arang seperti sekam padi, kayu, dan tempurung kelapa diolah dan diuji dalam proses aktivasi untuk menghasilkan karbon aktif. Efektivitas karbon aktif dalam mengurangi mikroplastik diuji dengan menggunakan empat jenis mikroplastik yang berbeda dalam ukuran dan bentuk, dan pengukuran efisiensi dilakukan secara gravimetrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang karbon aktif yang diaktivasi, terutama yang berasal dari kayu (AKK), mampu menghilangkan mikroplastik hingga 98,79%, lebih tinggi dibandingkan arang yang tidak diaktivasi. Proses aktivasi meningkatkan kapasitas adsorpsi karbon aktif, yang terbukti lebih efektif dalam menangani mikroplastik, terutama yang lebih besar dan tidak teratur. Kesimpulannya, arang karbon aktif berbasis limbah pertanian merupakan alternatif yang efektif dan ramah lingkungan dalam mengurangi polusi mikroplastik di sistem pertanian. Penelitian ini memberikan dampak yang signifikan dalam mengatasi polusi mikroplastik yang semakin meningkat di sektor pertanian dan dapat menjadi solusi berkelanjutan untuk pengelolaan air irigasi.

Kata Kunci: Aktivasi, Adsorpsi, Pengurangan, Polutan, Lingkungan perairan

ABSTRACT

Microplastic pollution (MPs) has increasing every year and is almost found in the surrounding environment, especially in aquatic ecosystems. The aim of this study is to evaluate the potential of agricultural waste-based activated carbon in reducing microplastic levels in agricultural irrigation water. This research uses the column filtration technique, where various charcoal raw materials such as rice husks, wood, and coconut shells are processed and tested through an activation process to produce activated carbon. The effectiveness of activated carbon in reducing microplastics is tested using four types of microplastics with different sizes and shapes, and the efficiency measurement is done gravimetrically. The results show that activated carbon, especially from wood (AKK), is capable of removing microplastics up to 98.79%, higher than non-activated carbon. The activation process enhances the adsorption capacity of activated carbon, which proves to be more effective in handling microplastics, particularly the larger and irregular ones. In conclusion, agricultural waste-based activated carbon is an effective and environmentally friendly alternative in reducing microplastic pollution in agricultural systems. This research has a significant impact in addressing the growing microplastic pollution in the agricultural sector and can become a sustainable solution for irrigation water management.

Keywords: Activation, Adsorption, Reduction, Pollutant, Aquatic environment

PENDAHULUAN

Mikroplastik (MP) merupakan kontaminan yang kini semakin mendapat perhatian global, terutama dalam kaitannya dengan dampaknya terhadap lingkungan perairan dan ekosistem pertanian. Dampak dari mikroplastik tidak hanya terbatas pada pencemaran air dan tanah, tetapi juga dapat mempengaruhi kesehatan tanaman dan organisme tanah, yang pada gilirannya dapat memengaruhi produktivitas pertanian (Garfansa et al., 2025). Sebuah penelitian oleh Zhou et al. (2021a) menunjukkan bahwa mikroplastik dapat mengganggu interaksi mikroorganisme tanah, mengubah struktur tanah, serta mengurangi ketersediaan nutrisi yang dibutuhkan tanaman. Selain itu, mikroplastik juga dapat menyerap berbagai kontaminan berbahaya seperti pestisida, antibiotik, dan logam berat, yang memperburuk kualitas lingkungan pertanian. Berdasarkan laporan dari Sharma et al. (2023), diperkirakan pada tahun 2016 saja terdapat 8 juta ton plastik yang masuk ke lautan, yang dapat terurai menjadi mikroplastik dan mencemari lingkungan perairan. Estimasi ini menunjukkan bahwa jumlah plastik yang mencemari lingkungan perairan dunia terus meningkat, dengan proyeksi sekitar 53 juta ton plastik akan terakumulasi pada tahun 2030, yang meningkatkan risiko polusi mikroplastik di perairan pertanian. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan teknologi yang dapat mengurangi mikroplastik dalam air irigasi guna mendukung keberlanjutan pertanian yang sehat dan berkelanjutan.

Berbagai penelitian telah mengkaji metode-metode pengolahan air yang bertujuan untuk mengurangi mikroplastik, terutama dalam system instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Sebagian besar instalasi IPAL dirancang untuk menangani polutan besar (Sari et al., 2022), namun kemampuan mereka dalam

menangani mikroplastik yang berukuran sangat kecil seringkali terbatas. Mikroplastik berukuran kecil, terutama yang lebih kecil dari 100 μm , sangat sulit untuk disaring atau dikeluarkan melalui proses pengolahan konvensional seperti filtrasi atau pengendapan (Lestari et al., 2021). Penelitian menunjukkan bahwa sebagian besar IPAL hanya mampu mengurangi mikroplastik berukuran besar pada tahap awal pengolahan, seperti penyaringan dan pengendapan, sementara mikroplastik kecil dapat lolos dan keluar melalui air buangan, berkontribusi pada pencemaran perairan lebih lanjut (Franco et al., 2021; Zhang et al., 2021). Seiring dengan meningkatnya jumlah mikroplastik yang masuk ke sistem pengolahan air, penting untuk mengembangkan teknologi yang lebih efisien dalam menyaring mikroplastik yang lebih kecil. Berbagai metode, seperti koagulasi, flokulasi, dan teknik filtrasi membran, telah diuji untuk meningkatkan efisiensi penghilangan mikroplastik dalam air limbah. Meskipun beberapa metode ini menunjukkan hasil yang menjanjikan, masih diperlukan inovasi lebih lanjut untuk menangani tantangan mikroplastik dalam sistem pengolahan air yang lebih ramah lingkungan dan efektif.

Penggunaan karbon aktif komersial merupakan material yang diketahui dapat mengurangi polusi pada air termasuk mikroplastik. Walaupun karbon aktif komersial telah terbukti efektif dalam menurunkan mikroplastik dalam air, terdapat kendala biaya produksi dan kebutuhan regenerasi yang tinggi sehingga penerapannya pada skala besar menjadi terbatas. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa karbon aktif komersial, misalnya berbasis arang granular, mampu mengurangi mikroplastik dalam air hingga 98%, sebagaimana dilaporkan oleh (Amirah Mohd Napi et al., 2023; Béalu et al., 2024). Namun,

meskipun kinerjanya tinggi, biaya produksi yang mahal dan proses regenerasi yang sering dibutuhkan membatasi aplikasi yang lebih luas dan berkelanjutan (Murray et al., 2021). Sebaliknya, arang biasa umumnya memiliki potensi adsorpsi lebih rendah, tetapi menawarkan keunggulan dari sisi biaya yang lebih murah dan ketersediaan bahan yang lebih luas. Berdasarkan kondisi tersebut, gap penelitian pada manuskrip ini adalah masih perlunya alternatif adsorben yang tetap efektif menurunkan mikroplastik tetapi berpotensi lebih ekonomis dan lebih mudah diperoleh dibanding karbon aktif komersial. Oleh karena itu, penelitian ini tidak menggabungkan material lain dengan arang, tetapi secara khusus berfokus pada pengujian efektivitas karbon aktif yang berasal dari bahan pertanian untuk mengurangi mikroplastik dalam air irigasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas limbah bahan arang karbon aktif yang berasal dari berbagai sumber pertanian, seperti sekam bakar, arang kayu, dan tempurung kelapa, dalam mengurangi mikroplastik dalam air irigasi pertanian. Meskipun berbagai metode telah diuji untuk mengurangi mikroplastik dalam air limbah, penelitian yang mengkaji potensi arang karbon aktif berbasis limbah pertanian dalam pengolahan mikroplastik di sistem irigasi pertanian masih terbatas. Oleh karena itu, riset ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan menguji kemampuan limbah arang karbon aktif dalam menyaring mikroplastik secara efisien. Penelitian ini akan mengukur pengaruh variabel seperti panjang bed arang dan konsentrasi mikroplastik pada efektivitas jerapan mikroplastik, serta mengkaji peran karakteristik fisik dari arang karbon aktif dalam meningkatkan kinerja penyaringan. Signifikansi dari penelitian ini terletak pada potensi penerapan arang karbon aktif berbasis limbah pertanian sebagai alternatif yang

lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam pengelolaan kualitas air pertanian, yang dapat mengurangi polusi mikroplastik dalam jangka panjang, sekaligus mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan ekosistem pertanian.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada 07 April 2025 di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Malang. Penelitian ini menggunakan teknik difiltrasi air kolom dalam mengurangi mikroplastik didalamnya. Kolom kaca dibuat untuk memudahkan evaluasi penghilangan MPs melalui macam arang karbon aktif (AKA). Bahan plastik yang digunakan dalam penelitian ini dibeli dari distributor plastik Jaya Anugrah (Pamekasan, Indonesia). Bahan baku arang yang berbeda, termasuk sekam padi, kayu (limbah kayu), dan tempurung kelapa diperoleh dari petani setempat.

Persiapan bahan arang karbon aktif

Bahan-bahan baku (sekam padi, kayu, dan tempurung kelapa) pembuatan arang dicampur dengan larutan HNO_3 1,0 M dan diaduk selama 24 jam untuk menghilangkan kotoran logam. Asam sisa kemudian dihilangkan dengan membilas bahan-bahan baku tersebut beberapa kali dengan air suling, dilanjutkan dengan pengeringan pada suhu ruangan. Untuk menghilangkan kandungan silika, bahan kemudian diaduk selama 24 jam dalam 500 mL larutan NaOH 1,0 M dan dikeringkan pada suhu 105°C selama 24 jam. Proses pembuatan arang dari masing-masing bahan adalah sebagai berikut;

1. Arang sekam karbon aktif (ASK)

Persiapan karbon aktif mengikuti prosedur yang dijelaskan oleh (Muniandy et al., 2014). Aktivasi dilakukan dengan mencampur arang sekam padi (AS) dengan larutan agen pengaktif 40% (w/w) (NaOH atau KOH). Campuran ini diaduk selama

30 menit pada suhu ruangan dan kemudian disonikasikan selama 15 menit. AS kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 48 jam sebelum aktivasi. Proses aktivasi dilakukan dengan aliran N₂ dengan laju pemanasan 10°C/menit.

2. Arang kayu karbon aktif (AKK)

Prosedur aktivasi mengikuti metode yang dijelaskan oleh (Li et al., 2017). Arang limbah kayu (AK) diimpregnasi dengan larutan air KOH 50% (w/w) selama beberapa hari pada suhu 60°C, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 105°C selama 12 jam. Bahan tersebut kemudian dikarbonisasi dengan laju pemanasan 10°C/menit, mencapai suhu aktivasi akhir di bawah aliran N₂ (100 ml/menit). Suhu aktivasi akhir adalah 700°C.

3. Arang tempurung kelapa karbon aktif (ABK)

Persiapan karbon aktif mengikuti prosedur yang dijelaskan oleh (Zhao et al., 2023). Tempurung kelapa dicampur dengan larutan KOH 30%, kemudian dikeringkan pada suhu 80°C selama 12 jam. Bahan tersebut kemudian dikarbonisasi pada suhu 800°C selama 2 jam di bawah aliran N₂ dan dibiarkan mendingin hingga suhu ruangan. Setelah deionisasi berulang untuk menetralkan filtrat, bahan tersebut dikeringkan lebih dari 12 jam pada suhu 80°C.

Karakterisasi material arang karbon aktif

Sifat fisik dari tiga sampel bahan arang (karbon aktif dan non aktif) dianalisis dalam penelitian ini untuk menilai dampaknya terhadap proses penghilangan MPs. Total luas permukaan spesifik (SSA) sampel ditentukan menggunakan metode Ethylene Glycol

Monobutyl Ether (EGME), yang merupakan teknik yang diakui secara luas untuk karakterisasi permukaan. Metode ini melibatkan pengukuran tepat dari adsorpsi EGME pada permukaan bahan, yang memungkinkan perhitungan SSA. Beberapa penelitian telah melaporkan bahwa teknik ini dapat diandalkan dan efisien untuk menentukan SSA, khususnya pada sampel arang (Bu et al., 2019; Nakhli & Imhoff, 2020). Morfologi permukaan sampel diperiksa menggunakan HITACHI TM3000 Tabletop Scanning Electron Microscope (SEM), yang memungkinkan klasifikasi mikropori, mesopori, dan makropori sesuai dengan klasifikasi oleh Bandosz et al. (2003). Setelah eksperimen penghilangan MPs, sampel arang diambil dari kolom untuk analisis SEM lebih lanjut untuk mengamati perubahan morfologinya. Untuk menyelidiki potensi interaksi antara arang dan partikel MPs, sifat hidrofobisitas/hidrofilisitas dan potensi zeta dari sampel dianalisis. Penilaian hidrofobisitas dilakukan menggunakan pengukuran sudut kontak tetesan sessile, mengikuti metodologi yang dijelaskan oleh Daniel et al. (2023). Dalam prosedur ini, tetesan air suling 3,5 µL ditempatkan dengan hati-hati pada permukaan setiap sampel. Gambar yang dihasilkan kemudian diambil menggunakan mikroskop digital resolusi tinggi. Sudut kontak (θ) ditentukan menggunakan perangkat lunak ImageJ yang dilengkapi dengan plugin khusus untuk sudut kontak. Berdasarkan sudut kontak yang diukur, sampel diklasifikasikan menjadi tiga kategori: hidrofobik ($\theta < 90^\circ$), hidrofobik ($90^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$), dan superhidrofobik ($\theta > 150^\circ$).

Persiapan material MPs

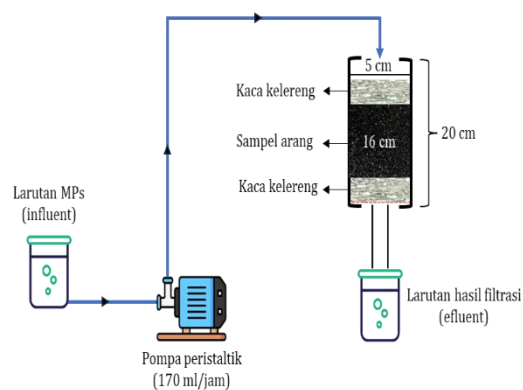
Efektivitas arang yang direkayasa permukaannya dievaluasi dengan

mengujinya terhadap empat jenis mikroplastik (MPs) yang berbeda. MPs yang dipilih mewakili beragam komposisi polimer, ukuran, bentuk, dan warna, untuk memastikan penilaian yang komprehensif mengenai kinerja arang, sebagai berikut: (i) PP10-20 (polipropilen berukuran 10-20 μm , bentuk tidak teratur berwarna biru), (ii) PS5-9 (polistiren, berukuran 6-9 μm , bentuk berserat berwarna merah), (iii) PET5 (polietilen tereftalat, < 5 mm, bentuk berserat berwarna biru), dan (iv) PPnano (polipropilen, 350-860 nm, bentuk tidak beraturan berwarna biru). MPs disiapkan menggunakan metode penggilingan basah untuk mengurangi partikel MPs yang lebih besar. Prosedur ini melibatkan pencampuran partikel mikroplastik (MPs) dengan etanol pada rasio berat-ke-volume 2:1. Proses penggilingan dilakukan pada 400 rpm selama total 24 siklus. Setelah penggilingan, larutan MP disiapkan dengan melarutkan 4 mg MP dalam campuran pelarut yang terdiri dari air suling dan etanol pada rasio volume 9:1.

Partikel MPs yang lebih besar dari 20 μm dapat dihilangkan secara efektif melalui proses filtrasi (Conesa & Ortuño, 2022; Padervand et al., 2020), penelitian ini berfokus pada partikel MPs yang lebih kecil dari 20 μm untuk mengevaluasi kinerja tiga jenis arang karbon aktif. Untuk mengevaluasi efisiensi pemfilteran partikel MPs yang lebih kecil, penelitian ini menggunakan partikel polipropilen dengan rentang ukuran 10-20 μm (PP10-20). PP10-20 dipilih tidak hanya karena ukurannya tetapi juga karena bentuknya yang tidak teratur, yang merupakan morfologi MPs yang paling sering ditemukan di lingkungan perairan. Setelah mengidentifikasi arang karbon aktif yang optimal, material tersebut akan diterapkan untuk memfilter sampel MPs tambahan lainnya guna memvalidasi efektivitasnya yang lebih luas.

Uji pengurangan mikroplastik

Eksperimen berbasis filtrasi kolom dilakukan untuk mengevaluasi efisiensi penghilangan MP menggunakan arang yang berbeda. Sebelum eksperimen, filter dikeringkan dan kemudian dibilas dengan larutan setelah dipasang dalam sistem. Proses ini diulang sampai diperoleh ketinggian lapisan yang konstan. Konfigurasi sistem filtrasi kolom yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1, mencakup dimensi kolom, susunan media filter, arah aliran, serta titik pengambilan sampel effluent. Media filter juga dilengkapi dengan kelereng kaca pada bagian atas dan bawah (masing-masing 2 cm) berukuran kecil untuk meningkatkan laju air. Proses pengepakan arang dilakukan dengan hati-hati untuk memastikan distribusi yang merata setinggi 16 cm. Proses filtrasi dilakukan secara terus menerus selama 2 jam, dan sampel effluent dikumpulkan setiap 5 menit dalam botol kaca untuk analisis selanjutnya. Selain itu, larutan masuk diperkenalkan dari atas kolom menggunakan pompa peristaltik dengan laju aliran konstan 170 ml/jam, memastikan aliran laminar dan distribusi yang merata di seluruh lapisan filter (Gambar 1).



Gambar 1. Skema penelitian proses filtrasi air

Efektivitas arang dalam menghilangkan MP dievaluasi menggunakan teknik gravimetri. Untuk analisis gravimetri, sampel effluent disaring menggunakan kertas saring khusus, yang dipilih sesuai dengan ukuran MPs untuk memastikan filtrasi yang menyeluruh. Perubahan massa antara tahap awal dan akhir proses filtrasi dihitung untuk menentukan jumlah MPs yang tertangkap dalam effluent. Data ini kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi penghilangan MPs. Efisiensi penghilangan gravimetri/Gv (%) dihitung menggunakan Persamaan (1), di mana massa awal mewakili massa MP dalam influen sebelum filtrasi, dan massa akhir sesuai dengan massa MP yang tertahan dalam effluent. Kedalaman yang dicapai oleh MP diukur dengan menggali bed filter pada interval 0,5 cm, memungkinkan penilaian yang tepat terhadap penetrasinya ke dalam media filtrasi.

$$Gv \% = \frac{W0 - W1}{W0} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana W0 mewakili berat MPs awal dan W1 mewakili berat MPs akhir.

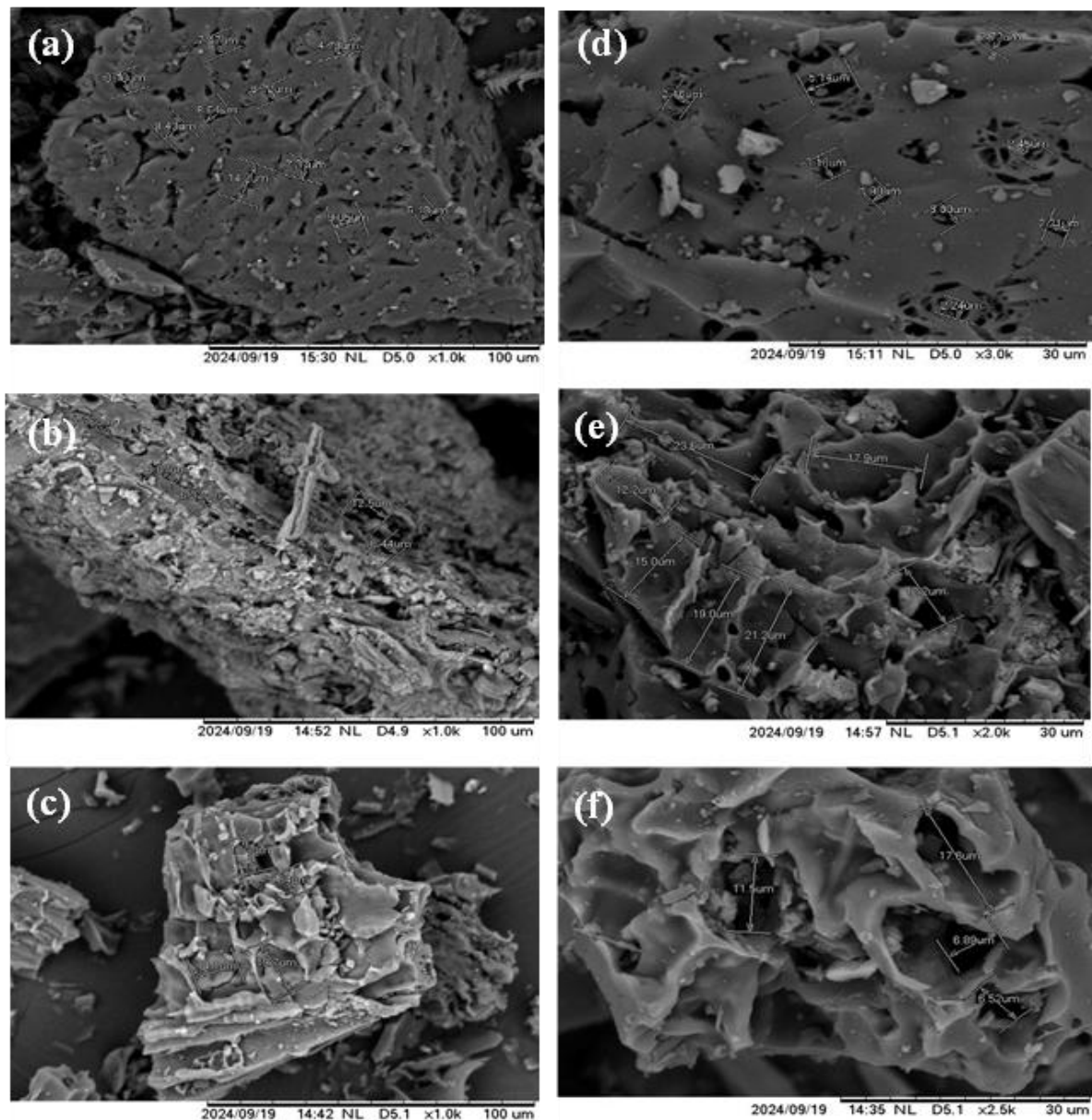
HASIL DAN PEMBAHASAN
Karakterisasi sampel

Analisis SEM dari semua sampel arang ditunjukkan pada Gambar 2, sementara potensi Zeta, sudut kontak, dan luas permukaan spesifik disajikan dalam Tabel 1.

Penelitian sebelumnya telah mengonfirmasi perbedaan morfologi antara arang yang berasal dari limbah kayu (AK) dan sekam padi (AS). Menurut (Zhang et al., 2024), arang berbasis kayu menunjukkan struktur berpori menyerupai sarang lebah, yang ditandai dengan makropori dan mesopori yang signifikan. Struktur ini disebabkan oleh komposisi alami kayu, yang mengandung saluran vaskular memanjang yang tidak hanya meningkatkan kapasitas adsorpsi tetapi juga menyediakan jalur difusi yang lebih baik. Sebaliknya, arang yang berasal dari sekam padi menunjukkan tekstur yang lebih kasar dan tidak teratur, terutama karena kandungan silika yang tinggi (Tsai & Chang, 2020). Selain itu, gambar SEM menunjukkan peningkatan makropori pada arang yang diaktivasi dibandingkan dengan arang yang tidak diaktivasi. Arang yang berasal dari limbah kayu (AK), tempurung kelapa (AB), dan sekam padi (AS) menunjukkan ukuran makropori sekitar 16,2 µm, 6,5 µm, dan 11,6 µm, berturut-turut. Sebaliknya, bahan arang karbon aktif seperti AKK, ABK, dan ASK (Gambar 2(d-f)) menunjukkan distribusi pori yang lebih seragam, dengan ukuran makropori sekitar 17,2 µm, 9,2 µm, dan 11,2 µm, berturut-turut. Aktivasi dengan NaOH menyebabkan mesopori terkikis menjadi makropori, yang meningkatkan ukuran pori keseluruhan (Cao et al., 2024; Hu et al., 2022)

Tabel 1. Karakterisasi sampel arang

Sampel arang	Zeta potensial (mV)	Sudut kontak	Spesifik area (m2/g)
AKK	+13.2	137.4°	402
AK	-16.4	128.3°	377
ASK	+11.7	112.2°	307
AS	-28.4	102.4°	221
ABK	+09.4	122.7°	288
AB	-06.6	117.2°	177



Gambar 2. Hasil analisis SEM struktur mikro sampel arang, (a) AB; (b) AS; (c) AK; (d) ABK; (e) ASK; and (f) AKK

Arang yang tidak diaktivasi menunjukkan nilai potensi zeta negatif, yang menunjukkan bahwa permukaannya sebagian besar didominasi oleh kelompok fungsional dan senyawa yang membawa muatan negatif. Fenomena ini disebabkan oleh keberadaan kelompok yang mengandung oksigen, seperti karboksilat dan hidroksil, yang biasanya tertinggal

selama proses pirolisis. Menurut Zhou et al. (2021b), kelompok fungsional yang mengandung oksigen yang ditemukan pada arang yang tidak diaktivasi berkontribusi pada muatan permukaan negatifnya.

Pengukuran sudut kontak lebih lanjut mendukung diferensiasi antara arang yang tidak diaktivasi dan yang

diaktivasi. Sampel arang yang tidak diaktivasi, seperti material AK, AS, dan AB, menunjukkan sudut kontak yang lebih tinggi, yang mengindikasikan pembentukan permukaan hidrofobik selama pirolisis. Hidrofobisitas ini merupakan hasil dari penghilangan kelompok oksigen yang mengandung polar dan pembentukan struktur aromatik. Temuan ini konsisten dengan yang ditemukan oleh Fan et al. (2021), yang menunjukkan bahwa permukaan arang menjadi hidrofobik karena kondisi pirolisis dan jenis bahan baku. Sebaliknya, bahan yang diaktivasi seperti ASK dan ABK menunjukkan sudut kontak yang lebih rendah, yang mengindikasikan peningkatan hidrofilisitas permukaan. Peningkatan hidrofilisitas ini dapat dikaitkan dengan pengenalan atau pelestarian kelompok fungsional polar selama proses aktivasi, yang meningkatkan interaksi dengan air (Dey, 2012).

Data luas permukaan spesifik memberikan wawasan lebih lanjut mengenai tren ini. Bahan arang yang tidak diaktivasi menunjukkan luas permukaan spesifik yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan arang karbon aktif, mencerminkan struktur mereka yang kurang berpori yang terbentuk selama pirolisis. Proses aktivasi secara signifikan meningkatkan reaktivitas arang, memungkinkan terbentuknya makropori yang lebih besar. Proses ini telah terbukti meningkatkan luas permukaan dan volume pori karbon aktif secara substansial (Li et al., 2023). Peningkatan ukuran pori dan luas permukaan spesifik pada arang yang diaktivasi dikaitkan dengan proses fisik dan kimia yang terjadi selama aktivasi. Misalnya, selama aktivasi kimia, reagen seperti KOH atau $ZnCl_2$ menembus matriks arang dan bereaksi dengan struktur

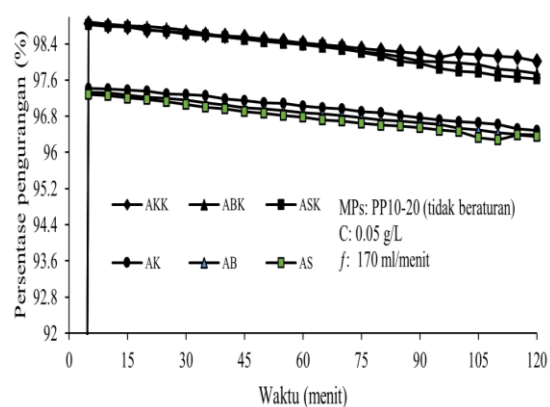
karbon (He et al., 2023). Menurut Gao et al. (2020), agen aktivasi kimia secara selektif menghilangkan komponen karbon yang kurang stabil dan mengoksidasi permukaan, yang membuka pori yang tersumbat dan menciptakan mikropori dan mesopori tambahan. Proses-proses ini menyebabkan peningkatan signifikan pada luas permukaan dan porositas arang yang diaktivasi.

Tabel 2. Karakteristik MPs

Bahan MPs	Zeta potensial (mV)	Sudut kontak
PP10-20	-27.2	122.6°
PS5-9	-32.3	119.9°
PET5	-49.8	129.4°
Ppnano	-55.1	132.2°

Efektivitas pengurangan MPs

Metode gravimetri digunakan untuk menilai kinerja setiap bahan dalam memfilter MPs PP10-20. Data dikumpulkan setiap 5 menit selama interval 2 jam, yang mewakili efisiensi filtrasi MPs PP10-20 untuk semua bahan (Gambar 3). Hasil pengukuran kinerja bahan menggunakan metode gravimetri, serta kedalaman lapisan yang dicapai oleh PP10-20 (Tabel 3).



Gambar 3. Performa sampel arang terhadap pengurangan MPs

Tabel 3. Efektifitas sampel arang dalam mengurangi MPs (PP10-20)

Sampel arang	Keberhasilan (%)	Kedalaman lapisan arang yang dapat dilalui MPs
ASK	97.78	1
AS	96.35	2.5
AKK	98.79	2
AK	96.68	2.5
ABK	97.45	2
AB	96.49	2.5

Untuk arang yang tidak diaktivasi, efisiensi penghilangan MP relatif serupa, dengan efisiensi penghilangan sekitar 96% di semua jenis. Namun, arang yang diaktivasi menunjukkan kinerja retensi yang lebih baik, dengan efisiensi penghilangan meningkat 17-22% dibandingkan dengan arang yang tidak diaktivasi. Di antara bahan-bahan yang diaktivasi, arang kayu karbon aktif (AKK) menunjukkan kinerja retensi terbaik, dengan efisiensi penghilangan MPs sebesar 98,79%, yang merupakan peningkatan signifikan dalam efisiensi penghilangan dibandingkan dengan arang yang tidak diaktivasi dan bahan aktif lainnya. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh luas permukaan spesifik AKK yang lebih tinggi dan sifat permukaan yang ditingkatkan. Tren ini menunjukkan bahwa aktivasi tidak hanya meningkatkan efisiensi penghilangan, tetapi juga mengurangi penetrasi MP ke dalam lapisan bahan, menghasilkan kedalaman yang lebih dangkal yang dicapai oleh MP dalam lapisan arang yang diaktivasi. Kedalaman lapisan yang dicapai oleh PP10-20 dalam kolom yang dimodifikasi AKK adalah 2 cm, berbeda 0.5 cm dibandingkan dengan pada bed AK. Pengamatan ini konsisten dengan temuan sebelumnya oleh (Ji et al., 2024), yang

melaporkan bahwa proses aktivasi arang meningkatkan efisiensi penghilangan MP, berkat peningkatan porositas dan perbaikan sifat kimia permukaan arang tersebut. Berdasarkan pengukuran efisiensi penghilangan MP, urutan efisiensi secara keseluruhan adalah sebagai berikut: AS < AB < AK < ASK < ABK < AKK.

Proses filtrasi yang diperpanjang menyebabkan akumulasi partikel MP pada permukaan media filter, membentuk lapisan padat yang jelas terlihat sebagai kue filter dalam kolom filtrasi. Ketebalan kue filter dipengaruhi langsung oleh kedalaman lapisan yang dicapai oleh partikel MP, dengan lapisan yang lebih tebal teramati ketika partikel mencapai kedalaman lapisan yang lebih dangkal. Misalnya, dalam sistem filtrasi yang menggunakan AKK, kue filter membentuk lapisan yang lebih tebal pada lapisan arang, dengan kedalaman lapisan sekitar 2,5 cm. Dalam hal ini, AKK menunjukkan efisiensi penghilangan MP yang sangat baik, mencapai 98,79% dan 97,12% untuk PP10-20 dan PS5-9, berturut-turut, seperti yang diukur dengan metode gravimetri. Partikel MP yang lebih besar, seperti PP10-20, cenderung terperangkap lebih dalam pada arang biasa. Namun, pada arang yang diaktivasi, partikel-partikel ini terperangkap hanya hingga kedalaman ±1,6 cm, yang menunjukkan pembentukan kue filter yang lebih padat di permukaan lapisan arang.

Bahan AKK diidentifikasi sebagai sampel optimal potensial. Selanjutnya, sampel ini menjalani uji penghilangan yang menargetkan berbagai jenis polimer, ukuran, dan bentuk MP, termasuk PS5-9, PET5, dan PPnano. Kinerja AKK dalam penghilangan MP disajikan pada Gambar 4 dan Tabel 4.

Tabel 4. Rerata efektifitas arang AKK dalam mengurangi MPs

Sampel arang	Keberhasilan (%)	Kedalaman lapisan arang yang dapat dilalui MPs
PP10-20	98.79	2
PS5-9	97.68	3
PET5	97.01	3
Ppnano	96.80	3.5

Berdasarkan data di Tabel 4, kinerja AKK dalam mengurangi berbagai jenis MPs secara konsisten menunjukkan efisiensi tinggi, meskipun ada variasi dalam ukuran, bentuk, dan jenis polimer. PS6-9 menunjukkan efisiensi penghilangan yang sedikit lebih rendah dan kedalaman bed 3 cm. Bentuk serat dan ukuran kecil dari PS5-9 memungkinkan partikel-partikel ini lebih mudah tertahan di lapisan atas bahan AKK. PET5 dan PPnano, di sisi lain, lebih efektif terperangkap dalam pori-pori menyerupai sarang lebah pada AKK. Pola ini menunjukkan bahwa ukuran dan bentuk partikel mempengaruhi kedalaman penetrasi dan efisiensi penghilangan MP. Partikel yang lebih kecil, seperti PET5 dan PPnano, cenderung tertahan di lapisan atas AKK, sementara partikel yang lebih besar, seperti PP10-20, dapat menembus lebih dalam ke dalam bed. Partikel yang lebih kecil cenderung lebih mudah berinteraksi dengan permukaan AKK dan terperangkap di dalam porinya, sementara partikel yang lebih besar mengalir melalui media hingga mereka terhalang secara fisik. Struktur permukaan berbentuk sarang lebah pada AKK, bersama dengan sifat kimianya yang teraktivasi, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kinerjanya.

Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi penghilangan mikroplastik (MPs) oleh arang aktif

terutama disebabkan oleh perubahan karakteristik permukaan, termasuk potensi zeta dan hidrofobisitas, yang dibuktikan oleh hasil karakterisasi material yang disajikan dalam Tabel 1. Proses aktivasi juga dapat memengaruhi potensi zeta, yang biasanya membuatnya lebih positif, perubahan muatan ini selanjutnya meningkatkan interaksi elektrostatis dengan partikel MPs yang bermuatan negatif (Tabel 2). Peningkatan keseluruhan dalam hidrofobisitas dan muatan permukaan positif berkontribusi pada afinitas arang yang lebih besar terhadap MPs hidrofobik, yang mengarah pada adsorpsi yang lebih kuat dan peningkatan kinerja penghilangan MPs (Kumar et al., 2023). Sebagai contoh, ketika hidrofobisitas permukaan arang meningkat akibat aktivasi, ini meningkatkan interaksi hidrofobik antara arang dan MPs hidrofobik, yang mengakibatkan ikatan yang lebih kuat antara partikel-partikel ini dengan permukaan arang. Modifikasi permukaan ini menyebabkan retensi dan adsorpsi MPs hidrofobik yang lebih baik, menjadikan sampel arang aktif sebagai material yang lebih efektif untuk penghilangan MPs. Di sisi lain, proses aktivasi mengubah potensi zeta sampel arang menjadi nilai yang lebih positif, dengan demikian meminimalkan gaya tolakan elektrostatis antara permukaan arang dan MPs, yang biasanya bermuatan negatif. Perubahan potensi zeta ini semakin meningkatkan adsorpsi MPs, terutama yang memiliki karakteristik hidrofobik. Arang yang tidak teraktivasi biasanya memiliki muatan permukaan netral hingga negatif, yang membatasi kemampuannya untuk menghilangkan MPs secara efektif karena tolakan elektrostatis, sedangkan arang yang teraktivasi, dengan potensi zeta yang lebih

positif, menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam penghilangan MPs.

Proses aktivasi arang memainkan peran penting dalam meningkatkan hidrofobisitasnya dan memperbaiki kemampuannya untuk mempertahankan MPs. Aktivasi secara signifikan meningkatkan luas permukaan spesifik dan porositas arang dengan membuka pori yang tersumbat dan menciptakan mikro- dan mesopori baru. Ini tidak hanya menyediakan lebih banyak situs aktif untuk interaksi dengan MPs tetapi juga meningkatkan kapasitas adsorpsi material secara keseluruhan. Modifikasi struktural ini berkontribusi pada peningkatan retensi, khususnya untuk MPs hidrofobik, termasuk yang memiliki bentuk tidak teratur dan ukuran lebih kecil, yang biasanya lebih sulit ditangkap oleh arang yang tidak teraktivasi. Selain itu, aktivasi meningkatkan kompatibilitas permukaan arang dengan berbagai jenis MPs. Permukaan arang karbon aktif, dengan hidrofobisitas yang meningkat, memberikan afinitas yang lebih kuat terhadap MPs hidrofobik, yang mengarah pada interaksi dan adsorpsi yang lebih baik. Peningkatan hidrofobisitas memungkinkan penangkapan MPs yang lebih efisien, khususnya yang memiliki bentuk tidak teratur, seperti partikel PP, yang sulit untuk dipertahankan oleh arang yang tidak teraktivasi. Peningkatan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa arang dengan sifat permukaan yang teroptimasi secara signifikan meningkatkan efisiensi penghilangan partikel-partikel yang sulit ditangkap (Goswami et al., 2022; Tomczyk et al., 2023). Oleh karena itu, proses aktivasi tidak hanya meningkatkan sifat fisik dan kimia dari arang tetapi juga mengoptimalkan interaksi hidrofobik dan adsorpsi dengan MPs, menjadikan arang aktif material unggul untuk aplikasi penghilangan MPs. Peningkatan luas permukaan dan hidrofobisitas, bersama

dengan struktur yang lebih berpori, memungkinkan retensi dan adsorpsi MPs yang lebih baik, sehingga meningkatkan kinerja keseluruhan dalam sistem filtrasi.

Pengaruh karakteristik MPs terhadap performa filtrasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa efisiensi penghilangan sampel MPs bervariasi secara signifikan tergantung pada faktor-faktor seperti jenis polimer, bentuk, dan distribusi ukuran. Dalam hal ukuran partikel, terlihat kecenderungan umum di mana partikel yang lebih kecil cenderung menunjukkan efisiensi penghilangan yang sedikit lebih rendah. MPs yang lebih besar, seperti PS5-9, menunjukkan efisiensi penghilangan yang lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang lebih kecil seperti PPnano. Hal ini dapat dijelaskan oleh gaya hambat yang lebih besar yang dialami oleh partikel yang lebih besar saat berinteraksi dengan struktur berpori dari media filtrasi, yang meningkatkan kemungkinan partikel-partikel tersebut terperangkap. Penelitian oleh Singh et al. (2021) lebih lanjut mendukung pengamatan ini, yang menunjukkan bahwa MPs yang lebih besar cenderung lebih mudah mengendap di filter berbasis arang, terutama ketika distribusi ukuran pori media sesuai dengan rentang ukuran partikel. Selain itu, bentuk tidak teratur dari partikel MPs memfasilitasi interaksi yang lebih kompleks dengan media filtrasi, meningkatkan kemungkinan partikel terperangkap dalam pori filter. Struktur permukaan yang kasar dan geometri asimetris dari partikel-partikel ini menghasilkan gaya hambat yang lebih besar, yang mengurangi mobilitas mereka dan meningkatkan efisiensi retensi dalam sistem filtrasi.

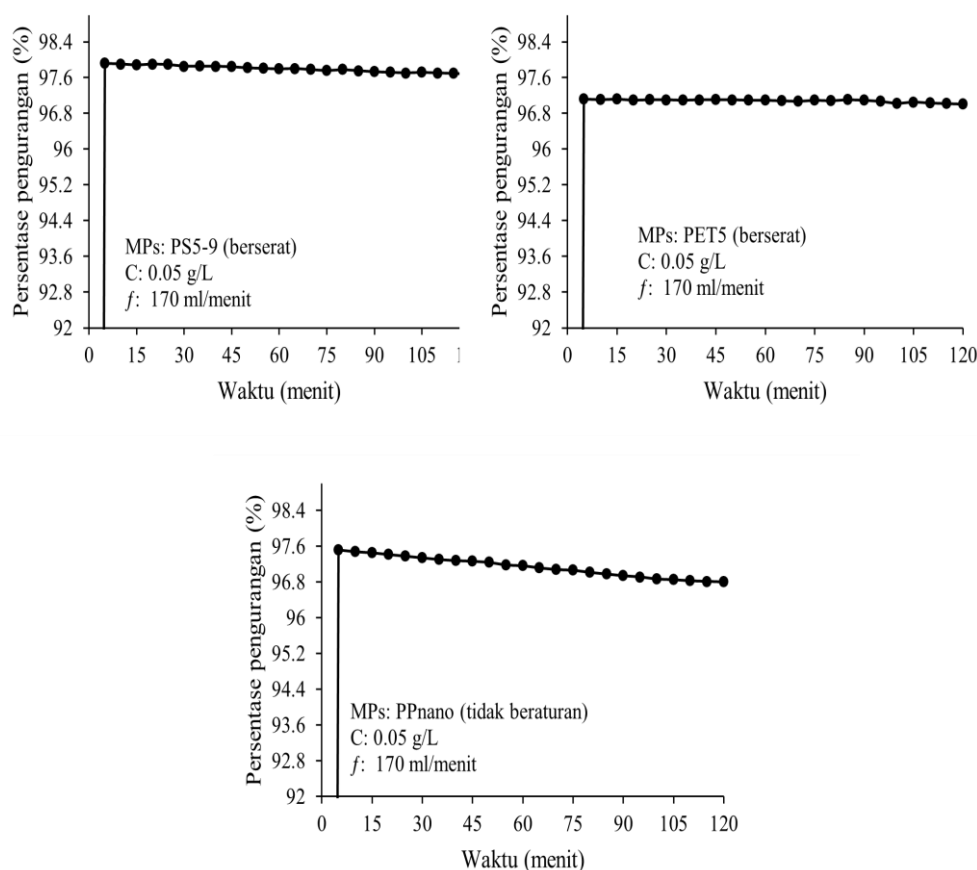
Bentuk MPs juga memainkan peran penting dalam kinerja penghilangan. Partikel berbentuk bola, seperti PS5-9, menunjukkan efisiensi penghilangan yang lebih tinggi karena pola aliran mereka yang dapat diprediksi, yang meningkatkan interaksi mereka dengan media filter. Sebaliknya, partikel berserat, seperti PET5, lebih sulit untuk dipertahankan karena struktur memanjang mereka sejajar dengan aliran air, mengurangi kemungkinan terperangkap di dalam pori arang. Partikel dengan bentuk tidak teratur seperti PPnano, meskipun ukurannya lebih kecil, menunjukkan retensi yang sedikit lebih tinggi daripada MPs berserat karena jalur aliran yang tidak terduga, yang meningkatkan kemungkinan terjebaknya secara fisik. Retensi partikel yang tidak teratur yang lebih baik dapat dijelaskan oleh permukaannya yang lebih kasar dan geometri asimetris, yang menciptakan lebih banyak titik kontak dengan media filter dan meningkatkan hambatan selama pergerakan. Sebaliknya, partikel berserat sering menunjukkan retensi yang lebih rendah karena penyelarasan mereka dengan aliran yang mengurangi area kontak mereka dengan media filter (Fakhri et al., 2024).

Jenis polimer juga memengaruhi kinerja penghilangan. MPs berbasis PS (PS5-9) mencapai efisiensi penghilangan yang lebih tinggi karena kerapatannya dan bentuknya yang seragam, yang mempromosikan interaksi yang lebih baik dengan permukaan karbon aktif AKK. Sebaliknya, MPs berbasis PET, seperti PET5, yang memiliki struktur berserat, menunjukkan efisiensi penghilangan yang sedikit lebih rendah, kemungkinan karena kecenderungan mereka untuk sejajar dengan aliran air, sehingga menghindari terjebak. MPs dengan bentuk tidak teratur dan karakteristik hidrofobik sering

menunjukkan retensi yang lebih rendah dalam sistem filtrasi konvensional. Namun, aktivasi arang secara signifikan meningkatkan kemampuannya untuk mempertahankan partikel-partikel tersebut. Akibatnya, bahkan MPs hidrofobik, termasuk yang memiliki bentuk tidak teratur seperti partikel PP, menunjukkan retensi yang lebih baik ketika melewati arang karbon aktif. Menurut Jafari et al. (2021), hidrofobisitas polimer dan muatan permukaan memainkan peran penting dalam interaksi dengan media filtrasi. Dengan peningkatan hidrofobisitas akibat aktivasi, permukaan arang menunjukkan interaksi yang lebih kuat dengan MPs hidrofobik, yang mengarah pada adsorpsi yang lebih baik meskipun ada tantangan yang ditimbulkan oleh bentuk atau kerapatan partikel. Aktivasi juga menghasilkan peningkatan potensi zeta, yang meningkatkan interaksi elektrostatis antara arang dan MPs, sehingga lebih meningkatkan retensi partikel bermuatan negatif seperti PS. Sementara partikel PP menunjukkan retensi yang lebih rendah dalam beberapa sistem filtrasi karena kerapatannya yang lebih rendah dan bentuknya yang tidak teratur, interaksi hidrofobik yang lebih baik dan kapasitas adsorpsi arang yang teraktivasi mengatasi tantangan ini, menghasilkan efisiensi retensi yang lebih baik secara keseluruhan. Secara ringkas, efisiensi penghilangan MPs dipengaruhi oleh kombinasi ukuran partikel, bentuk, jenis polimer, dan sifat media filtrasi. Partikel yang lebih besar dan berbentuk tidak teratur cenderung mencapai retensi yang lebih tinggi, sementara partikel berserat dan yang lebih kecil menunjukkan efisiensi yang lebih rendah karena mobilitasnya yang lebih tinggi. Interaksi yang lebih baik antara MPs yang hidrofobik atau bermuatan negatif dengan

AKK semakin menegaskan pentingnya pemahaman sifat partikel untuk mengoptimalkan sistem filtrasi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya,

yang menekankan peran morfologi partikel, kerapatan, dan muatan permukaan dalam menentukan kinerja filtrasi.



Gambar 4. Performa sampel arang AKK terhadap pengurangan MPs: (a) PET6-9, (b) PA5, (c) PSnano

KESIMPULAN.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas arang karbon aktif yang berasal dari limbah bahan pertanian dalam mengurangi mikroplastik dalam air irigasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa arang karbon aktif yang diaktivasi dari limbah pertanian, terutama yang berasal dari kayu (AKK), dapat menghilangkan mikroplastik dengan efisiensi yang sangat tinggi, mencapai 98,79%. Aktivasi karbon memperbaiki kapasitas adsorpsi dengan meningkatkan luas permukaan dan porositas, yang

memungkinkan penghilangan lebih efektif, terutama terhadap mikroplastik dengan ukuran lebih besar dan bentuk tidak teratur. Selain itu, arang karbon aktif yang diaktivasi menunjukkan efisiensi lebih tinggi dalam membuang mikroplastik dibandingkan dengan arang yang tidak diaktivasi, dengan perbedaan efisiensi penghilangan mencapai 17-22%. Sebagai contoh, arang kayu karbon aktif (AKK) mengungguli bahan lainnya dengan efisiensi penghilangan terbaik untuk berbagai jenis mikroplastik, termasuk yang berukuran kecil seperti

PPnano dan yang berserat seperti PS5-9. Hasil ini menggarisbawahi pentingnya proses aktivasi dalam meningkatkan kinerja filtrasi, yang tidak hanya meningkatkan jumlah mikroplastik yang dapat diadsorpsi, tetapi juga memperbaiki distribusi ukuran pori yang memudahkan penjerapan partikel mikroplastik. Penelitian ini memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dan lebih terjangkau dibandingkan karbon aktif komersial dalam mengatasi polusi mikroplastik di sistem pertanian. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi potensi penggunaan arang aktif berbasis limbah pertanian dalam skala yang lebih besar dan untuk jenis polutan lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Amirah Mohd Napi, N. n., Ibrahim, N., Adli Hanif, M., Hasan, M., Dahalan, F. A., Syafiuddin, A., & Boopathy, R. (2023). Column-based removal of high concentration microplastics in synthetic wastewater using granular activated carbon. *Bioengineered*, 14(1), 2276391. <https://doi.org/10.1080/21655979.2023.2276391>
- Bandosz, T., Biggs, M., Gubbins, K. E., Hattori, Y., Liyama, T., Kaneko, K., Pikunic, J. P., & Thomson, K. T. (2003). Molecular models of porous carbons. *Chemistry and Physics of Carbon*, 28, 41-218. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/282396963_Molecular_models_of_porous_carbons
- Béalu, Z., Walther, J., Abusafia, A., Altmann, K., Meurer, M., Gretschel, O., Schäfer, M., & Steinmetz, H. (2024). Removal of Organic Micropollutants and Microplastics via Ozonation Followed by Granular Activated Carbon Filtration. *Environments*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/environments11110241>
- Bu, H., Liu, D., Yuan, P., Zhou, X., Liu, H., & Du, P. (2019). Ethylene glycol monoethyl ether (EGME) adsorption by organic matter (OM)-clay complexes: Dependence on the OM Type. *Applied Clay Science*, 168, 340-347. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.11.026>
- Cao, B., Zheng, Y., Esakkimuthu, S., Jiang, D., Hu, Y., Yuan, C., Abomohra, A., Gong, X., & Wang, S. (2024). Catalytic pyrolysis of wood dust for monophenol over macroalgal biochar-based catalyst: Effects of activation agents and atmospheres during catalyst synthesis on its performance. *Algal Research*, 80, 103544. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103544>
- Conesa, J. A., & Ortuño, N. (2022). Reuse of Water Contaminated by Microplastics, the Effectiveness of Filtration Processes: A Review. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072432>
- Daniel, D., Vuckovac, M., Backholm, M., Latikka, M., Karyappa, R., Koh, X. Q., Timonen, J. V. I., Tomczak, N., & Ras, R. H. A. (2023). Probing surface wetting across multiple force, length and time scales. *Communications Physics*, 6(1), 152. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01268-z>
- Dey, S. (2012). Enhancement in hydrophobicity of low rank coal by surfactants — A critical overview. *Fuel Processing Technology*,

- 94(1), 151-158.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2011.10.021>
- Fakhri, V., Hamzehlouy, A., Janmaleki Dehchani, A., Moradi, E., Tavakoli Dare, M., Jafari, A., & Khonakdar, H. A. (2024). Green solutions for blue waters: Using biomaterials to purify water from microplastics and nanoplastics. *Journal of Water Process Engineering*, 65, 105854. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105854>
- Fan, M., Li, C., Sun, Y., Zhang, L., Zhang, S., & Hu, X. (2021). In situ characterization of functional groups of biochar in pyrolysis of cellulose. *Science of the Total Environment*, 799, 149354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149354>
- Franco, A. A., Arellano, J. M., Albendín, G., Rodríguez-Barroso, R., Quiroga, J. M., & Coello, M. D. (2021). Microplastic pollution in wastewater treatment plants in the city of Cádiz: Abundance, removal efficiency and presence in receiving water body. *Science of the Total Environment*, 776, 145795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145795>
- Gao, Y., Yue, Q., Gao, B., & Li, A. (2020). Insight into activated carbon from different kinds of chemical activating agents: A review. *Science of the Total Environment*, 746, 141094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141094>
- Garfansa, M. P., Bakhtiar, A., Ramadani, S. D., Zalizar, L., Husen, S., Triwanto, J., Iswahyudi, I., Lasaksi, P., & Ekalaturrahmah, Y. A. C. (2025). Microplastics in Irrigation Systems: A Growing Threat to Agriculture Soil and Crop Plant. *Environmental Quality Management*, 34(4), e70099. <https://doi.org/10.1002/tqem.70099>
- He, D., Wu, J., Yu, C., Huang, B., Tu, X., Li, D., Jia, X., Dan, J., Fang, Z., Dai, Z., Liu, R., & Zhou, Q. (2023). Synthesis of corn cob biochar with high surface area by KOH activation for VOC adsorption: effect of KOH addition method. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 98(8), 2051-2064. <https://doi.org/10.1002/jctb.7418>
- Hu, M., Wu, W., Lin, D., & Yang, K. (2022). Adsorption of fulvic acid on mesopore-rich activated carbon with high surface area. *Science of the Total Environment*, 838, 155918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155918>
- Jafari, M., Shim, E., & Joijode, A. (2021). Fabrication of Poly(lactic acid) filter media via the meltblowing process and their filtration performances: A comparative study with polypropylene meltblown. *Separation and Purification Technology*, 260, 118185. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118185>
- Ji, G., Xing, Y., & You, T. (2024). Biochar as adsorbents for environmental microplastics and nanoplastics removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 113377. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113377>
- Kumar, R., Verma, A., Rakib, M. R. J., Gupta, P. K., Sharma, P., Garg, A., Girard, P., & Aminabhavi, T. M. (2023). Adsorptive behavior of micro(nano)plastics through biochar: Co-existence, consequences, and challenges in

- contaminated ecosystems. *Science of the Total Environment*, 856, 159097.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159097>
- Lestari, K., Haeruddin, H., & Jati, O. E. (2021). Karakterisasi mikroplastik dari sedimen padang lamun, pulau panjang, jepara, dengan ft-ir infra red. *Jurnal Sains & Teknologi Lingkungan*, 13(2), 135-154.
<https://doi.org/10.20885/jstl.vol13.iss2.art5>
- Li, C., Li, Q., Jiang, Y., Shao, Y., Gao, G., Zhang, S., Xiang, J., Hu, S., Wang, Y., & Hu, X. (2023). Importance of oxidation reactions in creating pores in physical activation of biomasses. *Chemical Engineering Journal*, 474, 145748.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145748>
- Li, Z., Gao, X., Wu, L., Wang, K., & Kobayashi, N. (2017). Preparation of activated carbons from poplar wood by chemical activation with KOH. *Journal of Porous Materials*, 24(1), 193-202.
<https://doi.org/10.1007/s10934-016-0252-6>
- Muniandy, L., Adam, F., Mohamed, A. R., & Ng, E.-P. (2014). The synthesis and characterization of high purity mixed microporous/mesoporous activated carbon from rice husk using chemical activation with NaOH and KOH. *Microporous and Mesoporous Materials*, 197, 316-323.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.06.020>
- Murray, C. C., Marshall, R. E., Liu, C. J., Vatankhah, H., & Bellona, C. L. (2021). PFAS treatment with granular activated carbon and ion exchange resin: Comparing chain length, empty bed contact time, and cost. *Journal of Water Process Engineering*, 44, 102342.
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102342>
- Nakhli, S. A. A., & Imhoff, P. T. (2020). Models for Predicting Water Retention in Pyrogenic Carbon (Biochar) and Biochar-Amended Soil at Low Water Contents. *Water Resources Research*, 56(11), e2020WR027726.
<https://doi.org/10.1029/2020WR027726>
- Padervand, M., Lichtfouse, E., Robert, D., & Wang, C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(3), 807-828.
<https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- Sari, R. A., Pribadi, A., Nurmaningsih, D. R., Nengse, S., & Yustianti, Y. (2022). Design of Communal Wastewater Treatment Plant (Case Study in Depok Village, Trenggalek, East Java). *Konversi*, 11(2).
<http://dx.doi.org/10.20527/k.v11i2.13903>
- Sharma, S., Sharma, V., & Chatterjee, S. (2023). Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment - A review. *Science of the Total Environment*, 875, 162627.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162627>
- Singh, N., Khandelwal, N., Ganie, Z. A., Tiwari, E., & Darbha, G. K. (2021). Eco-friendly magnetic biochar: An effective trap for nanoplastics of varying surface functionality and size in the aqueous environment. *Chemical Engineering Journal*, 418, 129405.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129405>

- Tsai, C.-C., & Chang, Y.-F. (2020). Effects of Rice Husk Biochar on Carbon Release and Nutrient Availability in Three Cultivation Age of Greenhouse Soils. *Agronomy*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/agronomy10070990>
- Zhang, C., Ge-Zhang, S., Wang, Y., & Mu, H. (2024). A Wooden Carbon-Based Photocatalyst for Water Treatment. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(9). <https://doi.org/10.3390/ijms25094743>
- Zhang, L., Liu, J., Xie, Y., Zhong, S., & Gao, P. (2021). Occurrence and removal of microplastics from wastewater treatment plants in a typical tourist city in China. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125968. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125968>
- Zhao, Y., Mu, J., Wang, Y., Liu, Y., Wang, H., & Song, H. (2023). Preparation of hierarchical porous carbon through one-step KOH activation of coconut shell biomass for high-performance supercapacitor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 34(6), 527. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-09885-8>
- Zhou, J., Wen, Y., Marshall, M. R., Zhao, J., Gui, H., Yang, Y., Zeng, Z., Jones, D. L., & Zang, H. (2021a). Microplastics as an emerging threat to plant and soil health in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 787, 147444. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147444>
- Zhou, X., Zhu, Y., Niu, Q., Zeng, G., Lai, C., Liu, S., Huang, D., Qin, L., Liu, X., Li, B., Yi, H., Fu, Y., Li, L., Zhang, M., Zhou, C., & Liu, J. (2021b). New notion of biochar: A review on the mechanism of biochar applications in advanced oxidation processes. *Chemical Engineering Journal*, 416, 129027. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129027>