

Modifikasi Fe_3O_4 dari Pasir Besi Pantai dengan Asam Oleat dan PEG melalui Metode co-Precipitation untuk Menangani Limbah Mikroplastik PET di Air Laut

Zuhriah Mumtazah^{1*}, Syekh Maulana Bima Suci¹, Rizki Maulana Hakiki¹, Maktum Muharja², Bakti Palupi¹, Istiqomah Rahmawati¹, Ditta Kharisma Yolanda Putri¹, dan Ifan Ramadana¹

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, Indonesia; e-mail: zuhriahmumtazah11@gmail.com

²Department of Chemical Engineering, Faculty of Industrial Technology and System Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

ABSTRAK

Mikroplastik diartikan sebagai plastik yang berukuran kurang dari 5 mm. Mikroplastik telah terdeteksi secara luas di lingkungan perairan dan menjadi kontaminan yang sangat mengkhawatirkan. Oleh karena itu sangat diperlukan cara untuk menghilangkan mikroplastik dari air secara efektif. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh penambahan surfaktan asam oleat (OA) dan polietilen glikol (PEG) pada nanopartikel magnetit untuk pemisahan mikroplastik *polyethylene terephthalate* (PET) di media air. Penambahan surfaktan memungkinkan nanopartikel dapat terdispersi dengan baik dan lebih stabil. Nanopartikel magnetit disintesis dari pasir besi pantai Watu Ulo Jember dengan metode co-precipitation. Nanopartikel magnetit dikarakterisasi menggunakan PSA untuk mengetahui distribusi ukuran partikel dan FTIR untuk menentukan gugus fungsi pada n- Fe_3O_4 yang telah dimodifikasi dengan OA dan PEG. Ukuran partikel yang didapatkan berkisar antara 458,7–955,4 nm dengan intensitas tertinggi 712,4 nm. Efisiensi adsorpsi mikroplastik yang diperoleh menggunakan n- Fe_3O_4 adalah 77,8%, n- Fe_3O_4 /PEG 91,7%, dan n- Fe_3O_4 /OA 95,2%.

Kata kunci: Mikroplastik, Magnetit, Nanopartikel, Pasir Besi, Surfaktan

ABSTRACT

Microplastics are defined as plastics measuring less than 5 mm. Microplastics have been widely detected in aquatic environments and have become a worrying contaminant. Therefore, a way to effectively remove microplastics from water is urgently needed. The purpose of this study was to determine the effect of adding oleic acid (OA) and polyethylene glycol (PEG) surfactants to magnetite nanoparticles for the separation of polyethylene terephthalate (PET) microplastics in water media. The addition of surfactants allows nanoparticles to be dispersed well and more stable. Using the co-precipitation method, magnetite nanoparticles were synthesized from Watu Ulo Jember beach iron sand. Magnetite nanoparticles were characterized using PSA to determine the particle size distribution and FTIR to determine functional groups in n- Fe_3O_4 that had been modified with OA and PEG. The particle sizes obtained ranged from 458.7–955.4 nm, with the highest intensity of 712.4 nm. The adsorption efficiency of microplastics obtained using n- Fe_3O_4 (bare magnetite) was 77.8%, n- Fe_3O_4 /PEG 91.7%, and n- Fe_3O_4 /OA 95.2%.

Keywords: Microplastics, Magnetite, Nanoparticle, Iron Sand, Surfactants

Citation: Mumtazah, Z., Suci, S. M. B., Hakiki, R. M., Muharja, M., Palupi, B., Rachmawati, I., Putri, D. K. Y., dan Ramadana, I. (2025). Modifikasi Fe_3O_4 dari Pasir Besi Pantai dengan Asam Oleat dan PEG melalui Metode co-Precipitation untuk Menangani Limbah Mikroplastik PET di Air Laut. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(2), 418-426, doi:10.14710/jil.23.2.418-426

1. PENDAHULUAN

Mikroplastik didefinisikan sebagai partikel plastik dengan ukuran kurang dari 5 mm (Cheng et al., 2021). Saat ini, mikroplastik telah ditemukan di hampir semua titik pemantauan di seluruh dunia, terutama di perairan. Lebih dari 1000 sungai berkontribusi terhadap 80% emisi plastik global yang berakhir di

laut, dengan perkiraan sekitar 8 juta ton plastik masuk ke laut setiap tahun, di mana sebagian besar adalah mikroplastik (Budhiraja et al., 2022; Hossain et al., 2019; Meijer et al., 2021; Misra et al., 2020). Salah satu jenis mikroplastik yang paling banyak ditemukan adalah *Polyethylene terephthalate* (PET) karena tingginya produksi PET dan rendahnya tingkat daur

ulang (Plohl et al., 2022). Pembentukan mikroplastik ini disebabkan oleh paparan radiasi sinar UV dan pengaruh fisik (Cheng et al., 2021). Risiko kontaminasi mikroplastik terhadap kesehatan manusia semakin diperhatikan, dengan mikroplastik telah ditemukan dalam air minum, tinja manusia, dan plasenta bayi (Kirstein et al., 2021; Ragusa et al., 2021; Schwabl et al., 2019). Mengingat dampak negatif ini, sangat penting untuk mengembangkan teknologi yang efektif dalam mengurangi mikroplastik dari lingkungan perairan.

Berbagai metode telah diusulkan untuk pemisahan mikroplastik dari media air, termasuk flokulasi/koagulasi, sedimentasi, filtrasi, dan degradasi mikroba. Namun, metode-metode ini memiliki kelemahan, seperti efisiensi pemisahan mikroplastik yang rendah, biaya tinggi, waktu pemrosesan yang lama, serta potensi menghasilkan polutan sekunder (Gao et al., 2022; Gies et al., 2018; Ma et al., 2019; Talvitie et al., 2017; Yang et al., 2019). Saat ini, metode adsorpsi telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan karena kelebihan seperti kemudahan operasional, kecepatan, efisiensi tinggi, biaya rendah, dan kemampuan untuk digunakan kembali (Wang et al., 2021). Selain itu, penggunaan nanopartikel magnetik telah diusulkan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan, karena mikroplastik yang teradsorpsi pada nanopartikel magnetik dapat dengan mudah dipisahkan dari air menggunakan medan magnet (Alshammari et al., 2023; Gao et al., 2022; Marciello et al., 2016; Masuku et al., 2021).

Beberapa penelitian sebelumnya telah mencoba memisahkan mikroplastik PET menggunakan n-Fe₃O₄. Penelitian yang dilakukan X. Shi et al. (2022) menemukan bahwa penggunaan n-Fe₃O₄ tanpa modifikasi surfaktan memiliki efisiensi yang rendah karena densitas tinggi dan hidrofobisitas rendah, yang menyebabkan aglomerasi dan ketidakstabilan nanopartikel. Sedangkan penelitian yang dilakukan Grbic et al. (2019) melaporkan bahwa modifikasi n-Fe₃O₄ dengan *hexadecyltrimethoxysilane* (HDTMS) untuk pemisahan mikroplastik PET masih memiliki efisiensi pemisahan yang terbatas. Beberapa penelitian terbaru telah memodifikasi nanopartikel magnetik menggunakan AO dan PEG, yang menunjukkan peningkatan efisiensi dalam aplikasi seperti adsorpsi oli dan timbal (Kirkebaek et al., 2022; Oehlsen et al., 2022; Sadati Behbahani et al., 2014). Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas tentang

perkembangan teknologi ini, Tabel 1 menunjukkan kelebihan dan kelemahan dari berbagai metode pemisahan mikroplastik yang telah dilakukan, serta material adsorben yang digunakan dalam penelitian sebelumnya.

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu, metode adsorpsi menggunakan nanopartikel magnetik memiliki potensi besar untuk pemisahan mikroplastik, terutama jika nanopartikel tersebut dimodifikasi dengan surfaktan untuk meningkatkan stabilitas dan hidrofobisitas. Pada penelitian ini, kami melakukan sintesis dan modifikasi n-Fe₃O₄ dari pasir besi pantai Watu Ulo, Jember, menggunakan metode *co-precipitation* dengan dua surfaktan berbeda, yaitu AO dan PEG. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan surfaktan AO dan PEG pada kemampuan adsorpsi nanopartikel magnetit untuk mikroplastik PET dalam media air.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Alat dan Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi polietilena tereftalat (PET), pasir besi dari Pantai Watu Ulo Jember, akuades (H₂O), asam klorida (HCl) 37%, asam oleat (C₁₈H₃₄O₂), PEG 6000 (95%), amonium hidroksida (NH₄OH) 25%, etanol (C₂H₅OH). Alat yang digunakan adalah ayakan 100 mesh, pipet ukur, pipet tetes, gelas beker, spatula, erlenmeyer, mortar, oven, termometer, *hot plate*, *magnetic stirrer*, magnet eksternal, ultrasonic cleaner, pH meter, pompa vakum, *Particle Size Analyzer* (PSA), dan *Fourier Transform Infrared* (FTIR).

2.2. Variabel Penelitian

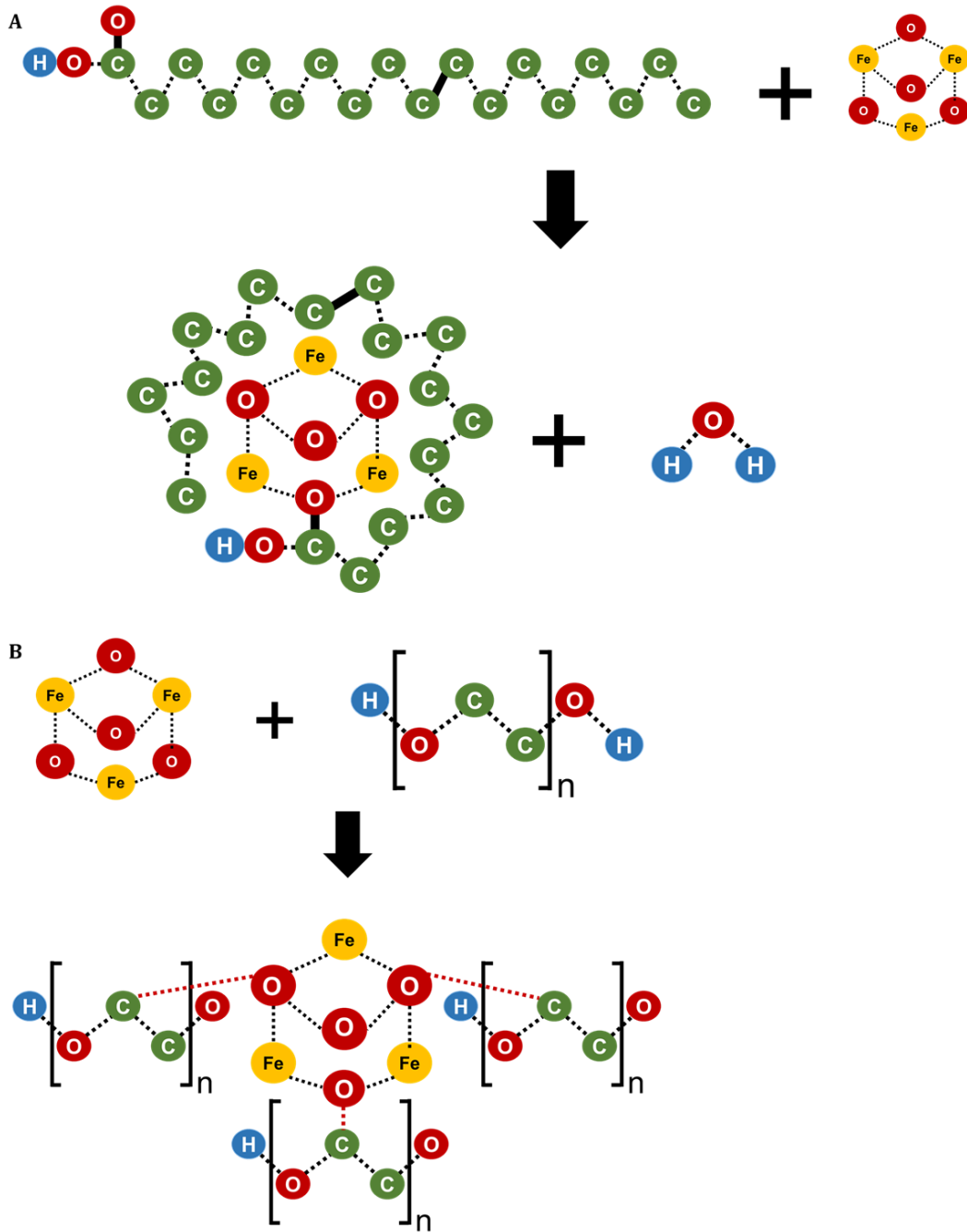
Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis modifikasi nanopartikel magnetit:

- n-Fe₃O₄
Nanopartikel magnetit tidak dimodifikasi.
- n- Fe₃O₄/OA
Nanopartikel magnetit dimodifikasi dengan asam oleat.
- n- Fe₃O₄/PEG
Nanopartikel magnetit dimodifikasi dengan PEG.

Variabel kontrol mencakup volume air, konsentrasi mikroplastik, konsentrasi nanopartikel magnetit, suhu, kecepatan pengadukan (rpm), dan waktu pengocokan. Variabel terikat adalah efisiensi adsorpsi mikroplastik PET.

Tabel 1. Perbandingan Metode Pemisahan Mikroplastik dalam Air dan Material Adsorben

Metode	Kelebihan	Kelemahan	Referensi
Flokulasi/ Koagulasi	Efisiensi awal tinggi, biaya relatif rendah	Membutuhkan bahan kimia tambahan, limbah lumpur	Gao et al., 2022
Sedimentasi	Proses sederhana, biaya rendah	Waktu proses lama, kurang efektif untuk partikel kecil	Gies et al., 2018
Filtrasi	Selektivitas tinggi, dapat digunakan kembali	Perawatan rutin diperlukan, biaya filter tinggi	Ma et al., 2019
Degradasi Mikroba	Ramah lingkungan, tidak menghasilkan polutan sekunder	Proses lambat, memerlukan kondisi khusus	Talvitie et al., 2017
Adsorpsi (Fe ₃ O ₄)	Efisiensi tinggi, mudah dipisahkan, dapat digunakan kembali	Biaya sintesis dan modifikasi nanopartikel	Wang et al., 2021



Gambar 1. Reaksi a) n-Fe₃O₄ dengan Asam Oleat, dan b) n-Fe₃O₄ dengan PEG

2.3. Sintesis n-Fe₃O₄

N-Fe₃O₄ disintesis dari pasir besi dengan menggunakan metode co-presipitasi. Pasir besi diekstraksi menggunakan magnet eksternal untuk mendapatkan bijih besi, kemudian disaring menggunakan ayakan 100 mesh. Pasir besi yang telah diperoleh dicuci dengan ultrasonic cleaner selama 30 menit pada suhu 30°C. Sintesis n-Fe₃O₄ dilakukan dengan melarutkan 6 gram pasir besi dalam 80 mL larutan HCl 37% pada suhu 70°C selama 60 menit. Setelah itu, larutan disaring dua kali menggunakan kertas saring untuk memisahkan polutan yang tidak larut. Ammonia 25% ditambahkan secara bertahap hingga mencapai pH 9,8 sambil diaduk pada 350 rpm dan suhu 70°C, menghasilkan endapan hitam.

420

Nanopartikel magnetit yang dihasilkan dicuci dengan akuades untuk menghilangkan senyawa yang tidak diinginkan dan agen pengendap. Larutan dikeringkan menggunakan oven pada suhu 80°C selama 6 jam. Gumpalan yang terbentuk setelah pengeringan dihaluskan dengan mortar (Syahida et al., 2021; Tatinting et al., 2021).

2.4. Modifikasi n-Fe₃O₄ dengan Asam Oleat dan PEG

Nanopartikel magnetit dimodifikasi dengan asam oleat mengikuti prosedur yang dikembangkan oleh Shi et al. (2022). Sebanyak 3 gram nanopartikel magnetit dicampur dengan 300 mL akuades dan 2 mL asam oleat. Campuran dipanaskan hingga 80°C sambil

diaduk menggunakan magnetic stirrer. Proses reaksi berlangsung selama 30 menit untuk memastikan nanopartikel magnetit sepenuhnya terlapisi oleh asam oleat. Larutan dicuci dengan akuades untuk menghilangkan asam oleat yang tidak bereaksi dan kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100°C selama 150 menit (Li et al., 2022).

Modifikasi dengan PEG dilakukan dengan melarutkan 3 gram PEG-6000 dalam 50 mL akuades, diaduk pada suhu 60°C dengan kecepatan 450 rpm selama 30 menit. Selanjutnya, 3 gram n-Fe₃O₄ ditambahkan dan diaduk selama 10 menit. Campuran ini kemudian dikendapkan menggunakan magnet eksternal dan dikeringkan pada suhu 50°C selama 60 menit. Modifikasi dengan PEG melibatkan reaksi kimia seperti yang dijelaskan oleh Yang et al. (2010) (Yang et al., 2010).

2.5. Karakterisasi

2.5.1. XRD

Untuk karakterisasi awal pasir besi yang digunakan dalam penelitian ini, analisis X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk menentukan struktur kristal pasir besi. Sampel pasir besi dipersiapkan dengan mengeringkan dan menggilingnya hingga halus. Analisis XRD dilakukan dengan menggunakan difraktometer XRD pada rentang sudut 2θ dari 10° hingga 80° dengan kecepatan pemindaian 2°/menit. Data XRD yang diperoleh digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal dan menentukan jenis mineral yang terkandung dalam pasir besi, serta memastikan bahwa pasir besi mengandung Fe₃O₄ sebelum proses sintesis nanopartikel (Prasetyowati et al., 2021).

2.5.2. PSA

Analisis distribusi ukuran partikel dilakukan menggunakan Particle Size Analyzer (PSA) dengan metode *dynamic light scattering* (DLS). Pengukuran dilakukan pada sampel nanopartikel magnetit yang tidak dimodifikasi dan yang telah dimodifikasi untuk menentukan ukuran partikel dan distribusinya (Yusuf et al., 2020).

2.5.3. FTIR

Gugus fungsi pada nanopartikel magnetit yang dimodifikasi dengan PEG dan asam oleat dianalisis menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Pemindaian dilakukan pada rentang frekuensi 4000 – 500 cm⁻¹ dengan resolusi spektral 4 cm⁻¹ untuk mengidentifikasi ikatan kimia dalam molekul (Hamzah et al., 2021).

2.6. Pemisahan Mikroplastik

Untuk pemisahan mikroplastik, 0,5 g/L PET dan 1,3 g/L nanopartikel magnetit dicampur dan dikocok dengan shaking incubator pada kecepatan 180 rpm dan suhu 30°C selama 180 menit (Wang et al., 2021).

Nanopartikel magnetit akan mengikat partikel PET yang ada dalam air dan kemudian dipisahkan dari air menggunakan magnet eksternal. Efisiensi pemisahan mikroplastik dihitung dari selisih antara massa mikroplastik yang ditambahkan dan massa mikroplastik yang teradsorpsi. Perhitungan efisiensi pemisahan menggunakan persamaan berikut:

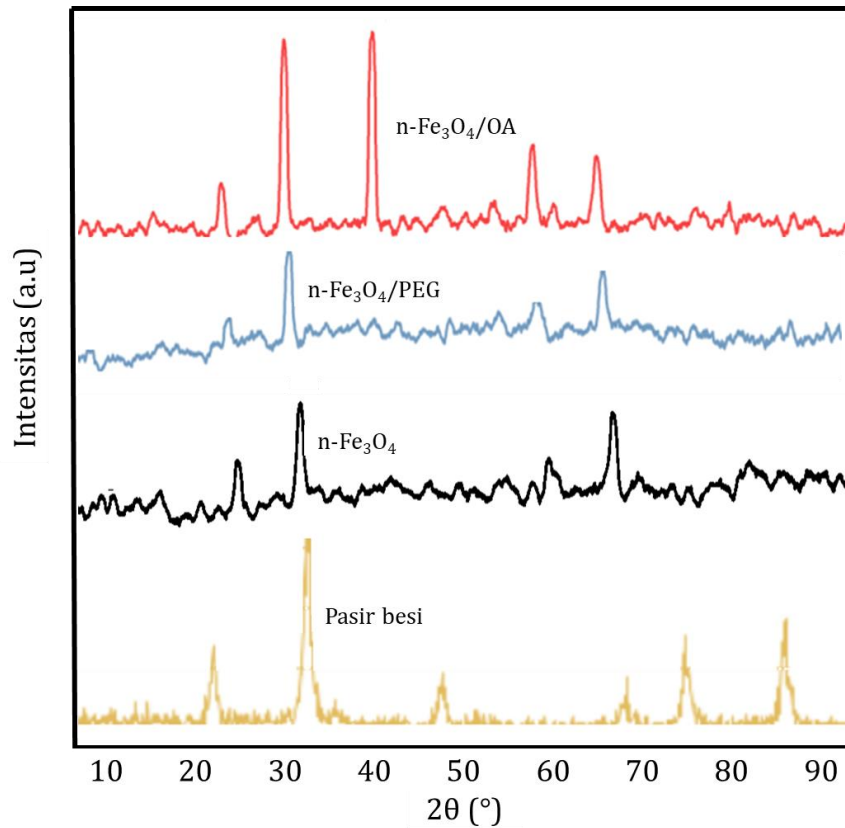
$$\%efisiensi = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100 \quad (1)$$

dimana C_0 adalah massa mikroplastik yang ditambahkan ke dalam larutan (g/L) dan C_t adalah massa mikroplastik setelah ekstraksi dengan magnet eksternal (Wang et al., 2021).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis nanopartikel magnetit dari pasir besi dilakukan dengan metode co-precipitation yang merupakan metode sederhana, ekonomis, dan efektif untuk menghasilkan nanopartikel magnetik superparamagnetik. Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil sintesis meliputi pH, proses pencucian, suhu reaksi, dan laju pengadukan (Niholan Tukan and Rosmainar Tambunan, 2023). Sebelum sintesis, pencucian dilakukan untuk menghilangkan residu, dan pelarutan ekstrak pasir dengan HCl menghasilkan besi (II) klorida. Larutan garam besi diendapkan dengan NH₄OH hingga pH 9,8, menghasilkan endapan magnetit. Endapan tersebut kemudian dikeringkan dan ditumbuk menjadi serbuk magnetit. N-Fe₃O₄/OA dan n-Fe₃O₄/PEG untuk meningkatkan efisiensi pemisahan mikroplastik PET dalam air.

Pola spektrum XRD dari pasir besi pada Gambar 2 menunjukkan adanya puncak-puncak difraksi yang mengindikasikan keberadaan beberapa mineral utama dalam sampel. Puncak-puncak dominan yang teridentifikasi berada pada sudut 2θ sekitar 30.1°, 35.5°, 43.2°, 57.0°, dan 62.6°, yang sesuai dengan pola difraksi magnetit (Fe₃O₄) sebagai fase utama. Selain magnetit, beberapa puncak lain juga menunjukkan kehadiran mineral hematit (Fe₂O₃) dan ilmenit (FeTiO₃), yang ditandai dengan puncak pada 2θ sekitar 24.2°, 33.2°, dan 49.5°. Kehadiran mineral-mineral ini menunjukkan bahwa pasir besi yang digunakan mengandung campuran oksida besi dan titanium, yang merupakan karakteristik umum dari pasir besi alami. Identifikasi mineral ini penting sebagai dasar untuk proses lebih lanjut pada sintesis nanopartikel magnetit dari pasir besi, yang memanfaatkan fase magnetit sebagai bahan utama. Puncak-puncak difraksi pasir besi yang lebih menunjukkan kristalinitas yang lebih rendah atau ukuran kristal yang lebih besar dari n-Fe₃O₄ yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa proses sintesis co-precipitation efektif dalam menghasilkan nanopartikel Fe₃O₄ dengan ukuran kristal yang lebih kecil dan struktur kristal yang lebih teratur.



Gambar 2. Pola Spektrum XRD

Tabel 2. Hasil Analisis XRD untuk Pasir Besi, n-Fe₃O₄, n-Fe₃O₄/OA, dan n-Fe₃O₄/PEG

Sampel	2θ (°)	Bidang Kristal	Lebar Puncak (FWHM, °)	Parameter Kisi (Å)	Ukuran Kristal (nm)
Pasir Besi	30.0	(220)	0.8	8.396	15
	35.5	(311)	0.7	8.393	18
	43.2	(400)	0.6	8.391	20
n-Fe ₃ O ₄	30.1	(220)	0.5	8.397	22
	35.6	(311)	0.4	8.395	25
	43.3	(400)	0.3	8.393	28
n-Fe ₃ O ₄ /OA	30.1	(220)	0.4	8.398	20
	35.6	(311)	0.3	8.396	23
	43.3	(400)	0.3	8.394	25
n-Fe ₃ O ₄ /PEG	30.2	(220)	0.3	8.399	18
	35.7	(311)	0.2	8.397	20
	43.4	(400)	0.2	8.395	22

Tabel 3. Distribusi Ukuran Partikel n-Fe₃O₄, n-Fe₃O₄/OA dan n-Fe₃O₄/PEG Berdasarkan Uji PSA

No	Ukuran Partikel (nm)	Intesitas (%)		
		n-Fe ₃ O ₄	n-Fe ₃ O ₄ /OA	n-Fe ₃ O ₄ /PEG
1	0 - 10	5	10	8
2	10 - 50	15	20	18
3	50 - 100	25	30	28
4	100 - 200	30	25	22
5	200 - 300	10	8	10
6	300 - 400	8	5	7
7	400 - 500	5	2	5
8	500 - 1000	2	0	2

Berdasarkan Tabel 2, hasil XRD menunjukkan bahwa nanopartikel Fe₃O₄, baik yang dilapisi dengan asam oleat maupun PEG, memiliki ukuran kristal yang lebih kecil dibandingkan dengan Fe₃O₄ tanpa modifikasi. Ukuran kristal ini berkurang lebih lanjut dengan pelapisan PEG, yang mungkin disebabkan oleh pengaruh PEG yang mencegah aglomerasi nanopartikel selama sintesis, sehingga menghasilkan kristalit yang lebih kecil. Parameter kisi yang relatif

konstan menunjukkan bahwa struktur kristal Fe₃O₄ tetap terjaga meskipun terdapat modifikasi dengan asam oleat dan PEG.

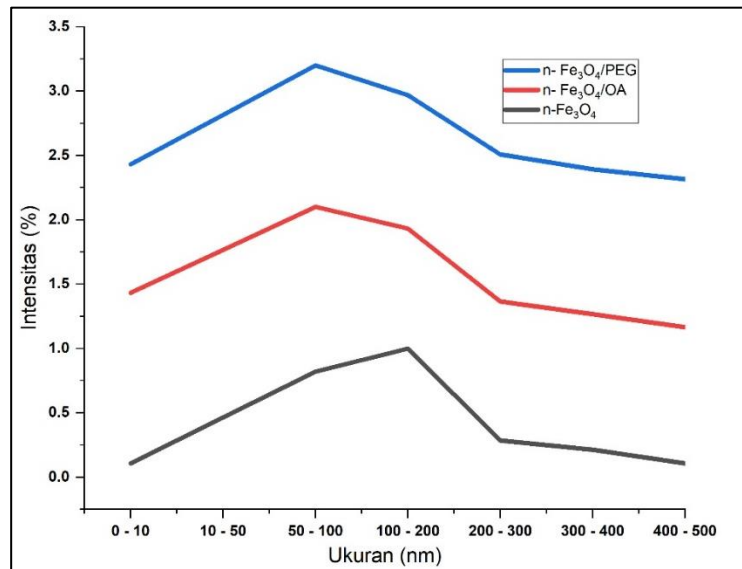
Distribusi ukuran partikel dari uji PSA pada Tabel 3 menunjukkan bahwa n-Fe₃O₄ memiliki rentang ukuran partikel yang bervariasi, mulai dari 0 hingga 1000 nm, dengan mayoritas partikel terdistribusi dalam rentang 100 hingga 200 nm (30%). Rentang ukuran ini menunjukkan bahwa metode sintesis yang

digunakan mampu menghasilkan partikel dalam skala nano, namun dengan adanya beberapa partikel berukuran lebih besar yang mungkin disebabkan oleh aglomerasi selama proses sintesis (Niholan Tukan and Rosmainar Tambunan, 2023). Setelah modifikasi dengan asam oleat, distribusi ukuran partikel berubah secara signifikan, dengan peningkatan jumlah partikel dalam rentang 10 hingga 50 nm (20%) dan 50 hingga 100 nm (30%) yang ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa asam oleat efektif dalam mengurangi aglomerasi partikel, menghasilkan partikel yang lebih seragam dan lebih kecil (Antarnusa et al., 2022; Prasetyowati et al., 2021; Rahmawati et al., 2018). Demikian pula, modifikasi dengan PEG juga menghasilkan distribusi ukuran partikel yang lebih kecil, dengan sebagian besar partikel berada dalam rentang 50 hingga 100 nm (28%) dan 10 hingga 50 nm (18%). PEG, sebagai agen

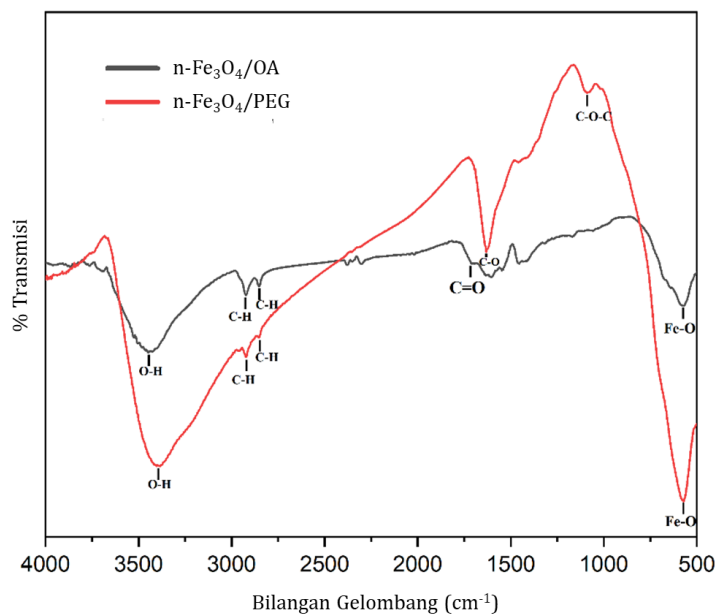
pelapis, mencegah aglomerasi dan memberikan stabilitas tambahan, yang berkontribusi pada distribusi partikel yang lebih seragam dan lebih kecil (Tatinting et al., 2021).

3.1. Analisis FTIR

Spektrum FTIR dari $n\text{-Fe}_3\text{O}_4/\text{OA}$ dan $n\text{-Fe}_3\text{O}_4/\text{PEG}$ menunjukkan puncak serapan pada 570 cm^{-1} yang terkait dengan vibrasi Fe-O, menandakan pembentukan Fe_3O_4 . Puncak pada $2852,81\text{ cm}^{-1}$ dan $2922,25\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya lapisan organik pada partikel magnetit. Puncak pada $1710,92\text{-}1546,96\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan gugus fungsi COO^- , dan puncak pada 3400 cm^{-1} menunjukkan *stretching* OH, sementara puncak sekitar $1082,00\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya PEG pada sampel $n\text{-Fe}_3\text{O}_4/\text{PEG}$ (Nuzully et al., 2013; Oktaviani et al., 2020).



Gambar 3. Hasil Uji PSA



Gambar 2. Hasil Uji FTIR

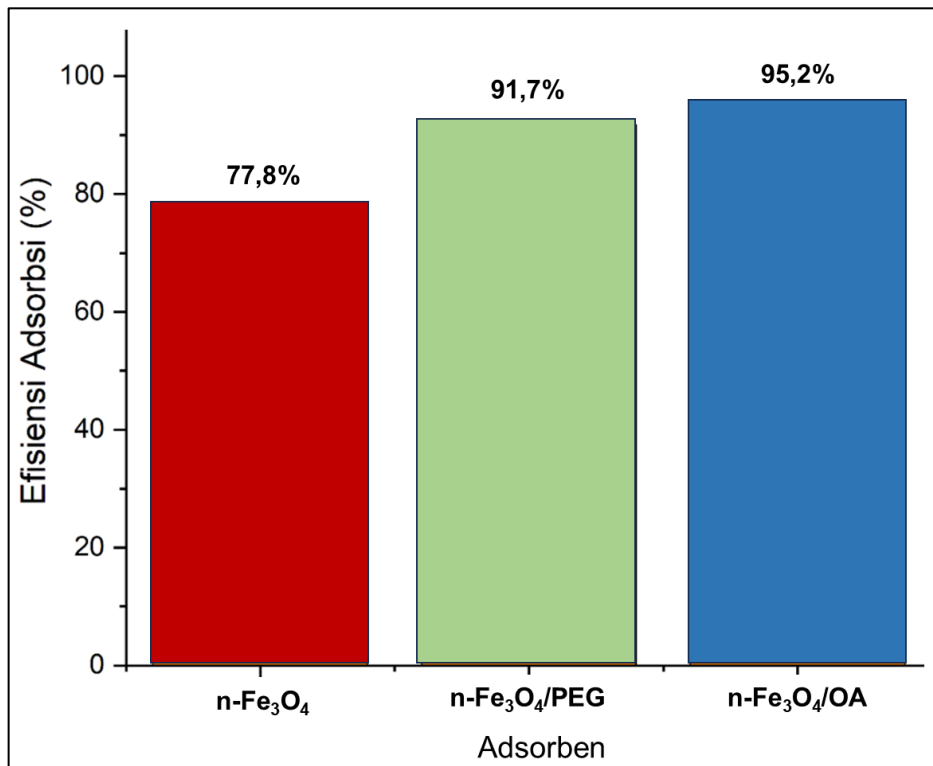
3.2. Efisiensi Adsorpsi

Hasil menunjukkan bahwa n-Fe₃O₄/AO memiliki efisiensi adsorpsi tertinggi (95,2%) dibandingkan dengan magnetit bare (77,8%) dan magnetit terlapis PEG (91,7%). Efisiensi adsorpsi dipengaruhi oleh luas permukaan, hidrofobisitas, dan densitas (Muthulakshmi et al., 2023; Shi et al., 2022). Modifikasi dengan PEG dapat menurunkan ukuran kristalit dan meningkatkan distribusi partikel dalam air, sedangkan modifikasi dengan asam oleat meningkatkan interaksi hidrofobik, yang terbukti dengan efisiensi adsorpsi tertinggi.

Tabel 4 menyajikan perbandingan berbagai metode dan material adsorben dari penelitian sebelumnya serta hasil efisiensinya dalam pemisahan mikroplastik. Tabel ini memberikan konteks untuk hasil penelitian ini dan menunjukkan keunggulan dari modifikasi nanopartikel magnetit dibandingkan dengan metode dan material lainnya.

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pelapisan dengan asam oleat meningkatkan efisiensi

adsorpsi karena interaksi hidrofobik yang lebih kuat antara adsorben dan mikroplastik, seperti yang telah. Modifikasi dengan PEG dan asam oleat juga meningkatkan efisiensi adsorpsi. Perbandingan ini menegaskan bahwa modifikasi permukaan nanopartikel magnetit dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi pemisahan mikroplastik dalam media air. Efek dari distribusi ukuran partikel yang lebih kecil dan seragam yang ditunjukkan pada Gambar 2 juga tercermin dalam peningkatan efisiensi pemisahan mikroplastik. N-Fe₃O₄/OA menunjukkan efisiensi tertinggi dalam pemisahan, yang kemungkinan disebabkan oleh ukuran partikel yang lebih kecil dan luas permukaan yang lebih besar, yang meningkatkan kontak antara adsorben dan mikroplastik (Osman et al., 2023; Shi et al., 2022). Hasil ini mengindikasikan bahwa modifikasi dengan asam oleat dan PEG adalah strategi yang efektif untuk mengoptimalkan distribusi ukuran partikel, yang pada gilirannya meningkatkan performa aplikasi dalam pemisahan mikroplastik dari air.



Gambar 5. Hasil Efisiensi Adsorpsi

Tabel 4. Perbandingan Metode dan Material Adsorben untuk Pemisahan Mikroplastik

Modifikasi Magnetit	Material Adsorben	Metode Pemisahan	Efisiensi (%)	Catatan
Asam Oleat (Shi et al., 2022)	Fe ₃ O ₄ dengan Asam Oleat	Adsorpsi	74%	Efisiensi pemisahan mikroplastik PET, interaksi hidrofobik
PEG (Nuzully et al., 2013)	Fe ₃ O ₄ dengan PEG	Adsorpsi	68%	Efisiensi pemisahan dengan ukuran kristalit yang lebih kecil
HDTMS (Grbic et al., 2019)	Fe ₃ O ₄ dengan HDTMS	Adsorpsi	74%	Efisiensi pemisahan mikroplastik PET, meningkatkan hidrofobisitas
Tanpa modifikasi Wang, X., et al. (2021)	Fe ₃ O ₄ Bare	Adsorpsi	72%	Efisiensi pemisahan mikroplastik PET, dasar tanpa modifikasi
PEG dan Asam Oleat	Fe ₃ O ₄ dengan PEG dan Asam Oleat	Adsorpsi	95,2%	Hasil terbaik dalam pemisahan mikroplastik, kombinasi modifikasi meningkatkan efisiensi

Mumtazah, Z., Suci, S. M. B., Hakiki, R. M., Muharja, M., Palupi, B., Rachmawati, I., Putri, D. K. Y., dan Ramadana, I. (2025). Modifikasi Fe₃O₄ dari Pasir Besi Pantai dengan Asam Oleat dan PEG melalui Metode co-Precipitation untuk Menangani Limbah Mikroplastik PET di Air Laut. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(2), 418-426, doi:10.14710/jil.23.2.418-426

4. KESIMPULAN

Sintesis nano partikel magnetit menggunakan metode co-precipitation dari pasir besi Watu Ulo Jember berhasil dilakukan dengan cara melarutkan pasir besi pada larutan HCl dengan pH 9. Ukuran partikel yang didapatkan 458,7-955,4 nm dengan intensitas tertinggi pada 712,4 nm. Modifikasi magnetit dilakukan dengan melapisi nanopartikel dengan asam oleat dan PEG dengan dibuktikan menggunakan uji FTIR guna mengetahui adanya pelapisan. Dalam pengaplikasiannya untuk adsorpsi mikroplastik dalam air, nano partikel yang dilapisi asam oleat memiliki efisiensi tertinggi yaitu 95,2%. Faktor yang mempengaruhi efisiensi adsorpsi antara lain adalah luas permukaan adsorben, stabilitas, dan interaksi hidrofobik antara adsorben dan mikroplastik.

DAFTAR PUSTAKA

- Alshammari, B. H., Lashin, M. M. A., Mahmood, M. A., Al-Mubaddel, F. S., Ilyas, N., Rahman, N., Sohail, M., Khan, A., Abdullaev, S. S., Khan, R. 2023. Organic and Inorganic Nanomaterials: Fabrication, Properties and Applications. *RSC Advances*. <https://doi.org/10.1039/d3ra01421e>
- Antarnusa, G., Jayanti, P. D., Denny, Y. R., Suherman, A. 2022. Utilization of Co-Precipitation Method on Synthesis of Fe₃O₄/PEG with Different Concentrations of PEG for Biosensor Applications. *Materialia*, 25: 101525. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101525>
- Budhiraja, V., Mušič, B., Krzan, A. 2022. Magnetic Extraction of Weathered Tire Wear Particles and Polyethylene Microplastics. *Polymers*, 14(23): 5189. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym14235189>
- Cheng, Y. L., Kim, J.-G., Kim, H.-B., Choi, J. H., Fai Tsang, Y., Baek, K. 2021. Occurrence and Removal of Microplastics in Wastewater Treatment Plants and Drinking Water Purification Facilities: A Review. *Chemical Engineering Journal*, 410: 128381. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128381>
- Gao, W., Zhang, Y., Mo, A., Jiang, J., Liang, Y., Cao, X., He, D. 2022. Removal of Microplastics in Water: Technology Progress and Green Strategies. *Green Analytical Chemistry*, 3: 100042. <https://doi.org/10.1016/j.greeac.2022.100042>
- Gies, E. A., LeNoble, J. L., Noël, M., Etemadifar, A., Bishay, F., Hall, E. R., Ross, P. S. 2018. Retention of Microplastics in a Major Secondary Wastewater Treatment Plant in Vancouver, Canada. *Marine Pollution Bulletin*, 133: 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.06.006>
- Grbic, J., Nguyen, B., Guo, E., You, J. B., Sinton, D., Rochman, C. M. 2019. Magnetic Extraction of Microplastics from Environmental Samples. *Environmental Science & Technology Letters*, 6(2): 68-72. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00671>
- Hamzah, S., Ying, L. Y., Azmi, A. A. Abd. R., Razali, N. A., Hairom, N. H. H., Mohamad, N. A., Harun, M. H. C. 2021. Synthesis, Characterisation and Evaluation on the Performance of Ferrofluid for Microplastic Removal from Synthetic and Actual Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5): 105894. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105894>
- Hossain, M. R., Jiang, M., Wei, Q., Leff, L. G. 2019. Microplastic Surface Properties Affect Bacterial Colonization in Freshwater. *Journal of basic microbiology*, 59(1): 54-61. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jobm.201800174>
- Kirkebaek, B., Simoni, G., Lankveld, I., Poulsen, M., Christensen, M., Quist-Jensen, C. A., Yu, D., Ali, A. 2022. Oleic Acid-Coated Magnetic Particles for Removal of Oil from Produced Water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 211: 110088. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.110088>
- Kirstein, I. V., Gomiero, A., Vollertsen, J. 2021. Microplastic Pollution in Drinking Water. *Current Opinion in Toxicology*, 28: 70-75. <https://doi.org/10.1016/j.cotox.2021.09.003>
- Li, L., Li, D., Zhang, Z. 2022. Colloidal Stability of Magnetite Nanoparticles Coated by Oleic Acid and 3-(N, N-Dimethylmyristylammonio) Propanesulfonate in Solvents. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.893072>
- Ma, B., Xue, W., Ding, Y., Hu, C., Liu, H., Qu, J. 2019. Removal Characteristics of Microplastics by Fe-Based Coagulants during Drinking Water Treatment. *Journal of Environmental Sciences*, 78: 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.006>
- Marciello, M., Luengo, Y., Morales, M. P. 2016. Iron Oxide Nanoparticles for Cancer Diagnosis and Therapy. *In Nanoarchitectonics for smart delivery and drug targeting*, 667-694. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-323-47347-7.00024-0>
- Masuku, M., Ouma, L., Pholosi, A. 2021. Microwave Assisted Synthesis of Oleic Acid Modified Magnetite Nanoparticles for Benzene Adsorption. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 15(100429). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100429>
- Meijer, L. J. J., van Emmerik, T., van der Ent, R., Schmidt, C., Lebreton, L. 2021. More than 1000 Rivers Account for 80% of Global Riverine Plastic Emissions into the Ocean. *Science Advances*, 7(18). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz5803>
- Misra, A., Zambrzycki, C., Kloker, G., Kotyrba, A., Anjass, M. H., Franco Castillo, I., Mitchell, S. G., Güttel, R., Streb, C. 2020. Water Purification and Microplastics Removal Using Magnetic Polyoxometalate-Supported Ionic Liquid Phases (MagPOM-SILPs). *Angewandte Chemie International Edition*, 59(4): 1601-1605. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/anie.201912111>
- Muthulakshmi, L., Mohan, S., Tatarchuk, T. 2023. Microplastics in Water: Types, Detection, and Removal Strategies. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(36): 84933-84948. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-023-28460-6>
- Niholan Tukan, D. Rosmainar Tambunan, L. 2023. A Review: Optimum Conditions for Magnetite Synthesis (Fe₃O₄). *Jurnal Ilmiah Berkala: Sains dan Terapan Kimia*, 7(12):
- Nuzully, S., Kato, T., Suharyadi, E. 2013. Pengaruh Konsentrasi Polyethylene Glycol (PEG) Pada Sifat

- Kemagnetan Nanopartikel Magnetik PEG-Coated Fe₃O₄. *Jurnal Fisika Indonesia*, 17(51). <https://doi.org/10.22146/jfi.24432>
- Oehlsen, O., Cervantes-Ramírez, S. I., Cervantes-Avilés, P., Medina-Velo, I. A. 2022. Approaches on Ferrofluid Synthesis and Applications: Current Status and Future Perspectives. *ACS Omega*, 7(4): 3134–3150. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05631>
- Oktaviani, E., Nasri, M. Z., Deswardani, F. 2020. Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel Fe₃O₄ (Magnetite) dari Pasir Besi Sungai Batanghari Jambi yang Dinkapsulasi dengan Polyethylene Glycol (Peg-4000). *Jurnal Pendidikan Fisika Tadulako Online*, 8(3): 97–103
- Osman, A. I., Hosny, M., Eltaweil, A. S., Omar, S., Elgarahy, A. M., Farghali, M., Yap, P. S., Wu, Y. S., Nagandran, S., Batumalaie, K., Gopinath, S. C. B., John, O. D., Sekar, M., Saikia, T., Karunanithi, P., Hatta, M. H. M., Akinyede, K. A. 2023. Microplastic Sources, Formation, Toxicity and Remediation: A Review. *In Environmental Chemistry Letters*, 21(4): 2129–2169. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10311-023-01593-3>
- Plohl, O., Sep, N., Zemljič, L. F., Vujanović, A., Čolnik, M., Van Fan, Y., Škerget, M., Klemeš, J. J., Čuček, L., Valh, J. V. 2022. Fragmentation of Disposed Plastic Waste Materials in Different Aquatic Environments. *Chemical Engineering Transactions*, 94: 1249–1254. <https://doi.org/10.3303/CET2294208>
- Prasetyowati, R., Widiawati, D., Swastika, P. E., Ariswan, A., Warsono, W. 2021. Sintesis Dan Karakterisasi Nanopartikel Magnetit (Fe₃O₄) Berbasis Pasir Besi Pantai Glagah Kulon Progo Dengan Metode Kopresipitasi Pada Berbagai Variasi Konsentrasi NH₄OH. *Jurnal Sains Dasar*, 10(2): 57–61. <https://doi.org/https://doi.org/10.21831/jsd.v10i2.43043>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., Giorgini, E. 2021. Plasticenta: First Evidence of Microplastics in Human Placenta. *Environment International*, 146: 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Rahmawati, R., Taufiq, A., Sunaryono, S., Fuad, A., Yulianto, B., Suytman, S., Kurniadi, D. 2018. Synthesis of Magnetite (Fe₃O₄) Nanoparticles from Iron Sands by Co - Precipitation - Ultrasonic Irradiation Methods. *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 9(1): 155–160. <https://doi.org/https://doi.org/10.26872/jmes.2018.9.1.19>
- Sadati Behbahani, N., Rostamizadeh, K., Yaftian, M. R., Zamani, A., Ahmadi, H. 2014. Covalently Modified Magnetite Nanoparticles with PEG: Preparation and Characterization as Nano-Adsorbent for Removal of Lead from Wastewater. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1): 103. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-103>
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsecs, T., Trauner, M., Reiberger, T., Liebmann, B. 2019. Detection of Various Microplastics in Human Stool. *Annals of Internal Medicine*, 171(7): 453–457. <https://doi.org/10.7326/M19-0618>
- Shi, X., Zhang, X., Gao, W., Zhang, Y., He, D. 2022. Removal of Microplastics from Water by Magnetic Nano-Fe₃O₄. *Science of The Total Environment*, 802: 149838. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149838>
- Syahida, A. N., Sutanto, H., Alkian, I., Irianti, F. D., Wibowo, A. A., Priyono, P. 2021. Synthesized and Characterization Nanosized Synthesis Fe₃O₄ Powder from Natural Iron Sand. *Journal of Physics: Conference Series*, 1943(1): 012013. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012013>
- Talvitie, J., Mikola, A., Koistinen, A., Setälä, O. 2017. Solutions to Microplastic Pollution – Removal of Microplastics from Wastewater Effluent with Advanced Wastewater Treatment Technologies. *Water Research*, 123: 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.005>
- Tatinting, G. D., Aritonang, H. F., Wuntu, A. D. 2021. Sintesis Nanopartikel Fe₃O₄–Polietilen Glikol (PEG) 6000 dari Pasir Besi Pantai Hais sebagai Adsorben Logam Kadmium (Cd). *CHEMISTRY PROGRESS*, 14(2): 131. <https://doi.org/10.35799/cp.14.2.2021.37192>
- Wang, J., Sun, C., Huang, Q.-X., Chi, Y., Yan, J.-H. 2021. Adsorption and Thermal Degradation of Microplastics from Aqueous Solutions by Mg/Zn Modified Magnetic Biochars. *Journal of Hazardous Materials*, 419: 126486. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126486>
- Yang, K., Peng, H., Wen, Y., Li, N. 2010. Re-Examination of Characteristic FTIR Spectrum of Secondary Layer in Bilayer Oleic Acid-Coated Fe₃O₄ Nanoparticles. *Applied Surface Science*, 256(10): 3093–3097. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.11.079>
- Yang, L., Li, K., Cui, S., Kang, Y., An, L., Lei, K. 2019. Removal of Microplastics in Municipal Sewage from China's Largest Water Reclamation Plant. *Water Research*, 155: 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.046>
- Yusuf, N. A., Aksa, R., Cahyono, F. J. 2020. Optimasi Variasi Konsentrasi Lipid Terhadap Karakteristik Fisik Solid Lipid Nanoparticle (SLN) Glibenklamid. *Jurnal Ilmiah Manungtung*, 6(2): 163. <https://doi.org/10.51352/jim.v6i2.341>