

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI NANOFIBER PVAc/Fe₃O₄ UNTUK ADSORPSI LOGAM BERAT DAN ANTIBAKTERI

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan
mencapai derajat sarjana S-1

Program Studi Fisika



Diajukan oleh :

Ayu Risna

21106020020

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UIN SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2025

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1888/Un.02/DST/PP.00.9/08/2025

Tugas Akhir dengan judul : Fabrikasi dan Karakterisasi Nanofiber PVAc/Fe₃O₄ untuk adsorpsi logam berat dan antibakteri

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : AYU RISNA
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020020
Telah diujikan pada : Rabu, 20 Agustus 2025
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 68a71a5391309



Penguji I

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 68a7959889262



Penguji II

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 68a71e752929a



Yogyakarta, 20 Agustus 2025
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 68a7d14299e38

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ayu risna
NIM : 21106020020
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “fabrikasi dan karakterisasi nanofiber PVAc/Fe₃O₄ untuk adsorpsi logam berat dan antibakteri” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 13 Agustus 2025



Ayu Risna
21106020020

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi

Lamp : -

Kepada

Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Ayu Risna
NIM : 21106020020
Judul Skripsi : fabrikasi dan karakterisasi nanofiber PVAc/Fe₃O₄ untuk adsorpsi logam berat dan antibakteri

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami mengharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Yogyakarta, 13 Agustus 2025

Pembimbing II

Dr. Eng Ahmad Kusuma Atmaja S.Si., M.Sc.
NIP. 198307222014041001

Pembimbing I

Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D
NIP. 19841110 201101 2 017

MOTTO

"Jika kamu tidak mampu menahan lelahnya belajar, maka kamu harus sanggup menahan perihnya kebodohan." – Imam Syafi'i

*"Barangsiapa menempuh jalan untuk mencari ilmu, Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga."
(HR. Muslim)*



HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan untuk:

Allah SWT.

Diri saya sendiri

Kedua Orang Tua Penulis Bapak Sumardi Dan Ibu Suprowiyah

Novi Ayu Lestari S.Pd

Fisika 2021

Study Club Fisika Material

Program Studi Fisika UIN Sunan Kalija Yogyakarta



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "*Fabrikasi dan Karakterisasi Nanofiber PVAc/Fe₃O₄ untuk Adsorpsi Logam Berat dan Antibakteri*" dengan baik. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada junjungan Nabi Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta umatnya hingga akhir zaman, dengan harapan kita semua memperoleh syafaat beliau di hari akhir kelak.

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu bentuk tanggung jawab penulis dalam menyelesaikan studi, sekaligus memenuhi salah satu syarat kelulusan pada jenjang pendidikan sarjana. Penulis berharap karya tulis ini dapat memberikan manfaat dan keberkahan bagi berbagai pihak yang berkepentingan. Dalam proses pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak dukungan, bimbingan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis dengan tulus menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Bapak Sumardi dan Ibu Suprowiyah tercinta, Kakak Novi Ayu Lestari S.Pd., serta adik-adik tercinta. Terimakasih atas segala doa, dukungan, kasih sayang, motivasi, dan pengorbanan yang tiada henti, yang menjadi sumber kekuatan dan semangat penulis dalam menyelesaikan studi dan penulisan skripsi ini.
2. Bapak Prof. Noorhaidi, M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

3. Ibu Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
5. Ibu Asih Melati, S.Si., M.Sc., Ph.D., selaku dosen pembimbing akademik sekaligus dosen pembimbing pertama penelitian tugas akhir ini, terima kasih banyak atas waktu, dukungan finansial, motivasi, bimbingan, dan dorongan yang tiada henti selama proses penelitian hingga penyelesaian tugas akhir ini.
6. Bapak Dr.Eng Ahmad Kusuma Atmaja S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing kedua dalam penelitian ini, terimakasih banyak atas waktu, dukungan material, dan nasehat selama proses penelitian hingga penyelesaian tugas akhir ini.
7. Ibu Ethik Susiawati Purnomo, S.Si., selaku Pranata Laboratorium Biologi yang telah membantu, memberikan arahan, dan kemudahan fasilitas Laboratorium Biologi kepada penulis selama penelitian tugas akhir.
8. Teman-teman terdekat penulis: Ulfa Khozanah, Nisrina Agustya Darna, Rahmi Anisa Maulani, Ulya Chairunnisa, Andin Faradila Wijayanti, Nisa Muthmainah.
9. *Study Club* fisika material
10. Teman-teman fisika 2021
11. Serta semua pihak yang telah memberikan bantuan.

Penulis menyadari bahwa pengetahuan yang dimiliki masih terbatas, sehingga dalam penyusunan skripsi tugas akhir ini masih terdapat berbagai

kekurangan. Penulis sangat mengharapkan saran dan kritik yang membangun agar karya ini dapat diperbaiki di masa mendatang. Semoga penulisan ini dapat memberikan inspirasi serta menambah wawasan bagi para pembaca.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh

Yogyakarta, 10 Agustus 2025

Penulis



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

FABRIKASI DAN KARAKTERISASI NANOFIBER PVAc/Fe₃O₄ UNTUK ADSORPSI LOGAM BERAT DAN ANTIBAKTERI

Ayu Risna
21106020020

INTISARI

Pencemaran air semakin mengkhawatirkan akibat limbah industri, pertanian, dan domestik. Salah satu bentuk pencemaran yang sering ditemukan adalah keberadaan logam berat timbal (Pb) yang bersifat toksik. Selain itu, kualitas air juga terancam oleh kontaminasi mikrobiologis, khususnya bakteri *Escherichia coli* yang dapat menyebabkan gangguan kesehatan. Hal ini mendorong pengembangan material efektif. Penelitian ini bertujuan memfabrikasi dan mengkarakterisasi nanofiber berbasis polivinil asetat (PVAc) yang dikompositkan dengan besi oksida (Fe₃O₄) menggunakan metode electrospinning. Nanofiber PVAc/Fe₃O₄ diaplikasikan untuk adsorpsi logam berat Pb(II) sekaligus memiliki aktivitas antibakteri terhadap *E. coli*. Fabrikasi dilakukan dengan variasi konsentrasi Fe₃O₄ sebesar 3% dan 5% w. Karakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray* (SEM-EDX), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan *Water Contact Angle* (WCA). Hasil SEM menunjukkan Rata-rata diameter serat menurun dari 409,82 nm (3% Fe₃O₄) menjadi 388,46 nm (5% Fe₃O₄), menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi Fe₃O₄ menghasilkan ukuran serat yang lebih kecil. Pola XRD menampilkan puncak khas Fe₃O₄ pada 2θ sekitar 30,2°, 35,6°, 43,3°, 57,2°, dan 62,8°, serta puncak PVAc pada 22,565°, yang mengonfirmasi campuran PVAc/Fe₃O₄ terbentuk dengan baik tanpa kehilangan sifat kristalnya. Nilai sudut kontak meningkat dari 97,6° (3%) menjadi 113,9° (5%), menunjukkan bahwa permukaan nanofiber semakin hidrofobik seiring meningkatnya konsentrasi Fe₃O₄. WCA menunjukkan sudut kontak 97,6° (3%) dan 113,9° (5%). Uji adsorpsi logam berat Pb(II) dilakukan secara batch pada larutan uji 2 ppm selama 24 jam dan dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS). Uji kinerja adsorpsi menunjukkan bahwa persentase penghilangan logam Pb pada nanofiber PVAc/Fe₃O₄ 3% dan 5% masing-masing sebesar 52,3% dan 59,3%. Uji antibakteri nanofiber 5% menunjukkan zona hambat rata-rata 7 mm (kategori sedang) terhadap *Escherichia coli*. Nanofiber ini berpotensi sebagai media adsorpsi logam berat sekaligus antibakteri.

Kata kunci: Nanokomposit PVAc/Fe₃O₄, *electrospinning*, adsorpsi, Pb(II), *Escherichia coli*

Fabrication and Characterization of PVAc/Fe₃O₄ Nanofibers for Heavy Metal Adsorption and Antibacterial Applications

Ayu Risna
21106020020

ABSTRACT

Water pollution is becoming increasingly concerning due to industrial, agricultural, and domestic waste. One of the common forms of pollution is the presence of heavy metal lead (Pb), which is toxic. In addition, water quality is also threatened by microbiological contamination, particularly *Escherichia coli*, which can cause health problems. This drives the development of effective materials. This study aims to fabricate and characterize polyvinyl acetate (PVAc)-based nanofibers composited with iron oxide (Fe₃O₄) using the electrospinning method. The PVAc/Fe₃O₄ nanofibers were applied for Pb(II) adsorption and exhibited antibacterial activity against *E. coli*. Fabrication was carried out with Fe₃O₄ concentrations of 3% and 5% w. Characterizations were performed using Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX), X-Ray Diffraction (XRD), and Water Contact Angle (WCA). SEM results showed that the average fiber diameter decreased from 409.82 nm (3% Fe₃O₄) to 388.46 nm (5% Fe₃O₄), indicating that higher Fe₃O₄ concentration produced smaller fibers. XRD patterns revealed characteristic peaks of Fe₃O₄ at $2\theta \approx 30.2^\circ$, 35.6° , 43.3° , 57.2° , and 62.8° , along with PVAc at 22.565° , confirming that the PVAc/Fe₃O₄ composite was well-formed without losing its crystalline properties. The contact angle increased from 97.6° (3%) to 113.9° (5%), indicating that the nanofiber surface became more hydrophobic with higher Fe₃O₄ concentration. Pb(II) adsorption tests were conducted in batch mode with a 2 ppm solution for 24 hours and analyzed using Atomic Absorption Spectroscopy (AAS). The adsorption performance showed Pb removal percentages of 52.3% and 59.3% for 3% and 5% Fe₃O₄ nanofibers, respectively. Antibacterial testing of the 5% nanofiber showed an average inhibition zone of 7 mm (moderate category) against *Escherichia coli*. These findings demonstrate that PVAc/Fe₃O₄ nanofibers have potential as both heavy metal adsorbents and antibacterial agents.

Keywords: PVAc/Fe₃O₄ nanocomposite, electrospinning, adsorption, Pb(II), *Escherichia coli*.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI.....	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
INTISARI	x
ABSTRACT.....	xi
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	9
1.3 Tujuan Penelitian	9
1.4 Batasan Penelitian.....	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Studi Pustaka.....	12
2.2. Landasan Teori	20
2.2.1 Kualitas Air Baku	20
2.2.2 Adsorpsi	24
2.2.3 logam berat	27
2.2.3 Timbal (Pb).....	29
2.2.4 Bakteri Escherichia coli	31
2.2.5 Nanofiber	35
2.2.6 Polivinil Asetat (PVAc).....	37

2.2.7 Nanopartikel Magnetik Besi Oksida (Fe_3O_4)	39
2.2.8 Electrospinning	41
2.2.8.1 Parameter Larutan Polimer	43
A. Konsentrasi Larutan	43
B. Berat Molekul	44
C. Viskositas	44
D. Volatilitas Pelarut	45
E. Tegangan Permukaan	45
2.2.8.2 Parameter Proses	46
A. Tegangan	46
B. Laju Alir Larutan (<i>Flow Rate</i>)	47
C. Jarak Antara <i>Needle</i> Dan Kolektor	47
2.2.8.3 Kondisi Sekitar	48
A. Suhu	48
B. Kelembapan relatif (<i>Relative Humidity</i> / RH)	48
2.2.9 SEM-EDX (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray)	49
2.2.10 XRD (X-Ray Diffraction)	52
2.2.11 WCA (Water Contact Angle)	54
2.2.12 AAS (Atomic Absorption Spectrophotometer)	56
2.2.14 Metode Adsorpsi <i>Batch</i>	56
2.2.13 Disk Diffusion	58
BAB III METODE PENELITIAN	60
3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian	60
3.2 Alat Dan Bahan	60
3.2.1 Alat	60
3.2.2 Bahan	61
3.3 Prosedur Penelitian	62
3.3.1 Sintesis Polivinil Asetat	64
3.3.2 Sintesis larutan PVAc/ Fe_3O_4	65
3.3.3. Sintesis Nanofiber PVAc/ Fe_3O_4	66
3.3.4 Karakterisasi Sampel	67
3.3.5 Pengujian Adsorpsi Logam Berat	69
3.3.6 Pengujian Antibakteri	71

3.4 Metode analisa data	74
3.4.1 Pengujian Adsorpsi Logam Berat	74
3.4.2 Pengujian Antibakteri	75
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1 Hasil dan Pembahasan Sintesis Nanofiber PVAc/Fe ₃ O ₄	77
4.2 Hasil dan Pembahasan Karakterisasi Nanofiber	79
4.2.1 Data SEM-EDX	79
4.2.2 Data XRD	88
4.2.3 Data WCA	90
4.3 Hasil dan Pembahasan Adsorpsi Logam Berat	94
4.4 Hasil dan Pembahasan Antibakteri	97
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	101
5.1 Kesimpulan	101
5.2 Saran	102
Daftar Pustaka	104
LAMPIRAN	110



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Adsorpsi Fisis (Cui Dkk, 2020).....	26
Gambar 2. 2 Adsorpsi Kimia (Cui Dkk,2020)	27
Gambar 2. 3 Bakteri Escherichia Coli (Basavaraju dan gunashree, 2022).....	32
Gambar 2. 4 Nanofiber (Aflaha,2025)	37
Gambar 2. 5 Bentuk Struktur Dari A)Vinil Acetat (Vac). B) Polivinil Asetat (PVAc).....	38
Gambar 2. 6 Struktur Kristal Fe_3O_4 (Yousif dkk, 2023).	40
Gambar 2. 7 Representasi Sederhana Pengaturan Electrospinning (Ramalingan, 2018).	42
Gambar 2. 8 Skema Alat SEM (Inkson, 2016).....	51
Gambar 2. 9 Hasil SEM Nanofiber Fe_3O_4 (Pan, 2013).	52
Gambar 2. 10 hasil XRD Nanofiber Fe_3O_4 Dan Fe_2O_3 (Pan Dkk, 2013).	54
Gambar 2. 11 Hubungan Fasa Gas-Cair-Padat Membentuk Sudut Kontak (Ebnesajjad dan Ebnesajjad, 2013).....	54
Gambar 2. 12 Perbandingan Besar Sudut Kontak. (Wong And Yu, 2013).	55
Gambar 2. 13 Sudut Kontak Pada Membran Nanofiber Ca-Zeo 6% (Fulanjari Dkk, 2024)	55
Gambar 3. 1 Diagram Alir Prosedur Penelitian.....	63
Gambar 3. 2 Pembuatan Larutan PVAc	65
Gambar 3. 3 Pembuatan Larutan PVAc/ Fe_3O_4 Dengan Konsentrasi 3% Dan 5%	66
Gambar 3. 4 Diagram Alir Karakterisasi Sampel.....	69
Gambar 3. 5 Diagram Alir Pengujian Adsorpsi Logam Berat Pb	71
Gambar 3. 6 Diagram Alir Uji Antibakteri.....	73
Gambar 4. 1 Hasil Nanofiber PVAc/ Fe_3O_4 dengan Variasi Konsentrasi a) 3% b) 5%.	77
Gambar 4. 2 Morfologi Nanofiber PVAc/ Fe_3O_4 Konsentrasi (a) 3% (b) 5 %....	81
Gambar 4. 3 Grafik Distribusi Diameter Nanofiber PVAc/ Fe_3O_4 Konsentrasi (a)	

3% (b) 5%	83
Gambar 4. 4 Spektrum Hasil EDX Nanofiber PVAc/Fe ₃ O ₄ Variasi Konsentrasi	
(a) 3% (b) 5 %.....	84
Gambar 4. 5 Hasil Difraksi Sinar -X Nanofiber PVAc/ Fe ₃ O ₄	90
Gambar 4. 6 Interaksi Air Dengan Membran Nanofiber PVAc/Fe ₃ O ₄	91
Gambar 4. 7 Kurva Kalibrasi Larutan Pb(II).....	94
Gambar 4. 8 Aplikasi Antibakteri (A)Kontrol Negatif (B) Kontrol Positif (C)	
Nanofiber PVAc/Fe ₃ O ₄	98

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Studi Pustaka	20
Tabel 2. 2 Sistem Penelitian Mutu Air Berdasarkan Metode Storretsistem Penilaian Mutu Air Berdasarkan Metode STORET (Sutriati, 2011).....	23
Tabel 2. 3 Sifat – Sifat Nanopartikel Fe_3O_4	40
Tabel 3. 1 Alat Penelitian	60
Tabel 3. 2 Bahan Penelitian.....	61
Tabel 3. 3 Kategori Zona Hambat	73
Tabel 3. 4 Konsentrasi Pb(II) Sebelum Dan Sesudah Proses Adsorpsi	75
Tabel 3. 5 Hasil Uji Antibakteri	76
Tabel 4. 1 Jumlah Atom Pada Nanofiber Pvac/ Fe_3O_4	85
Tabel 4. 2 Sudut Kontak Nanofiber Pvac/ Fe_3O_4	92
Tabel 4. 3 Konsentrasi Pb(II) Sebelum Dan Sesudah Proses Adsorpsi	95
Tabel 4. 4 Hasil Uji Antibakteri Nanofiber Fe_3O_4 Terhadap E. Coli	98



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Sintesis PVAc	110
Lampiran 2 Sintesis PVAc/Fe ₃ O ₄	111
Lampiran 3 Sintesis Nanofiber PVAc/Fe ₃ O ₄	111
Lampiran 4 Pengukuran Diameter Nanofiber	112
Lampiran 5 Daftar Peak Hasil Karakterisasi XRD	115
lampiran 6 Pengukuran Sudut Kontak.....	116
Lampiran 7 Pembuatan Larutan standar Pb (II)	117
Lampiran 8 Pembuatan Larutan Uji Pb(II)	118
Lampiran 9 Data Hasil Karakterisasi AAS	119
Lampiran 10 Menentukan Persamaan Regresi Linear	119
lampiran 11 Menentukan Konsentrasi Akhir Larutan Pb (II).....	120
lampiran 12 Menghitung Jumlah Yang Teradsorpsi	120
lampiran 13 Persentase Adsorpsi.....	120



DAFTAR ISTILAH

<u>Istilah</u>	<u>Arti</u>
AAS	: <i>Atomic Absorption Spectroscopy</i> , teknik analisis untuk mengukur kadar logam.
Absorpsi	: Penyerapan zat ke dalam permukaan atau volume suatu material.
Adsorben	: Material yang digunakan untuk mengikat zat terlarut dari larutan atau gas.
Adsorpsi	: Proses penempelan molekul atau ion pada permukaan material.
Aglomerat	: Gumpalan partikel yang saling menempel.
Batch methode	: Metode pengolahan atau pengujian dengan satu kali perlakuan dalam satu wadah.
Cakram	: Lempengan tipis berbentuk lingkaran, biasanya digunakan sebagai media uji.
Coliform	: Kelompok bakteri indikator pencemaran air oleh feses.
Disk diffusion	: Metode uji antibakteri menggunakan cakram berisi zat uji pada media agar.
DMF	: <i>Dimetilformamida</i> , pelarut organik polar.
EDX	: <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> , teknik untuk analisis unsur pada permukaan sampel.
Electrospinning	: Teknik pembuatan serat nano menggunakan medan listrik tinggi.
Fabrikasi	: Proses pembuatan atau perakitan material/produk.
Hidrofilik	: Sifat permukaan yang mudah basah atau menarik air.
Hidrofobik	: Sifat permukaan yang menolak air atau sulit basah oleh air.
Hotplate	: Alat pemanas dengan permukaan datar.
Karakterisasi	: Analisis untuk mengetahui sifat atau struktur suatu

	material.
Komensal	: Mikroorganisme yang hidup pada inang tanpa merugikan atau menguntungkan.
konsentrasi	: Jumlah zat terlarut dalam sejumlah pelarut atau larutan.
Kontinu:	: Berkelanjutan tanpa putus atau celah.
Mikropipet	: Alat untuk mengambil dan memindahkan cairan dalam volume sangat kecil.
Monomer	: Molekul kecil yang dapat bergabung membentuk polimer.
Nanofiber	: Serat dengan diameter berukuran nanometer.
nanopartikel	: Partikel berukuran nanometer yang memiliki sifat unik.
Patogen	: Mikroorganisme penyebab penyakit.
Pelarut	: Zat cair yang digunakan untuk melarutkan zat lain.
Polimer	: Molekul besar yang tersusun dari banyak monomer.
Polimerisasi	: Proses penggabungan monomer menjadi polimer.
Ppm	: Part per million, satuan konsentrasi setara satu bagian per sejuta bagian.
Purifikasi	: Proses pemurnian zat dari kotoran atau zat pengotor.
PVAc	: Polivinil asetat, jenis polimer sintetis.
SEM	: Scanning Electron Microscopy, pengamatan struktur permukaan material dengan menggunakan sinar elektron berenergi tinggi.
Sintesis	: Proses pembuatan suatu senyawa atau material melalui reaksi kimia atau metode tertentu.
Strain bakteri	: Varian atau galur spesifik dari suatu jenis bakteri.
Syringe	: Alat suntik untuk mengeluarkan atau memasukkan cairan.
WCA	: Water Contact Angle, sudut kontak air yang menunjukkan sifat permukaan material.
Wettability	: Kemampuan permukaan suatu material untuk basah oleh cairan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan salah satu aspek penting bagi kehidupan. Air berperan sebagai komponen utama dalam berbagai proses kimiawi, biologis, dan juga fisik. Tanpa adanya air, kehidupan tidak akan bisa berlangsung. Dalam kehidupan sehari-hari, air dibutuhkan manusia untuk kebutuhan seperti minum, memasak, mandi, mencuci dan lainnya. Dalam bidang industri, air digunakan dalam proses pendinginan, pencucian, pelarutan bahan kimia dan sebagai bahan baku produk tertentu. Air juga bisa dijadikan sebagai pembangkit listrik dan menjadi termasuk salah satu sumber utama energi terbarukan yang ramah lingkungan.

Namun, seiring dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan industrialisasi yang pesat, kualitas air mengalami penurunan yang signifikan. Di berbagai wilayah Indonesia, air yang dulunya jernih dan layak konsumsi kini tercemar oleh limbah rumah tangga, industri, pertanian, serta bahan kimia berbahaya. Pencemaran air tidak hanya menurunkan kualitas lingkungan, tetapi juga membahayakan kesehatan masyarakat dan kelangsungan ekosistem perairan. Air adalah kebutuhan utama dan komponen penting dalam kehidupan, dan kerusakan kualitas serta kuantitasnya akibat pencemaran menimbulkan ancaman besar terhadap keberlangsungan hidup dan ekosistem (Afifudin, 2024).

Kerusakan kualitas dan kuantitas air yang diakibatkan oleh pencemaran, mencerminkan bentuk nyata dari kerusakan ekologis yang telah diperingatkan dalam Al-Qur'an. Allah SWT berfirman dalam Surah Ar-Rum ayat 41 yang berbunyi:

ظَهَرَ الْفَسَادُ فِي الْبَرِّ وَالْبَحْرِ بِمَا كَسَبَتْ أَيْدِي النَّاسِ لِيُذِيقَهُمْ بَعْضَ الَّذِي عَمِلُوا لَعَلَّهُمْ يَرْجِعُونَ

“telah tampak kerusakan di darat dan di laut disebabkan karena perbuatan tangan manusia; Allah menghendaki agar mereka merasakan sebagian dari (akibat) perbuatan mereka, agar mereka kembali (kejalan yang benar).” (QS. Ar-Rum [30] : 41)

Dalam *Tafsir Al-Misbah*, Quraish Shihab menjelaskan bahwa kata *fasād* dalam Surah Ar-Rum ayat 41 merujuk pada keluarnya sesuatu dari keseimbangannya, yang dalam konteks lingkungan berarti kerusakan ekologis akibat ulah manusia. Ia menyebutkan bahwa kerusakan yang terjadi di darat maupun di laut merupakan bentuk nyata dari ketidakseimbangan tersebut, seperti pencemaran lingkungan, bencana alam, dan degradasi ekosistem. Secara khusus, pencemaran perairan termasuk dalam jenis kerusakan yang dimaksud, karena laut dan air merupakan bagian penting dari sistem kehidupan yang menjadi rusak akibat tindakan manusia, seperti pembuangan limbah industri, eksploitasi berlebihan, dan perusakan habitat alami. Shihab menekankan bahwa kerusakan ini bukan hanya berdampak pada lingkungan, tetapi juga menjadi bentuk peringatan dari Allah agar manusia merenung dan kembali kepada prinsip-prinsip tanggung jawab ekologis. Allah membiarkan manusia merasakan sebagian akibat dari perbuatannya, bukan sebagai hukuman semata, melainkan sebagai teguran agar mereka kembali menjaga keseimbangan alam sebagaimana yang telah

ditetapkan oleh-Nya (Shihab, 2002).

Sebagai khalifah di muka bumi, manusia memiliki tanggung jawab fundamental dalam menjaga dan memperbaiki lingkungan, termasuk memastikan kelestarian sumber daya air sebagai elemen vital bagi kehidupan. Dalam perspektif Islam, tanggung jawab ini tidak semata-mata bersifat moral, melainkan merupakan amanah ilahiah yang secara eksplisit ditegaskan dalam berbagai ayat Al-Qur'an. Dalam Surah Al-Baqarah ayat 30, Allah SWT menyatakan bahwa manusia diangkat sebagai khalifah di bumi, yang mengandung makna bahwa manusia dituntut untuk menjalankan fungsi kepemimpinan secara adil, bijaksana, dan bertanggung jawab (Ihsan dkk., 2024). Oleh karena itu, ketika terjadi pencemaran air atau kerusakan ekosistem sebagai akibat dari aktivitas manusia, maka kewajiban manusia sebagai khalifah adalah melakukan perbaikan dan mencegah terjadinya kerusakan lebih lanjut. Upaya konservasi, pemulihan lingkungan, serta pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan merupakan manifestasi nyata dari tanggung jawab tersebut. Tidak cukup hanya dengan menyadari kesalahan, manusia juga dituntut untuk mengambil tindakan konkret guna menjaga keseimbangan alam yang telah diciptakan oleh Allah SWT, sehingga tidak memperburuk kondisi lingkungan yang dapat menimbulkan dampak negatif bagi makhluk hidup lainnya, termasuk generasi mendatang.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 20 Tahun 1990 tentang Pengendalian Pencemaran Air, pencemaran air didefinisikan sebagai masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau

komponen lain ke dalam air oleh aktivitas manusia yang menyebabkan turunnya kualitas air sehingga tidak dapat berfungsi sesuai peruntukannya. Pencemaran ini dapat menyebabkan perubahan sifat fisik, kimia, dan biologis air yang dapat dikenali melalui berbagai indikator, seperti perubahan fisik (kekeruhan, warna, bau, dan suhu), kimia (pH, kandungan zat terlarut, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan *Chemical Oxygen Demand* (COD), serta indikator biologis seperti keberadaan mikroorganisme patogen. Berdasarkan data Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), sekitar 75% sungai di Indonesia tercemar berat akibat limbah domestik dan industri (KLHK, 2023). Sementara itu, Kementerian Kesehatan mencatat bahwa penyakit diare akibat konsumsi air tercemar masih menjadi salah satu penyebab utama kematian pada balita. Data ini menunjukkan bahwa pencemaran air tidak hanya berdampak pada kualitas lingkungan, tetapi juga menimbulkan ancaman serius terhadap kesehatan masyarakat.

Salah satu zat pencemar yang banyak dijumpai di ekosistem adalah logam berat seperti Timbal (Pb) dan tembaga (Cu). Logam berat tersebut ditemukan pada beberapa aktivitas manusia pada transportasi darat dan pertambangan yang menggunakan aspal, dalam aspal terdapat logam Pb. Kemudian logam Cu ditemukan pada berbagai peralatan sehari-hari yang diproduksi dengan elektroplating. Menurut Bubala dkk. (2019), logam berat umumnya bersifat beracun dan sulit larut dalam air, sehingga cenderung menimbulkan pencemaran. Logam berat dapat masuk ke tubuh organisme dan tidak mudah dikeluarkan. Zat beracun ini akan terus menumpuk dalam

jaringan tubuh. Logam berat tidak bisa hilang secara permanen karena berpindah dari satu organisme ke organisme yang lain melalui rantai makanan. Menurut penelitian oleh Widowati (2018) menyatakan bahwa paparan logam berat dalam jumlah subletal (tidak langsung mematikan) dapat memicu berbagai gangguan kesehatan yang memengaruhi sistem tubuh, seperti sistem kardiovaskular, pernapasan, saraf, kemih, reproduksi, endokrin, serta tulang, dan bahkan berpotensi menjadi penyebab munculnya penyakit kanker.

Selain logam berat, salah satu pencemar air yang berdampak serius terhadap kesehatan masyarakat adalah mikroorganisme patogen, khususnya bakteri penyebab penyakit berbasis air (*water-borne diseases*). Dari aspek mikrobiologis, air yang layak dikonsumsi harus bebas dari mikroorganisme patogen. Salah satu indikator yang umum digunakan untuk menilai kualitas mikrobiologis air bersih adalah keberadaan bakteri dari kelompok *coliform* (Riyanti dkk., 2021).

Bakteri *coliform* merupakan kelompok mikroorganisme yang digunakan sebagai indikator adanya pencemaran oleh kotoran serta kondisi sanitasi yang buruk pada air, makanan, susu, dan produk olahannya. Kelompok *coliform* ini dibagi menjadi dua, yaitu *coliform* fekal dan non-fekal. *Coliform* fekal adalah *coliform* yang berasal dari feses hewan berdarah panas dan manusia, contohnya *Escherichia coli*. Sementara *coliform* non-fekal adalah *coliform* yang ditemukan pada hewan atau tumbuhan yang telah mati, contohnya *Enterobacter aerogenes* (Fardiaz, 2003). Keberadaan bakteri *coliform*, khususnya *E. coli*, dapat berdampak negatif terhadap kesehatan

manusia dan menimbulkan beberapa penyakit seperti kolabasilosis (Balía dan Putranto, 2024), infeksi saluran kemih (Fauziansyah dan Arifin, 2025), dan diare (Putriningsih dan Batan, 2024).

Berbagai metode konvensional telah banyak digunakan untuk mengatasi pencemaran air akibat logam berat maupun mikroorganisme, seperti presipitasi kimia, pertukaran ion, *reverse osmosis*, dan ekstraksi zat pencemar (Sam dkk, 2025). Presipitasi kimia merupakan teknik sederhana dan murah untuk mengendapkan ion logam, namun menghasilkan endapan semi-padat beracun dalam jumlah besar yang memerlukan biaya pembuangan yang tinggi (Kato & Kansha, 2024). Metode pertukaran ion efektif untuk menghilangkan ion berbahaya melalui resin kation maupun anion, tetapi biaya operasionalnya tinggi dan resin mudah jenuh sehingga perlu regenerasi secara berkala (Gupta dkk, 2012).

Reverse osmosis dikenal mampu menghilangkan hampir seluruh kontaminan terlarut termasuk logam dan bakteri, namun membutuhkan energi yang tinggi, biaya operasional besar, serta rentan mengalami *fouling* pada membran (Kapepula & Luis, 2024). Sementara itu, metode ekstraksi zat pencemar efektif untuk memisahkan kontaminan organik atau anorganik tertentu, tetapi tidak efisien pada skala besar dan relatif mahal (Mahmood dkk, 2022). Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa metode konvensional sering kali kurang optimal sehingga diperlukan pendekatan alternatif yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan teknologi filtrasi konvensional adalah pengembangan material berbasis nanofiber melalui nanoteknologi. Nanofiber menawarkan sifat unggul seperti luas permukaan tinggi, porositas terkontrol, dan kemampuan membawa agen aktif, menjadikannya ideal sebagai media filtrasi multifungsi. Dalam konteks ini, kombinasi polivinil asetat (PVAc) dengan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4) muncul sebagai solusi inovatif. PVAc dipilih sebagai matriks polimer karena sifat hidrofilik, biodegradabilitas, dan kemampuannya membentuk serat homogen melalui *electrospinning* (Zhang dkk., 2023), Fe_3O_4 berperan ganda yaitu sebagai agen antibakteri dengan menghasilkan *reactive oxygen species* (ROS) yang dapat membunuh bakteri (Li dkk., 2022), serta sebagai material magnetik yang mampu menyerap polutan dan mudah dipisahkan dari air menggunakan medan magnet (Wang dkk., 2024).

Proses pembuatan nanofiber dapat dilakukan menggunakan beberapa metode salah satu nya metode *electrospinning*. *Electrospinning* merupakan teknik sederhana namun efisien yang memanfaatkan gaya elektrostatik untuk menarik larutan polimer menjadi serat berdiameter nano. Melalui teknik ini, struktur dan morfologi nanofiber dapat dikontrol secara presisi, mulai dari ukuran diameter, pori, hingga desain kompleks seperti serat berongga, berlapis inti-kulit (*core-shell*), atau tersusun sejajar. Metode ini juga sangat fleksibel dalam hal material, karena memungkinkan penggunaan berbagai jenis polimer, oksida logam, maupun material komposit sesuai kebutuhan aplikatif (Cho, 2025). Dalam konteks penanganan pencemaran air,

electrospinning memungkinkan pembuatan nanofiber dengan kombinasi material yang bersifat adsorben sekaligus antibakteri, seperti PVAc yang dimodifikasi dengan partikel Fe_3O_4 . Kombinasi ini menghasilkan material filtrasi multifungsi yang mampu menyaring logam berat dan menonaktifkan mikroorganisme patogen, menjadikan *electrospinning* sebagai pendekatan unggul dalam pengembangan solusi pemurnian air yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan.

Meskipun *electrospinning* telah banyak digunakan untuk sintesis nanofiber, kombinasi PVAc/ Fe_3O_4 untuk aplikasi adsorpsi dan antibakteri masih jarang dieksplorasi, terutama dalam konteks optimasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 untuk meningkatkan kinerja membran. Penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi nanofiber berbasis PVAc yang dimodifikasi dengan nanopartikel Fe_3O_4 menggunakan metode *electrospinning*, kemudian mengkarakterisasi sifat fisiko-kimia dengan uji *Scanning electron microscope- Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (SEM-EDX), *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Water Contact Angle* (WCA). Uji karakterisasi SEM digunakan untuk analisis morfologi permukaan dari nanofiber dan EDX digunakan untuk menganalisis komponen unsur yang terdapat nanofiber, XRD digunakan untuk menentukan struktur kristal, sedangkan WCA digunakan untuk menguji sifat hidrofilisitasnya.

Dalam penelitian ini, nanofiber PVAc/ Fe_3O_4 akan diaplikasikan sebagai adsorben logam berat Pb dan antibakteri. Keefektifan aplikasi diuji melalui dua pendekatan, yaitu uji adsorpsi logam berat Pb menggunakan metode

batch serta uji daya hambat terhadap bakteri dengan metode *disk diffusion*. Hasilnya diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan teknologi filtrasi air berkelanjutan yang tidak hanya menyaring polutan, tetapi juga secara aktif membunuh bakteri patogen seperti *E. coli* sehingga menawarkan solusi lebih komprehensif dibandingkan membran konvensional.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan yang akan diteliti pada penelitian ini. Rumusan masalah tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara mensintesis nanofiber PVAc/Fe₃O₄ menggunakan metode *electrospinning*?
2. Bagaimana karakteristik morfologi, struktur kristal, komposisi unsur dan sifat hidrofilik dari nanofiber PVAc/Fe₃O₄ yang dihasilkan?
3. Seberapa efektif nanofiber PVAc/Fe₃O₄ dalam mengadsorpsi logam berat (Pb)?
4. Seberapa efektif nanofiber PVAc/Fe₃O₄ menghambat pertumbuhan bakteri *Escherichia coli*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan masalah yang telah dirumuskan, maka disusun tujuan penelitian untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mensintesis nanofiber PVAc dengan Fe₃O₄ dengan metode *electrospinning*

2. Mengkarakterisasi nanofiber PVAc/Fe₃O₄ menggunakan SEM-EDX, XRD dan WCA.
3. Mengevaluasi efektivitas kinerja adsorpsi nanofiber PVAc/Fe₃O₄ terhadap penyerapan logam berat timbal (Pb) dengan metode *batch*.
4. Mengevaluasi efektivitas antibakteri dari produk nanofiber PVAc/Fe₃O₄ terhadap bakteri E.coli dengan metode *disk diffusion*.

1.4 Batasan Penelitian

Dalam merealisasikan tujuan penelitian, perlu diberi batasan agar penelitian dapat terfokus pada permasalahan yang telah dirumuskan . batasan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah nanopartikel magnetit Fe₃O₄ dengan variasi konsentrasi 3% dan 5% serta polimer polivinil asetat (PVAc) 15 %.
2. Proses sintesis nanofiber dilakukan menggunakan metode *electrospinning* dan tidak mencakup metode sintesis lainnya.
3. Karakterisasi nanofiber terbatas pada uji SEM-EDX, WCA, dan XRD
4. Uji adsorpsi logam berat hanya berfokus pada timbal (Pb) dengan metode *batch*.
5. Uji aktivitas antibakteri hanya dilakukan terhadap bakteri E.coli dengan metode *disk diffusion*.

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian aini, diharapkan dapat memperoleh manfaat. Manfaat yang diharapkan tersebut antara lain sebagai berikut.

1. Menjadi kontribusi ilmiah dalam pengembangan material nanofiber multifungsi untuk aplikasi adsorpsi logam berat di perairan dan pengendalian mikroorganisme patogen.
2. Memberikan alternatif teknologi adsorpsi logam berat yang lebih efektif dan berkelanjutan melalui pemanfaatan material berbasis PVAc/Fe₃O₄.
3. Menyediakan informasi awal mengenai hubungan antara konsentrasi Fe₃O₄ dan performa adsorpsi serta antibakteri nanofiber yang dihasilkan.
4. Menjadi acuan bagi penelitian lanjutan dalam bidang nanoteknologi dan rekayasa material untuk aplikasi lingkungan dan kesehatan.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk memfabrikasi dan mengkarakterisasi nanofiber PVAc/Fe₃O₄ menggunakan metode *electrospinning* serta mengevaluasi kinerjanya sebagai media adsorpsi ion logam berat Pb(II) dan agen antibakteri terhadap *Escherichia coli*. Adapun dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Nanofiber PVAc/Fe₃O₄ berhasil disintesis dengan menggunakan metode *electrospinning*. Nanofiber yang terbentuk memiliki morfologi yang halus dan seragam tanpa adanya *beads* yang menunjukkan bahwa metode *electrospinning* efektif untuk menghasilkan nanofiber berbahan dasar polivinil asetat yang dikombinasikan nanopartikel magnetik Fe₃O₄.
2. Karakterisasi morfologi menggunakan SEM menunjukkan bahwa nanofiber PVAc/Fe₃O₄ memiliki struktur serat kontinu dengan distribusi diameter yang relatif seragam. Rata-rata diameter nanofiber PVAc/Fe₃O₄ dengan konsentrasi Fe₃O₄ sebesar 5% dan 3% berturut-turut adalah 388,46 nm dan 409,82 nm. Analisis XRD mengonfirmasi keberadaan fase kristalin Fe₃O₄ dalam matriks PVAc dengan tingkat kristalinitas sebesar 71,8%. Sementara itu, pengukuran WCA menunjukkan bahwa sampel PVAc/Fe₃O₄ 3% memiliki sudut kontak rata-rata 97,6°, sedangkan PVAc/Fe₃O₄ 5% sebesar 113,9°, yang mengindikasikan sifat permukaan cenderung hidrofobik.
3. Uji kinerja adsorpsi menunjukkan bahwa persentase penghilangan logam Pb pada nanofiber PVAc/Fe₃O₄ 3% dan 5% masing-masing

sebesar 52,3% dan 59,3%, sehingga nanofiber ini berpotensi diaplikasikan sebagai material adsorben logam berat.

4. Evaluasi aktivitas antibakteri menggunakan metode *disk diffusion* menunjukkan bahwa nanofiber PVAc/Fe₃O₄ mampu menghambat pertumbuhan *Escherichia coli* dengan diameter zona hambat rata-rata 7 mm pada konsentrasi Fe₃O₄ sebesar 5%, yang termasuk kategori sedang. Meskipun nilai tersebut lebih rendah dibandingkan kontrol positif menggunakan antibiotik amoksisilin (36 mm), hasil ini membuktikan bahwa penambahan Fe₃O₄ pada matriks PVAc memberikan kontribusi terhadap kemampuan penghambatan bakteri, sehingga nanofiber berpotensi diaplikasikan sebagai material multifungsi pada sistem adsorpsi air.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang perlu diperhatikan untuk penelitian selanjutnya Adalah:

1. Memperluas jenis logam berat yang diuji, tidak hanya Pb(II), tetapi juga menambahkan ion Cu(II) sebagai salah satu polutan berbahaya, sehingga dapat diketahui efektivitas material terhadap berbagai jenis logam.
2. Tidak hanya menggunakan bakteri *Escherichia coli* sebagai model uji, tetapi juga menambahkan uji pada bakteri Gram-positif seperti *Staphylococcus aureus* sehingga dapat diperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai spektrum aktivitas antibakteri dari nanofiber PVAc/Fe₃O₄.
3. Melengkapi karakterisasi material dengan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengidentifikasi gugus fungsi yang terlibat

dalam proses adsorpsi serta mengonfirmasi interaksi kimia antara nanopartikel Fe_3O_4 , matriks PVAc.

4. Menambahkan variasi konsentrasi nanopartikel Fe_3O_4 yang lebih luas serta melakukan variasi rasio antara polimer dengan matriksnya, sehingga dapat diketahui pengaruh perbandingan komposisi tersebut terhadap morfologi, sifat mekanik, serta kinerja fungsional nanofiber yang dihasilkan.

Daftar Pustaka

- Abdulhussain, R., Adebisi, A., Conway, B. R., & Asare-Addo, K. (2023). Electrospun nanofibers: Exploring process parameters, polymer selection, and recent applications in pharmaceuticals and drug delivery. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 90, 105156.
- Afifudin, A. F. M., Wulandari, A., & Irawanto, R. 2024. Pencemaran Logam Berat di Air, Sedimen, dan Organisme pada Beberapa Sungai di Pulau Jawa, Indonesia: Tinjauan Literatur. *Environmental Pollution Journal*, 4(1), 959–971. <https://doi.org/10.58954/epj.v4i1.183>
- Aflaha, R., Maharani, C. N., Prabowo, Y. D., Roto, R., Gupta, R., Wasisto, H. S., Rianjanu, A., Putri, W. B. K., & Triyana, K. 2025. Environmentally friendly waterproof and breathable nanofiber membranes with ultra-low pressure drop and high performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 711, 136319. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136319>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. 2019. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019, 1–14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Balusamy, B., Senthamizhan, A., & Uyar, T. (2020). Functionalized Electrospun Nanofibers as a Versatile Platform for Colorimetric Detection of Heavy Metal Ions in Water: A Review. *Materials*, 13(10), 2421. <https://doi.org/10.3390/ma13102421>
- Bao, S., Yang, W., Wang, Y., Yu, Y., & Sun, Y. 2020. One-pot synthesis of magnetic graphene oxide composites as an efficient and recoverable adsorbent for Cd(II) and Pb(II) removal from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120914. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120914>
- Basavaraju, M., & Gunahree, B. S. 2022. Escherichia coli: an overview of main characteristics. *Escherichia coli-Old and New Insights*.
- Boldyrev, M. 2018. Lead: properties, history, and applications. *WikiJournal of Science*, 1(2). <https://doi.org/10.15347/wjs/2018.007>
- Bubala, A., Nduka, A., & Nwoke, B. 2019. Heavy Metal Contamination in Urban Areas: A Review. *Environmental Health Perspectives*, 127(4): 440-450.

- Chen, S., Xie, Y., Ma, K., Wei, Z., Ran, X., Fu, X., Zhang, C., & Zhao, C. 2024. Electrospun nanofibrous membranes meet antibacterial nanomaterials: From preparation strategies to biomedical applications. *Bioactive Materials*, 42, 478–518. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2024.09.003>
- Cho, Y., Beak, J. W., Sagong, M., Ahn, S., Nam, J. S., & Kim, I. D. 2025. *Electrospinning* and nanofiber technology: fundamentals, innovations, and applications. *Advanced Materials*, 2500162.
- Chowdhury, T., D'Souza, N., & Berman, D. (2021). Electrospun Fe₃O₄-PVDF Nanofiber Composite Mats for Cryogenic Magnetic Sensor Applications. *Textiles*, 1(2), 227–238. <https://doi.org/10.3390/textiles1020011>
- Croxen, M.A., & Finlay, B.B. 2010. Molecular mechanism of *Escherichia coli* pathogenicity. *Nature Reviews Microbiology*, 8(1): 26–38.
- Dubinin, M. M., & Radushkevich, L. V. 1947. Equation of the characteristic curve of activated charcoal. *Proceedings of the Academy of Sciences USSR, Physical Chemistry Section*, 55, 331–337.
- Fardiaz, S. 2003. *Polusi Air dan Udara*. Jakarta: Kanisius.
- Fauziansyah, R. & Arifin, H. 2025. *Bakteri dan Penyakit: E. coli dalam Infeksi Saluran Kemih*. Yogyakarta: Biomedika Press.
- Flora G, Gupta D, Tiwari A. 2012. Toxicity of lead: A review with recent updates. *Interdiscip Toxicol* 5: 47–58.
- Fulanjari, I. D., Suryandari, E. T., & Kusuma, H. H. (2024). Synthesis and Characterization Membrane Nanofibers Cellulose Acetate-Zeolite for Metal Pb (II) Adsorption. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 27(7), 346–353.
- Gudkov SV, Burmistrov DE, Serov DA, Rebezov MB, Semenova AA, Lisitsyn AB. Do Iron Oxide Nanoparticles Have Significant Antibacterial Properties? *Antibiotics* (Basel). 2021 Jul 20;10(7):884. doi: 10.3390/antibiotics10070884. PMID: 34356805; PMCID: PMC8300809.
- Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012). Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview. *RSC advances*, 2(16), 6380–6388.
- Ghorbani, F., Younesi, H., & Ghasemi, M. 2011. Comparative adsorption study

- of Pb(II), Cd(II), and Ni(II) ions by modified spent grain: Equilibrium and kinetic modeling. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 17(4), 703–709.
- Graciano Alvarez, A. K., Dotter, M., Tuvshinbayar, K., Bondzio, L., Ennen, I., Hütten, A., Blachowicz, T., & Ehrmann, A. (2024). Electrospinning Poly(acrylonitrile) Containing Magnetite Nanoparticles: Influence of Magnetite Contents. *Fibers*, 12(3), 19. <https://doi.org/10.3390/fib12030019>
- Guyett, P. C., Chew, D., Azevedo, V., Blennerhassett, L. C., Rosca, C., & Tomlinson, E. (2024). Optimizing SEM-EDX for fast, high-quality and non-destructive elemental analysis of glass. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 39(10), 2565-2579.
- Hadisoebroto, G. (2021). Penentuan kadar logam timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada sumber air di Kawasan Gunung Salak Kabupaten Sukabumi dengan metode spektrofotometri serapan atom (SSA). *Jurnal Sabdariffarma: Jurnal Ilmiah Farmasi*, 9(2), 15-24.
- He, X., Zhang, Q., & Wang, J. 2015. Sources and fate of heavy metals in domestic and industrial wastewater: implications for water pollution control. *Environmental Pollution*, 200: 123–135.
- Huang, L., Zhang, M., Li, C., Liu, J., & Wei, Y. 2017. Adsorption behavior of heavy metal ions from aqueous solution by starch-based hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 151, 610–616.
- Ihsan, M., Lestari, T., & Ramadhan, A. 2024. Etika Lingkungan dalam Islam. Jakarta: Rumah Ilmu.
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B., & Beeregowda, K. N. 2014. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60–72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Kapepula, V. L., & Luis, P. (2024). Removal of heavy metals from wastewater using reverse osmosis. *Frontiers in Chemical Engineering*, 6, 1334816.
- Kato, S., Kansha, Y. Comprehensive review of industrial wastewater treatment techniques. *Environ Sci Pollut Res* 31, 51064–51097 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34584-0>
- Khajavi, R., & Abbasipour, M. (2017). Controlling nanofiber morphology by the electrospinning process. In *Electrospun nanofibers* (pp. 109-123). Woodhead Publishing.

- KLHK. 2023. Laporan Kualitas Air Nasional Tahun 2022. Jakarta: Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Lange, H. (2011). Emulsion polymerization of vinyl acetate with renewable raw materials as protective colloids.
- Lanphear, B. P., Hornung, R., Khoury, J., Yolton, K., Baghurst, P., Bellinger, D. C., ... & Roberts, R. 2005. Low-level environmental lead exposure and children's intellectual function: An international pooled analysis. *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 894–899.
- Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: Reinventing the wheel? *Advanced Materials*, 16(14), 1151–1170. <https://doi.org/10.1002/adma.200400719>
- Li, X., Chen, Y., & Zhao, L. 2022. Antibacterial activity of Fe₃O₄ nanoparticles through ROS-mediated pathways against *E. coli* and *S. aureus*. *Journal of Environmental Nanotechnology*, 11(1): 55–63.
- Mahmood, T., Momin, S., Ali, R., Naeem, A., & Khan, A. (2022). Technologies for Removal of Emerging Contaminants from Wastewater. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.104466
- Mamun A, Sabantina L, Klöcker M, Heide A, Blachowicz T, Ehrmann A. Electrospinning Nanofiber Mats with Magnetite Nanoparticles Using Various Needle-Based Techniques. *Polymers* (Basel). 2022 Jan 28;14(3):533. doi: 10.3390/polym14030533. PMID: 35160526; PMCID: PMC8839327.
- Pan, W., Han, R., Chi, X., Liu, Q., & Wang, J. (2013). Ferromagnetic Fe₃O₄ nanofibers: electrospinning synthesis and characterization. *Journal of alloys and compounds*, 577, 192-194.
- Petras, D., Slobodian, P., Pavlinek, V., Saha, P., & Kimmer, D. 2011. The effect of PVAc solution viscosity on diameter of PVAc nanofibres prepared by technology of *electrospinning*. *AIP Conference Proceedings*, 1375(1), 312–319. <https://doi.org/10.1063/1.3604491>
- Putriningsih, D. & Batan, L. 2024. Studi Klinis Diare Akibat *E. coli* pada Anak. Surabaya: Graha Medika.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W. E., Lim, T. C., & Ma, Z. (2005). *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. Singapore: World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1142/5894>
- Rahayu, W. P., Nurjanah, S., & Komalasari, E. (2018). *Escherichia coli*:

Patogenitas, analisis dan kajian risiko. Bogor: IPB Press.

- Rifzikka, S. A. 2024. Studi Analisis Tafsir Surah Ar-Rum Ayat 41 tentang Kerusakan Lingkungan. *Journal of Islamic Studies and Humanities*, 9(2): 254–298. <https://doi.org/10.21580/jish.v9i2.23659>
- Riyanti, L., Sari, M., & Hapsari, R. 2021. Kualitas Mikrobiologis Air Minum dan Pencegahannya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 13(2): 120–128.
- Salih, R. M., & Kadhim, H. J. 2023. Nanofiber composite for anti-bacterial application by *electrospinning* technique. *Kuwait Journal of Science*, 50, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.01.008>
- Sam, R., Kurniawan, T., & Wijaya, H. 2025. Evaluasi Metode Konvensional dalam Pengolahan Air Tercemar Logam Berat dan Mikroorganisme. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 19(1): 33–48.
- Saumi, F. A. F. (2017). *Modifikasi membran nanofiber polyacrylonitrile (PAN) menggunakan ethylenediamine (EDA) dan ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA) untuk adsorpsi Pb(II) & Cu(II)* (Skripsi, Universitas Gadjah Mada). Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Yogyakarta.
- Sihombing, R. P., & Ngatin, A. (2019). Modifikasi Homopolimer Poli(Vinil Asetat) dengan Variabel Hidrofobisitas Emulsifier untuk Aplikasi Perkayuan. *Jurnal Fluida*, 12(2), 72–77.
- Sulistiyowati, E., Melati, A., & Uyun, S. 202. *Kualitas air: Dari baku mutu hingga teknologi pengolahan dan pemantauan*. CV. Science Tech Group.
- Susanto, A., Zannah, M., Putro, E. K., Manuel, A. A., Yochu, W. E., & Mahlisa, R. 2024. Penilaian status kualitas air baku untuk air minum di area Concentrating Division PT Freeport Indonesia. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 25(1), 88–93. <https://ejournal.brin.go.id/JTL>
- Susanto, D. S., & Ruga, R. 2012. Studi Kandungan Bahan Aktif Tumbuhan Meranti Merah (*Shorea leprosula* Miq) Sebagai Sumber Senyawa Antibakteri. *Mulawarmnan Scientifie*, 11(2), <https://onsearch.id/Record/IOS1.INLIS00000000%0A00613962> 181–180.
- Sutriati, A. 2011. Penilaian kualitas air sungai dan potensinya: Studi kasus Sungai Cimanuk. *Jurnal Sumber Daya Air*, 7(1), 1–12.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. 2012. Heavy metal toxicity and the environment. In Luch, A. (Ed.), *Molecular*,

Clinical and Environmental Toxicology (Vol. 101, pp. 133–164). Springer.

- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 2011. *Drinking water regulations and contaminants*. Diakses 20 maret 2025 dari <https://www.epa.gov>
- Vo, L. Q., Vu, A.-T., Le, T. D., Huynh, C. D., & Tran, H. V. 2024. Fe₃O₄/graphene oxide/chitosan nanocomposite: A smart nanosorbent for lead(II) ion removal from contaminated water. *ACS Omega*, 9(15), 17506–17517. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00486>
- Vo, T. S., Hossain, M. M., Jeong, H. M., & Kim, K. (2020). Heavy metal removal applications using adsorptive membranes. *Nano Convergence*, 7, Article 36.
- Wang, J., Liu, H., & Tang, Y. 2024. Magnetic Fe₃O₄ nanocomposites for water purification: Synthesis, properties, and environmental applications. *Advanced Materials for Water Treatment*, 18(3): 201–217.
- Widowati, W. 2018. Pengaruh Paparan Logam Berat Terhadap Kesehatan Manusia. *Jurnal Toksikologi Indonesia*, 4(1): 11–21.
- World Health Organization (WHO). 2017. Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first addendum. Diakses 20 Maret 2025 dari <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Yamini, N., & Begum, S. A. (2020). A comprehensive overview on nanofiber technology and their advancements in the field of pharmaceuticals. *International Journal of Research in Pharmaceutical Sciences and Technology*, 2(2), 51-58.
- Yang, F., Zhu, F., Shi, H., Dong, X., Sheng, J., & Zhou, J. (2025). Magnetic Nanofibers in Heavy Metal Arsenic (V) Pollution Control Research. *Langmuir*, 41(14), 9392-9405.
- Zhang, J., Xue, Y., Zhang, L., Chen, J., Ma, D., Zhang, Y., & Han, Y. (2023). A Targeted Core–Shell ZIF-8/Au@ Fe₃O₄ Platform with Multiple Antibacterial Pathways for Infected Skin Wound Regeneration. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(14), 20901-20918.
- Zubair, A., Bhatti, H. N., Hanif, M. A. & Shafqat, F. 2008. Kinetic and equilibrium modeling for Cr(III) and Cr(VI) removal from aqueous solutions by citrus reticulate waste biomass. *Water, Air, and Soil Pollution*, 191(1–4): 305–318.