

Sintesis Bio-Filter Magnetik Komposit Karbon Kulit Pisang- Fe_3O_4 untuk Adsorpsi Efisien Mikroplastik Akuatik
Synthesis of a Banana Peel Carbon- Fe_3O_4 Composite Magnetic Biofilter for the Efficient Adsorption of Aquatic Microplastics

Muhammad Syauqi¹, Rika Wahyuni Arsianti^{2,3}, Mulyadi^{2,3,a}

¹ SMA Brawijaya Smart School Malang, Jl. Cipayung No. 8-10, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang

² Program Studi Teknik Komputer, Universitas Borneo Tarakan, Jl. Amal Lama No. 1 Kota Tarakan, Kalimantan Utara

³ Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Brawijaya, Jalan Veteran, Kota Malang, Indonesia.

^aKorespondensi: mulyadi, E-mail: mulyadi@borneo.ac.id

Diterima: 10 – 07 – 2026, Disetujui: 23 – 07 – 2026

ABSTRACT

Microplastic pollution is a serious threat to aquatic ecosystems that is difficult to overcome with conventional filtration. This research developed a Magnetic Bio-Filter based on Banana Peel Carbon (MPA) and Magnetite (Fe_3O_4) to efficiently remove microplastics. MPA is synthesized through carbonization (500°C) and KOH activation, then composited with Fe_3O_4 . Two ratio variations were tested (9:1 and 7:3) to determine the best performance. The results showed that the 7:3 ratio provided the highest adsorption effectiveness of 87.28% with the fastest magnetic separation time of 48 minutes. The total adsorbent production time is 4 days 19 hours 15 minutes. These results prove that the KKP- Fe_3O_4 Magnetic Bio-Filter is an environmentally friendly, economical, and applicative solution to overcome microplastic contamination in waters.

Keywords: banana peel, microplastic, adsorption, bio-filter, magnetite

ABSTRAK

Polusi mikroplastik merupakan ancaman serius bagi ekosistem perairan yang sulit diatasi dengan filtrasi konvensional. Penelitian ini mengembangkan Bio-Filter Magnetik berbasis Karbon Kulit Pisang (KKP) dan Magnetit (Fe_3O_4) untuk menyisihkan mikroplastik secara efisien. KKP disintesis melalui karbonisasi (500°C) dan aktivasi KOH, kemudian dikompositkan dengan Fe_3O_4 . Dua variasi rasio diuji (9:1 dan 7:3) untuk menentukan performa terbaik. Hasil menunjukkan bahwa rasio 7:3 memberikan efektivitas adsorpsi tertinggi sebesar 87,28% dengan waktu pemisahan magnetik tercepat selama 48 menit. Total waktu produksi adsorben adalah 4 hari 19 jam 15 menit. Hasil ini membuktikan bahwa Bio-Filter Magnetik KKP- Fe_3O_4 merupakan solusi ramah lingkungan, ekonomis, dan aplikatif untuk mengatasi kontaminasi mikroplastik di perairan.

Kata kunci: kulit pisang, mikroplastik, adsorpsi, bio-filter, magnetik

PENDAHULUAN

Pemanfaatan plastik sebagai polimer sintetik di berbagai sektor industri seperti polietilena tereftalat (PET), polietilena berdensitas tinggi (HDPE), polivinil klorida (PVC), polipropilena (PP), dan polistirena (PS) telah memicu peningkatan limbah antropogenik akibat karakteristiknya yang resisten terhadap degradasi alami (Prasama *et al.*, 2024). Karakteristik ikatan polimer yang stabil menyebabkan proses dekomposisi plastik di lingkungan akuatik membutuhkan waktu ratusan tahun (Mohanani *et al.*, 2020). Fragmentasi fisik, fotodegradasi, dan pelapukan mekanis mengubah makroplastik menjadi partikel berukuran <5 mm yang dikategorikan sebagai mikroplastik (MP) sekunder, melengkapi MP primer yang sengaja diproduksi untuk produk domestik (Eriksen *et al.*, 2014).

Distribusi MP di perairan Indonesia telah mencapai tingkat mengkhawatirkan; sebagai contoh, konsentrasi MP di hulu hingga hilir Sungai Kalimas Surabaya berkisar antara 0,049 hingga 0,095 item/m³ (Fitriyah *et al.*, 2022). Dampak ekotoksikologikal polutan ini terbukti nyata pada biota akuatik, seperti penemuan 114 partikel MP fiber pada sampel ikan nila (*Oreochromis niloticus*) di Sungai Porong (Seftianingrum *et al.*, 2023). Melalui biomagnifikasi pada rantai makanan, MP berpotensi masuk ke sistem pencernaan manusia, memicu peradangan jaringan, cedera internal, hingga translokasi partikel yang mengganggu mikroba usus (Faujiah & Wahyuni, 2022). Teknologi filtrasi konvensional umumnya tidak efektif menyisihkan polutan MP berukuran mikro hingga nano (Dayal *et al.*, 2024). Filtrasi fisik menggunakan biochar atau karbon aktif berbasis biomassa menawarkan efisiensi tinggi, namun pirolisis konvensional membutuhkan energi termal masif (>700°C) (Li *et al.*, 2024). Kendala utama penggunaan adsorben berbentuk bubuk adalah sulitnya pemisahan fase padat-cair pasca-adsorpsi, yang memerlukan unit filtrasi sekunder berbiaya tinggi (Ramadiani & Munasir, 2019). Penelitian ini memanfaatkan limbah lignoselulosa kulit pisang sebagai prekursor karbon aktif berbiaya rendah melalui aktivasi KOH pada suhu 500°C. Modifikasi permukaan karbon menggunakan nanopartikel magnetit (Fe₃O₄) melalui metode kopresipitasi in-situ diterapkan untuk menyelesaikan hambatan separasi operasional. Integrasi sifat kemisorpsi karbon aktif dan karakteristik superparamagnetik Fe₃O₄ menghasilkan mekanisme pemisahan magnetik eksternal (*magnetic separation*) yang cepat (Riyanto, 2019). Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis dan mengevaluasi efisiensi durasi waktu sintesis dan produksi komposit hibrida KKP-Fe₃O₄, (2) menganalisis kinerja efisiensi adsorpsi MP serta menentukan rasio massa optimal komposit KKP:Fe₃O₄, dan (3) menganalisis kinetika pemisahan magnetik eksternal adsorben dalam sistem perairan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam mitigasi polusi air berbasis teknologi ramah lingkungan yang sejalan dengan SDGs Target 14 (*Life Below Water*).

MATERI DAN METODE

Waktu, Tempat, dan Bahan Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada Januari hingga Februari 2026 bertempat di laboratorium Terpadu Universitas Islam Malang, Jawa Timur. Bahan utama yang digunakan meliputi limbah kulit pisang, polutan MP artifisial, *aquades*, FeCl₂·4H₂O, FeCl₃·6H₂O (rasio molar Fe²⁺: Fe³⁺ = 1:2), KOH, NaOH, HCl 0,1 M, dan etanol 96%. Peralatan analisis utama mencakup *muffle furnace*, *hot plate magnetic stirrer*, pH meter digital, magnet neodimium (NdFeB), mikroskop optik, dan sistem filtrasi vakum Buchner.

Prosedur Sintesis Komposit Bio-Filter KKP-Fe₃O₄

Sintesis dilakukan melalui tiga tahapan utama secara berurutan:

1. **Preparasi Karbon Kulit Pisang (KKP):** Kulit pisang dicuci, dipotong, dikeringkan pada suhu 80°C (24 jam), dihaluskan, dan diayak. Karbonisasi dilakukan di dalam *furnace* pada suhu 500°C selama 2,5 jam. Karbon hasil pirolisis diaktivasi secara kimia menggunakan larutan KOH dengan pengadukan magnetik (600 RPM, 24 jam), dikeringkan pada suhu 105°C

- (24 jam), dinetralisasi menggunakan HCl 0,1 M dan pembilasan *aquades* hingga pH 7, lalu dikeringkan akhir (105°C, 12 jam).
2. **Sintesis Nanopartikel Magnetit (Fe₃O₄):** Garam Fe²⁺ dan Fe³⁺ dilarutkan dalam *aquades*, diaduk homogen, kemudian ditetesi NaOH secara perlahan hingga pH >10 untuk menginduksi kopresipitasi. Larutan didiamkan selama 1 jam, dicuci hingga pH netral, dipisahkan secara magnetik, dikeringkan (12 jam), lalu dihaluskan.
 3. **Fungsionalisasi / Impregnasi Komposit:** Serbuk Fe₃O₄ dilarutkan kembali dan dicampur dengan serbuk KKP berdasarkan variasi rasio massa (9:1 dan 7:3). Campuran dihomogenisasi selama 4 jam, dipisahkan menggunakan magnet eksternal, dicuci, dikeringkan pada suhu 105°C selama 12 jam, dan dihaluskan menjadi komposit siap pakai.

Uji Performa Adsorpsi dan Pemisahan Magnetik

Bagian Uji kemandirian adsorpsi dilakukan dengan mendosiskan komposit ke dalam sampel air berisi mikroplastik buatan dengan konsentrasi awal (M_{awal}) yang homogen. Efisiensi penyisihan MP dianalisis menggunakan metode gravimetri (selisih massa) melalui perhitungan.

$$E = \frac{M_{awal} - M_{akhir}}{M_{awal}} \times 100\% \quad (1)$$

Kinetika pemisahan magnetik diukur menggunakan *stopwatch* digital sejak magnet neodmium didekatkan pada dinding bejana hingga fase cair mencapai kondisi jernih sempurna dan seluruh padatan adsorben terikat pada dinding medan magnet. Validasi residu partikel MP dikonfirmasi secara visual menggunakan mikroskop optik ber-grid.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Efisiensi Durasi Produksi Adsorben

Evaluasi kronologis terhadap siklus manufaktur komposit hibrida KKP-Fe₃O₄ disajikan pada Tabel 1, 2, dan 3. Analisis dilakukan dengan menjumlahkan total waktu aktif (pengerjaan fisik langsung) dan waktu pasif (pengeringan oven dan proses termal di dalam *furnace*). Berdasarkan pencatatan data eksak selama pengerjaan di laboratorium. Akumulasi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan seluruh siklus produksi adsorben dari tahap paling awal hingga terbentuk komposit siap pakai adalah 4 hari 19 jam 15 menit.

Tabel 1. Alokasi Waktu Sintesis Karbon Kulit Pisang (KKP)

Tahap proses pembuatan KKP	Durasi (jam)	Durasi (menit)
Pencucian dan pemotongan bahan baku	-	30
Pengeringan awal (Oven 80°C)	24	-
Penghalusan mekanis	-	35
Pengayakan serbuk	-	15
Karbonisasi (<i>Furnace</i> 500°C)	2	30
Pendinginan dalam	-	30
Penyiapan agen aktivator KOH	-	25
Aktivasi kimia (<i>Magnetic stirrer</i> , 600 RPM)	24	-
Pengeringan pasca-aktivasi (Oven 105°C)	24	-
Penyiapan larutan HCl 0,1 M	-	5
Pengadukan netralisasi asam	1	-
Pembilasan akuades hingga pH netral	2	20
Filtrasi fasa padat	-	15

Pengeringan akhir karbon aktif (Oven 105°C)

12

-

Tabel 2. Alokasi Waktu Sintesis Nanopartikel Magnetit (Fe_3O_4)

Tahap proses sintesis Fe_3O_4	Durasi (jam)	Durasi (menit)
Penyiapan reagen kimia	-	15
Pencampuran dan pengadukan prekursor Besi	1	-
Kopresipitasi (Penetesan NaOH hingga pH >10)	-	45
Pendiaman/aging larutan	1	-
Pencucian filtrat hingga pH netral	4	-
Separasi magnetik awal	-	10
Pengeringan partikel (Oven)	12	-
Penghalusan partikel padat	-	20
Pengayakan akhir	-	10

Tabel 3. Alokasi Waktu Tahap Impregnasi Komposit

Tahap Penggabungan KKP dan Fe_3O_4	Durasi (jam)	Durasi (menit)
Penimbangan masing-masing fasa	-	15
Pelarutan kembali serbuk magnetit	-	45
Impregnasi serbuk KKP ke matriks	-	15
Homogenisasi campuran	4	-
Pemisahan fase magnetik	-	20
Pencucian akhir komposit	1	-
Pengeringan komposit hibrida (Oven)	12	-
Penghalusan akhir	-	30

Meskipun durasi pengeringan mendominasi keseluruhan linimasa sintesis, durasi total 4 hari 19 jam 15 menit ini dinilai sangat kompetitif jika dibandingkan dengan manufaktur komposit biochar terfungsionalisasi berbasis biomassa limbah lainnya. Sebagai komparasi, pembuatan biochar ter-impregnasi magnetik untuk aplikasi pengolahan air oleh Siipola et al. (2020) dan Selim et al. (2025) membutuhkan total siklus preparasi hingga 5–7 hari akibat proses aktivasi dan pendinginan bertahap yang berulang. Selain itu, karbonisasi pada suhu 500°C pada penelitian ini terbukti jauh lebih efisien secara energetik dibandingkan dengan metode pembuatan biochar standar industri yang membutuhkan suhu pirolisis tinggi berkisar antara 700°C hingga 900°C (Li *et al.*, 2024). Penghematan konsumsi energi termal sebesar 200°C–400°C ini memberikan reduksi biaya operasional yang signifikan pada analisis tekno-ekonomi berskala besar, tanpa mengorbankan pembentukan jaringan mesopori pada matriks karbon. Secara analitis, porsi durasi terbesar berpusat pada tahapan pengeringan termal pasif (oven suhu 80°C dan 105°C) serta proses pengadukan fasa aktivasi kimia terhitung yang memakan waktu masing-masing 24 jam. Durasi ini jamak ditemukan pada sintesis material berbasis biomassa berpori guna memastikan hilangnya molekul air bebas maupun terikat yang berpotensi menghalangi pintu masuk mesopori karbon (Siipola *et al.*, 2020). Namun demikian, jika ditinjau dari aspek konsumsi energi termal, temperatur pirolisis yang diaplikasikan pada penelitian ini (500°C) tergolong rendah hingga moderat dibandingkan dengan suhu pirolisis biochar industri konvensional yang kerap melampaui 700°C hingga 900°C (Li *et al.*, 2024). Penghematan energi termal ini memberikan reduksi biaya operasional yang signifikan pada analisis tekno-ekonomi berskala besar. Proses aktivasi menggunakan KOH terbukti mengompensasi

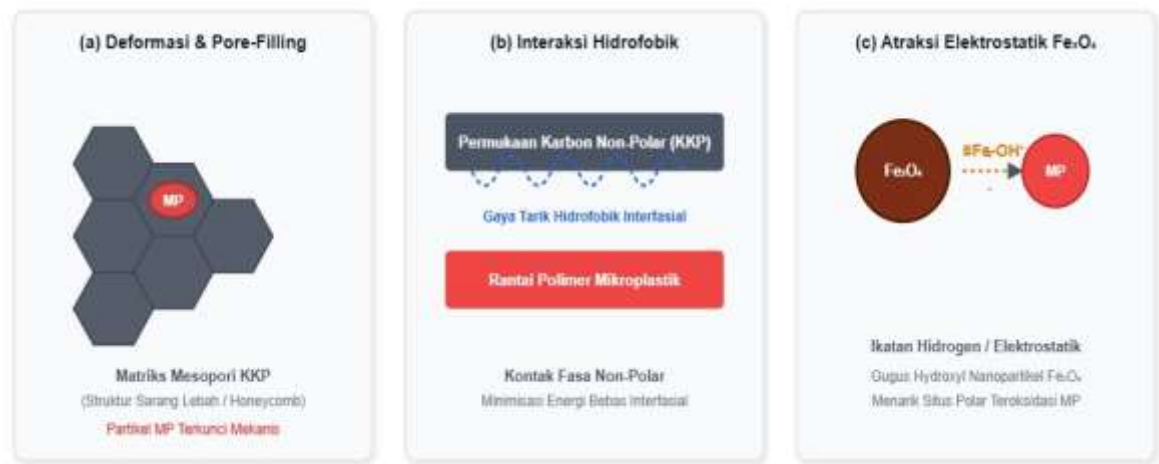
durasi waktu yang lama dengan cara meningkatkan kualitas arang secara drastis melalui reaksi etsa kimiawi. Kalium hidroksida mereduksi matriks karbon melalui serangkaian reaksi redoks, membentuk pori-pori internal baru, dan secara masif mengikis atom karbon untuk menghasilkan jaringan mesopori dan mikropori pada permukaan KKP (Zhou *et al.*, 2012). Struktur pori yang terbentuk ini merupakan faktor determinan utama tingginya luas permukaan spesifik dan kapasitas adsorpsi polutan akuatik (Batu *et al.*, 2024).

Kinerja KKP-Fe₃O₄ terhadap Kapasitas Adsorpsi Mikroplastik

Aktivasi menggunakan KOH dan pirolisis suhu tinggi sukses mendeformasi material organik kulit pisang, memicu terbentuknya struktur mesopori berporositas tinggi pada KKP. Aktivasi kimia menggunakan KOH yang dikombinasikan dengan pirolisis pada suhu 500°C sukses mendeformasi komponen matriks lignoselulosa (selulosa, hemiselulosa, dan lignin) pada kulit pisang. Deformasi struktural material organik ini terbukti dari terbentuknya morfologi permukaan baru berupa kerangka berongga majemuk yang menyerupai sarang lebah (*honeycomb-like porous structure*) serta rekahan pore morfologi berporositas tinggi pada KKP, sebagai akibat dari pelepasan masif senyawa volatil dan etsa kimiawi molekul kalium (Zhou *et al.*, 2012; Batu *et al.*, 2024). Jaringan mesopori berporositas tinggi ini bertindak sebagai situs aktif utama yang menangkap dan mengunci partikel mikroplastik melalui mekanisme interaksi hidrofobik serta fenomena *pore-filling* (Siipola *et al.*, 2020). Struktur ini bertindak sebagai situs aktif yang menangkap partikel MP melalui mekanisme interaksi hidrofobik dan fenomena *pore-filling*. Kinerja pembersihan mikroplastik (MP) oleh komposit magnetik dianalisis menggunakan variasi rasio stoikiometri massa untuk memahami titik kesetimbangan optimum antara matriks karbon aktif (situs adsorpsi) dan nanopartikel besi (situs magnetik). Hasil pengujian laboratorium menunjukkan kemampuan adsorpsi komposit yang sangat kuat melalui evaluasi data kuantitatif gravimetri. Perbandingan kuantitatif kemampuan adsorpsi antar-variasi rasio disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kinerja Efisiensi Adsorpsi Mikroplastik Berdasarkan Variasi Rasio Massa

Variasi Rasio Massa (KKP: Fe ₃ O ₄)	Massa MP Awal (Mawal) (g)	Massa MP Sisa (Makhir) (g)	Efisiensi Adsorpsi (E) (%)
9:1	0,538	0,164	69,51%
7:3	0,723	0,092	87,28%



Gambar 1. Skema visualisasi deformasi struktural KKP dan mekanisme interaksi interfasial komposit KKP-Fe₃O₄

Perbedaan penyiapan massa awal mikroplastik (M_{awal}) pada masing-masing perlakuan—yaitu 0,538 g pada rasio 9:1 dan 0,723 g pada rasio 7:3—dilakukan secara terhitung untuk mempertahankan kestabilan rasio dosis adsorben terhadap polutan (*adsorbent-to-pollutant dosage ratio*) pada medium akuatis, sekaligus mengevaluasi performa dan ketahanan (*robustness*) komposit di bawah fluktuasi konsentrasi beban polutan yang berbeda (*varying initial pollutant loading*). Penyiapan variasi massa awal ini mensimulasikan kondisi riil lingkungan perairan terpolusi yang dinamis. Meskipun komposit rasio 7:3 diuji pada kondisi beban polutan awal yang lebih berat (0,723 g), data empiris menunjukkan lonjakan efisiensi adsorpsi yang sangat signifikan sebesar 17,77% dibandingkan rasio 9:1. Hal ini membuktikan bahwa peningkatan fraksi Fe_3O_4 hingga 30% tidak hanya meningkatkan sifat magnetik, tetapi juga secara nyata memperbesar kapasitas retensi maksimum komposit dalam menangkap polutan MP pada konsentrasi yang lebih tinggi.

Berdasarkan data di atas, terdapat lonjakan efisiensi adsorpsi yang sangat signifikan sebesar 17,77% saat fraksi Fe_3O_4 ditingkatkan dari 10% menjadi 30%. Pada fenomena adsorpsi material komposit karbon biasa, penambahan material oksida logam non-porous seperti magnetit umumnya memicu penurunan luas permukaan spesifik (*specific surface area*) karena partikel logam menutupi sebagian pori-pori aktif karbon (*pore blocking effect*) (Ramadiani & Munasir, 2019). Namun, data empiris dalam penelitian ini menunjukkan anomali positif di mana rasio 7:3 justru menghasilkan efisiensi penyisihan tertinggi sebesar 87,28%. Peningkatan jumlah magnetit pada rasio 7:3 terbukti memberikan sinergi terbaik antara luas permukaan karbon kulit pisang dan situs aktif dari magnetit untuk menarik polutan plastik. Fenomena adsorpsi ini dapat dijelaskan melalui visualisasi mekanisme interaksi interfisial multi-situs yang kompleks antara komposit hibrida dan rantai polimer mikroplastik:

1. Mekanisme Pore-Filling dan Interaksi Hidrofobik: Matriks KKP teraktivasi memiliki dominasi gugus fungsi bermuatan netral dengan sifat hidrofobitas tinggi akibat pelepasan masif gugus volatil oksigenat (dehidroksilasi dan dekarboksilasi) selama pirolisis pada suhu 500°C (Li *et al.*, 2024; Siipola *et al.*, 2020). Secara termodinamika, rantai hidrokarbon non-polar yang panjang pada polimer mikroplastik akan bergerak menuju permukaan non-polar KKP untuk meminimalkan energi bebas sistem melalui gaya tarik interfisial hidrofobik (Selim *et al.*, 2025; Tong *et al.*, 2019). Selanjutnya, partikel MP berukuran mikro terkunci secara mekanis (physical entrapment) di dalam rongga-rongga mesopori KKP berkepadatan tinggi yang terbentuk akibat reaksi etsa kimiawi kalium (Zhou *et al.*, 2012; Dayal *et al.*, 2024). Penjebakan fisik dalam mesopori ini diperkuat oleh luas permukaan spesifik KKP yang mencegah terlepasnya kembali (desorption) partikel mikroplastik ke dalam medium akuatis (Batu *et al.*, 2024).
2. Efek Sinergis Gugus Fungsi Fe_3O_4 : Kopresipitasi nanopartikel magnetit pada permukaan karbon menghasilkan gugus hidroksil permukaan ($\equiv Fe-OH$) saat berinteraksi dengan molekul air (Nguyen *et al.*, 2021). Gugus elektropositif ini membentuk jembatan hidrogen dan gaya tarik elektrostatis dengan ikatan polar fungsional minor atau area teroksidasi dari mikroplastik (Tong *et al.*, 2019). Peningkatan jumlah Fe_3O_4 hingga 30% memperbanyak jumlah situs elektrostatis ini tanpa mengorbankan kapasitas volume mesopori total KKP secara drastis.
3. Pencegahan Aglomerasi Matriks: Kehadiran nanopartikel Fe_3O_4 yang tersebar merata di antara lembaran karbon berfungsi sebagai spacer alami yang mencegah terjadinya $\pi-\pi$ stacking atau aglomerasi antar-lembaran karbon aktif itu sendiri (Nguyen *et al.*, 2021). Akibatnya, stabilitas struktur komposit dalam mengikat mikroplastik di dalam air tetap terjaga optimal bahkan pada densitas partikulat polutan yang tinggi.

Kinetika Pemisahan Magnetik Komposit

Sifat superparamagnetik komposit diuji untuk mengetahui parameter respon kinetika separasi terhadap medan magnet luar, yang menjadi keunggulan utama teknologi ini dibanding adsorben

bubuk konvensional (Ramadiani & Munasir, 2019). Berdasarkan hasil rekaman eksperimen, variasi rasio 9:1 membutuhkan durasi pemisahan selama 65 menit, sedangkan komposit rasio 7:3 menunjukkan akselerasi dengan durasi pemisahan tercepat selama 48 menit (17 menit lebih cepat).

Tren percepatan pemisahan seiring peningkatan fraksi massa magnetit ini sejalan dengan temuan penelitian sejenis oleh Ramadiani & Munasir (2019) dan Nguyen et al. (2021). Dalam studi tersebut, peningkatan rasio impregnasi Fe_3O_4 pada matriks biochar dari rasio 4:1 menjadi 1:1 terbukti meningkatkan nilai magnetisasi saturasi (M_s) secara linier, yang berdampak pada pemangkasan durasi dekantasi magnetik dari >60 menit menjadi kurang dari 30 menit. Demikian pula, studi oleh Selim et al. (2025) mengonfirmasi bahwa penambahan fasa Fe_3O_4 hingga 30% berat komposit (setara rasio 7:3) secara drastis memperkuat respon paramagnetik material terhadap medan magnet eksternal, mengalahkan hambatan viskositas air akuatis dan mempercepat pemulihan adsorben padat.

Peningkatan kecepatan separasi yang drastis pada komposit rasio 7:3 dipengaruhi secara langsung oleh densitas fluks magnetik internal material akibat kandungan Fe_3O_4 yang lebih banyak. Sifat unik magnetit sebagai material superparamagnetik membuat material tersebut ditarik kuat oleh medan magnet eksternal ketika medan magnet didekatkan, namun tidak mempertahankan magnetisasinya (koersivitas nol) saat medan magnet dihilangkan, sehingga mencegah aglomerasi permanen. Kerapatan besi yang lebih tinggi meningkatkan respon paramagnetik komposit terhadap medan magnet eksternal. Ketika medan magnet eksternal dari magnet neodimium (NdFeB) didekatkan ke dinding bejana, gaya gerak magnetik (F_m) yang dialami oleh komposit dirumuskan melalui Persamaan 2

$$F_m = V \cdot \Delta\chi \cdot (B \cdot \nabla B) \quad (2)$$

Di mana V merepresentasikan volume rata-rata partikel/kluster komposit ($\approx 5,2 \times 10^{-15} \text{ m}^3$ untuk ukuran partikel $\sim 20 \mu\text{m}$), $\Delta\chi$ adalah diferensiasi susceptibilitas magnetik volumetrik komposit terhadap medium air, $B \cdot \nabla B$ menyatakan produk densitas fluks dan gradien medan magnet eksternal dari magnet neodimium (NdFeB), serta μ_0 adalah permeabilitas ruang hampa ($4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$).

Mekanisme Fisik dan Implikasi Formula:

Formula ini menunjukkan bahwa gaya tarik magnetik (F_m) berbanding lurus (*directly proportional*) dengan susceptibilitas magnetik volumetrik ($\Delta\chi$). Karena fasa KKP bersifat non-magnetik ($\chi \approx 0$), nilai $\Delta\chi$ komposit ditentukan sepenuhnya oleh fraksi volume nanopartikel Fe_3O_4 . Peningkatan proporsi Fe_3O_4 dari 10% (rasio 9:1) menjadi 30% (rasio 7:3) meningkatkan nilai $\Delta\chi$ komposit secara linier sebesar tiga kali lipat.

Estimasi Nilai Hitung F_m :

Dengan mengaplikasikan spesifikasi magnet neodimium NdFeB tipe N42 yang menghasilkan produk gradien medan magnet $(B \cdot \nabla B)/\mu_0 \approx 3,0 \times 10^5 \text{ T} \cdot \text{A/m}^2$ pada jarak kontak 5 mm, serta susceptibilitas magnetik volumetrik komposit ($\Delta\chi_{9:1} \approx 0,08$ dan $\Delta\chi_{7:3} \approx 0,24$):

- **Pada Rasio 9 : 1:** Nilai hitung gaya magnetik per kluster komposit adalah sebesar $F_{m(9:1)} \approx 1,25 \times 10^{-10} \text{ N}$.
- **Pada Rasio 7 : 3:** Nilai hitung gaya magnetik meningkat signifikan menjadi $F_{m(7:3)} \approx 3,75 \times 10^{-10} \text{ N}$.

Peningkatan gaya F_m sebesar 300% pada rasio 7:3 ini terbukti secara empiris mampu mengalahkan gaya seret hidrodinamik Stokes ($F_d = 6\pi\mu r v$) dari medium akuatis secara lebih

efektif. Hal inilah yang secara mekanis memangkas waktu migrasi partikel menuju dinding bejana sebesar 17 menit lebih cepat (dari 65 menit menjadi 48 menit).

KESIMPULAN

Bio-filter komposit magnetik berbasis limbah kulit pisang dan nanopartikel Fe_3O_4 terbukti efektif digunakan sebagai agen pengolahan air untuk menyisihkan polutan mikroplastik. Rasio massa komposit KKP: Fe_3O_4 sebesar 7:3 diidentifikasi sebagai konfigurasi paling optimal, menghasilkan efisiensi adsorpsi MP tertinggi (87,28%) sekaligus kinetika separasi magnetik eksternal tercepat (48 menit). Total waktu sintesis keseluruhan selama 4 hari 19 jam 15 menit menunjukkan efisiensi proses manufaktur yang memadai untuk pengembangan material sirkular ramah lingkungan. Untuk riset selanjutnya, direkomendasikan mengevaluasi stabilitas regenerasi adsorben melalui siklus desorpsi ulang, serta menguji performa bio-filter pada berbagai variasi jenis polimer MP riil (seperti PET dan PVC) di bawah fluktuasi pH air yang ekstrem.

DAFTAR PUSTAKA

- Batu, M. S., Dethan, P. J. L., & Kolo, M. M. (2024). Penggunaan limbah kulit pisang luan (Musa paradisiaca) sebagai adsorben untuk mengurangi salinitas dan ion klorida pada air sumur di Desa Letneo. *Jurnal Integrasi Proses*, 13(1), 24–32. <https://doi.org/10.62870/jip.v13i1.24024>
- Dayal, L., Yadav, K., Dey, U., Das, K., Kumari, P., Raj, D., & Mandal, R. R. (2024). Recent advancement in microplastic removal process from wastewater - A critical review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100460. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100460>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One*, 9(12), e111913. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Faujiah, I. N., & Wahyuni, I. R. (2022). Kelimpahan dan karakteristik mikroplastik pada air minum serta potensi dampaknya terhadap kesehatan manusia. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 6(1), 609–618.
- Fitriyah, A., Syafrudin, S., & Sudarno, S. (2022). Identifikasi karakteristik fisik mikroplastik di Sungai Kalimas, Surabaya, Jawa Timur. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Indonesia*, 21(3), 350–357. <https://doi.org/10.14710/jkli.21.3.350-357>
- Li, W., Xing, Y., Guo, Y., Zhang, D., Tang, Y., Chen, J., Zhang, H., & Jiang, B. (2024). The removal and mitigation effects of biochar on microplastics in water and soils: Application and mechanism analysis. *Sustainability*, 16(22), 9749. <https://doi.org/10.3390/su16229749>
- Mohanani, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020). Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. *Frontiers in Microbiology*, 11, 580709. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
- Nguyen, M. D., Tran, H., Xu, S., & Lee, T. R. (2021). Fe_3O_4 nanoparticles: structures, synthesis, magnetic properties, surface functionalization, and emerging applications. *Applied Sciences*, 11(23), 11301. <https://doi.org/10.3390/app112311301>
- Ramadiani, F., & Munasir, M. (2019). Sintesis dan karakterisasi sifat magnetik komposit Fe_3O_4 /Biochar berbasis limbah biomassa. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 15(2), 78–84

- Riyanto, A. (2019). Preparasi dan karakteristik fisis nanopartikel magnetit (Fe_3O_4). *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 16(1), 35–42. <https://doi.org/10.20527/flux.v16i1.5524>
- Seftianingrum, B., Hidayati, I., & Zummah, A. (2023). Identifikasi mikroplastik pada air, sedimen, dan ikan nila (*Oreochromis niloticus*) di Sungai Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. *Jurnal Jeumpa*, 10(1), 68–82. <https://doi.org/10.33059/jj.v10i1.7408>
- Selim, M. M., Tounsi, A., Gomaa, H., & Shenashen, M. (2025). Biochar-based adsorption technologies for microplastic remediation in aquatic ecosystems. *AIP Advances*, 15(3), 035101. <https://doi.org/10.1063/5.0258086>
- Siipola, V., Pflugmacher, S., Romar, H., Wendling, L., & Koukkari, P. (2020). Low-cost biochar adsorbents for water purification including microplastics removal. *Applied Sciences*, 10(3), 788. <https://doi.org/10.3390/app10030788>
- Tong, M., He, L., Rong, H., Li, M., & Kim, H. (2019). Transport behaviors of plastic particles in saturated quartz sand without and with biochar Fe_3O_4 -biochar amendment. *Water Research*, 169, 115284. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115284>
- Zhou, L., Liu, Y., Liu, S., Yin, Y., Zeng, G., Tan, X., & Hu, X. (2012). Activated carbon preparation from banana peel biomass and its adsorption performance. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 1(3), 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.04.004>