

**PENINGKATAN AKTIFITAS SEMIKONDUKTOR ZnO DENGAN
SENYAWA FERIT UNTUK APLIKASI FOTOKATALITIK DALAM
PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL**

DISERTASI

Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Teknik



Diajukan oleh :

YUNIAR

B.K.U TEKNIK KIMIA

03013681924012

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU TEKNIK
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2024**

HALAMAN PENGESAHAN

PENINGKATAN AKTIFITAS SEMIKONDUKTOR ZnO DENGAN SENYAWA FERIT UNTUK APLIKASI FOTOKATALITIK DALAM PENGOLAHAN AIR LIMBAH INDUSTRI TEKSTIL

DISERTASI

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor Ilmu Teknik
pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:

YUNIAR
03013681924012

Indralaya, 12 Januari 2024

Promotor



Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D
NIP 197208092000032001

Ko-Promotor 1



Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati H, M.Si
NIP 196808271994022001

Ko-Promotor 2



Prof. Dr. Ir. M. Faizal, DEA
NIP 195805141984031001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T.
NIP 196706151995121002

Ketua Program Studi



Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP 195903211987031001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa disertasi dengan judul "Peningkatan Aktifitas Semikonduktor ZnO Dengan Senyawa Ferit Untuk Aplikasi Fotokatalitik dalam Pengolahan Air Limbah Tekstil" telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya pada tanggal 12 Januari 2024

Indralaya, 12 Januari 2024

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Disertasi
Ketua:

Dr. Bhakti Yudho Suprpto, S.T., M.T.
NIP 197502112003121002

()

Penguji:

1. Prof. Dr. Ir. Muhammad Said, M.Sc.
NIP 196108121987031003

()

2. Prof. Dr. Ir. Leila Kalsum, M.T.
NIP 196212071989032001

()

3. Dr. David Bahrin, S.T., M.T.
NIP 198110312005011003

()

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T.
NIP 196706151995121002



Ketua Program Studi

Prof. Dr. Ir. Nukman, M.T.
NIP 195903231987031001



HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yuniar
NIM : 03013681924012
Judul : Peningkatan Aktifitas Semikonduktor ZnO Dengan
Senyawa Ferit Untuk Aplikasi Fotokatalitik dalam
Pengolahan Air Limbah Tekstil

Menyatakan bahwa Disertasi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim Promotor dan Ko-Promotor, bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Disertasi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Disertasi ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Palembang, Januari 2024



Yuniar
NIM 03013681924012

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Yuniar dilahirkan di Palembang pada tanggal 21 Juni 1973. Anak ke tiga dari lima bersaudara dari pasangan Zaini Matcik dan Mastina. Pendidikan SD sampai SMA di tempuh di kota Palembang. Pada tahun 1991 setelah lulus dari jenjang SMA melanjutkan pendidikan pada Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya dan meraih gelar Sarjana

Teknik pada tahun 1997. Pada tahun 1999 sampai sekarang penulis mengajar di Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya. Penulis melanjutkan pendidikan S2 Program studi Ilmu Pangan di Institut Pertanian Bogor pada tahun 2003 dan selesai tahun 2006. Setelah menyelesaikan S2, penulis melanjutkan kembali sebagai dosen. Di tahun 2019, penulis memutuskan untuk melanjutkan studi S3 Ilmu Teknik di Universitas Sriwijaya dengan bidang kajian Teknik Kimia. Topik penelitian tentang fotokatalis, berdasarkan arahan Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D selaku Promotor, Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si dan Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA selaku Ko-Promotor penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “Peningkatan Aktifitas Semikonduktor ZnO Dengan Senyawa Ferit Untuk Aplikasi Fotokatalitik dalam Pengolahan Air Limbah Tekstil”.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmaanirrahim.....

Alhamdulillah, atas kehadiran Allah SWT dengan kemurahan dan ridho-Nya, Disertasi ini dapat ditulis dengan baik dan lancar sehingga bisa diselesaikan., Dengan ini akan kupersembahkan Disertasi ini kepada:

Kedua orang tua ku tersayang Alm H. M. Zaini Matcik dan ibu Hj. Mastina yang tak hentinya selalu memberikan semangat, motivasi dan doa sehingga bisa menyelesaikan tugas belajar.

Suami tercinta Ibrahim, S.T., M.T teman hidup dan pendamping setia, terimakasih atas cinta, dukungan dan pengorbananmu yang tak terhingga.

Dosen ku Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D, Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si dan Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA selaku Promotor dan Ko-Promotor yang telah sabar membimbing, memotivasi, menasehati serta memberikan ilmu yang bermanfaat sehingga saya dapat menyelesaikan Disertasi ini. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang telah diberikan dan tidak akan pernah melupakan jasa yang telah diberikan..

Saudaraku tercinta M. Yasin, S.E, M. Yamin, S.T, M. Yahya Amd dan Yudia, SSi dan Ipar ku Sepriana Zahara, S.Pd, Yuli Nilayanti, S.H, Nur'aeni, Mirna Siti Amina dan R. A. Hilmy yang selalu memberi semangat serta keponakan tersayang Maryam Seyaski, S.T, M.Yardan Amd, M. Fajri Yanurian, M. Juan Fifaldi, M. Fillardi, R.M. Ilham, R.M. Ilyas dan R.A Ilaya sebagai penghibur dikala sulitnya mengerjakan Disertasi.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “Peningkatan Aktifitas Semikonduktor ZnO dengan Senyawa Ferit untuk Aplikasi Fotokatalitik dalam Pengolahan Air Limbah Industri Tekstil”.

Dengan tersusunnya Penelitian Disertasi ini, penulis mengucapkan terimakasih dan penghargaan kepada Yth. Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D, Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si dan Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA selaku Promotor dan Ko-Promotor yang telah memberi bimbingan, arahan dan masukan atas tersusunnya Disertasi ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih dan penghargaan kepada Yth:

1. Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si, Rektor Universitas Sriwijaya
2. Prof. Dr. Ir. Benyamin Lakitan, M.Sc, Direktur Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya
3. Prof. Dr. Eng. Ir. Joni Arliansyah, M.T, Dekan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
4. Prof. Dr.. Ir. Nukman, M.T, Ketua Program Studi Doktor Ilmu Teknik Universitas Sriwijaya
5. Prof. Dr. Ir. M. Said, M.Sc, Prof. Dr. Ir. Leila Kalsum, M.T dan Dr. David Bahrin, S.T., M.T, sebagai Tim Penguji yang memberikan masukan dan saran yang membangun untuk Disertasi ini.
6. Semua Dosen Program Studi Doktor Ilmu Teknik Universitas Sriwijaya
7. Staf administrasi Ilmu Teknik Program Doktor Universitas Sriwijaya
8. Teman-teman seangkatan dan seperjuangan
9. Semua pihak yang telah membantu yang tidak bisa penulis tuliska satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penulisan Disertasi ini masih terdapat kekurangan dan kekeliruan. Oleh karena itu, masukan dan saran yang membangun sangat penulis harapkan sebagai referensi dimasa yang akan datang.

Akhir kata, penulis mengucapkan terimakasih dan semoga Allah, SWT membalas semua kebaikan untuk semua pihak yang telah membantu. Semoga Disertasi ini bermanfaat bagi kita semua.

Palembang, Januari 2024

Penulis,

Yuniar

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS	iv
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR SINGKATAN	xvii
RINGKASAN	xviii
SUMMARY	xix
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Manfaat Penelitian	9
1.5 Peta Jalan dan Kebaruan (Novelty)	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	13
2.1 Limbah Industri Tekstil	13
2.2 Teknik Pengolahan Limbah.....	15
2.2.1 Metode Filtrasi	15
2.2.2 Metode Sedimentasi	16
2.2.3 Flotasi	17
2.2.4 Adsorpsi	18
2.2.5 Metode Sinar Ultra Violet (UV).....	20
2.2.6 Oksidasi Kimia.....	21
2.2.7 Koagulasi	21

2.2.8 Flokulasi.....	22
2.2.9 Metode Proses Oksidasi Lanjut.....	22
2.2.10 Metode Elektrokoagulasi-Flotasi	23
2.3 Zat warna	23
2.3.1 Klasifikasi Zat Warna	23
2.3.2 Zat Warna Azo	27
2.3.3 Metilen Biru	28
2.3.4 Metil Oranye	29
2.4 Fotokatalis	30
2.4.1 Mekanisme Fotokatalis	31
2.4.2 Fotokatalis Semikonduktor ZnO dan Modifikasinya	33
2.4.3 Nanomaterial, Nanopartikel, Nanokomposit	35
2.4.4 Nanomagnetik Partikel (MNPs)	37
2.4.5 Modifikasi permukaan nanopartikel magnetik.....	38
2.4.5.1 Nanopartikel ZnO	40
2.4.5.2 Nanopartikel Fe ₃ O ₄	43
2.4.5.3 Nanopartikel MnFe ₂ O ₄	44
2.4.5.4 Nanopartikel NiFe ₂ O ₄	45
2.4.5.5 Nanokomposit ZnO/ NiFe ₂ O ₄	45
2.4.5.6 Nanokomposit ZnO/MnFe ₂ O ₄	46
2.4.5.7 Nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄	47
2.5 Metode Sintesis Nanopartikel.....	48
2.5.1 Metode Sonokimia.....	48
2.5.2 Metode kopresipitasi.....	49
2.5.3 Sintesis Hidrothermal	52
2.5.4 Proses Solvotermal	53
2.5.5 Proses Mikroemulsi	54
2.6 Karakterisasi Fotokatalis	55
2.6.1 X-Ray Diffraction (XRD)	55
2.6.2 Scanning Electron Microscopy (SEM).....	58
2.6.3 Energy Dispersive X-Ray (EDS)	60

2.6.4 Fourier Transform Infrared (FTIR)	61
2.6.5 Vibrating Sample Magnetometer (VSM)	62
2.6.6 Spektrofotometri UV-Vis	64
2.7 Kinetika Laju Fotodegradasi.....	66
2.7.1 Model Kinetika Orde Satu	68
2.7.2 Model Kinetika Orde Dua.....	70
2.7.3 Model Kinetika Orde Tiga	71
2.7.4 Model Kinetika Weber dan Morris	71
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	72
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	72
3.2 Bahan dan Alat Penelitian	72
3.3 Metode Penelitian	73
3.3.1 Penelitian tahap 1. Sintesis ZnO, Fe ₃ O ₄ , NiFe ₂ O ₄ , MnFe ₂ O ₄ . Sintesis nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄ , ZnO/NiFe ₂ O ₄ dan ZnO/ MnFe ₂ O ₄	73
3.3.2 Karakterisasi Fotokatalis <i>X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy-Energi Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS), Vibrating Sample Magnetometer (VSM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (F-TIR)</i>	76
3.3.3 Penelitian Tahap 2 Uji Coba Fotokatalis mendegradasi zat warna sintesis metilen biru	78
3.3.4 Penelitian Tahap 3 Kondisi Optimum degradasi meliputi berat katalis, konsentrasi zat warna, waktu kontak dan pH.....	79
3.3.5 Penelitian Tahap 4 kinetika degradasi	81
3.3.6 Penelitian Tahap 5 Aplikasi nanokomposit fotokatalisis Pada air limbah.	82
3.3.7 Analisis Data	82
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	87
4.1 Sintesis ZnO dan ZnO/NiFe ₂ O ₄ , ZnO/MnFe ₂ O ₄ , ZnO/Fe ₃ O ₄ ..	88

4.2 Karakteristik ZnO, ZnO/NiFe ₂ O ₄ , ZnO/MnFe ₂ O ₄ , ZnO/Fe ₃ O ₄ .	91
4.2.1 Nanopartikel ZnO	91
4.2.2 Nanokomposit ZnO/NiFe ₂ O ₄	95
4.2.3 Nanokomposit ZnO/MnFe ₂ O ₄	109
4.2.4 Nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄	124
4.3 Aktifitas Fotokatalis	138
4.4 Perbandingan Ketiga Nanokomposit.....	157
4.5 Siklus Daur Ulang	159
4.6 Kinetika Reaksi Degradasi	161
4.7 Aplikasi fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ (2:0,1) untuk Pengolahan Air Limbah Industri Jumpitan.....	165
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	167
5.1 Kesimpulan.....	167
5.2 Saran.....	167
DAFTAR PUSTAKA.....	169
LAMPIRAN.....	183

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Baku Mutu Air Limbah dan Karakteristik Air Limbah Industri Kain Jumputan dan Batik Cap Palembang	14
Tabel 2.2 Kelebihan dan Kekurangan Metode Sintesis nanopartikel	49
Tabel 3.1 Sintesis ZnO/Fe ₃ O ₄ , ZnO/MnFe ₂ O ₄ dan ZnO/NiFe ₂ O ₄ dengan variasi ratio mol (ZnO : Fe ₃ O ₄ , MnFe ₂ O ₄ , NiFe ₂ O ₄)	75
Tabel 4.1 Luas Permukaan, Band gap dan Sifat Magnet Nanopartikel ZnO	95
Tabel 4.2 Sudut 2θ ZnO dan ZnO/NiFe ₂ O ₄ dibandingkan data base	97
Tabel 4.3 Elemen Penyusun ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3	100
Tabel 4.4 Karakteristik Fotokatalis ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3..	110
Tabel 4.5 Sudut 2θ ZnO dan ZnO/MnFe ₂ O ₄ dibandingkan data base	111
Tabel 4.6 Elemen Penyusun ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZMn-1, ZMn-2, ZMn-3	116
Tabel 4.7 Karakteristik Fotokatalis ZnO, MnFe ₂ O ₄ , ZMn-1, ZMn-2..... ZMn-3	123
Tabel 4.8 Elemen Penyusun ZnO, Fe ₃ O ₄ , ZFe-1, ZFe-2, ZFe-3	129
Tabel 4.9 Karakteristik Fotokatalis ZnO, Fe ₃ O ₄ , ZFe-1, ZFe-2, ZFe-3	138
Tabel 4.10 Karakteristik Fotokatalis Nanokomposit ZNi-2, ZMn-2, ZFe-2	158
Tabel 4.11 Hasil Pengujian Kinetika Reaksi Degradasi.....	162
Tabel 4.9 Penurunan nilai COD, BOD, TSS Menggunakan Fotokatalis Nanokomposit ZNi-2 terhadap Air Limbah Industri jumputan .	165

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur Kimia Molekul Metilen Biru.....	28
Gambar 2.2 Struktur Kimia Molekul Metil Oranye.....	29
Gambar 2.3 Oksidasi Fotokatalitik Heterogen.....	41
Gambar 2.4 Degradasi Polutan Menggunakan ZnO	41
Gambar 2.5 Spektrum EDX MnFe ₂ O ₄	60
Gambar 2.6 Kurva VSM dari Fe ₃ O ₄	64
Gambar 2.7 Intensitas Cahaya Sebanding Dengan Konsentrasi Larutan Sampel serta Panjang Kuvet.....	65
Gambar 3.1 Rangkaian Alat yang Digunakan	82
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	86
Gambar 4.1 Nanopartikel ZnO, Nanokomposit ZnO/NiFe ₂ O ₄ ZnO/MnFe ₂ O ₄ dan ZnO/Fe ₃ O ₄	90
Gambar 4.2 Pola XRD Nanopartikel ZnO.....	91
Gambar 4.3 SEM Nanopartikel ZnO.....	92
Gambar 4.4 Spektra EDS Nanopartikel ZnO.....	93
Gambar 4.5 Spektra FTIR Nanopartikel ZnO.....	94
Gambar 4.6 Pola XRD Nanokomposit ZnO/NiFe ₂ O ₄	96
Gambar 4.7 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ terhadap Ukuran Kristal	98
Gambar 4.8 SEM Morfologi Permukaan ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3	99
Gambar 4.9 Spektra EDS Nanopartikel ZnO.....	101
Gambar 4.10 Spektra EDS Nanopartikel NiFe ₂ O ₄	101
Gambar 4.11 Spektra EDS Nanokomposit ZNi-1 (1:0,1)	101
Gambar 4.12 Spektra EDS Nanokomposit ZNi-2 (2:0,1)	102
Gambar 4.13 Spektra EDS Nanokomposit ZNi-3 (3:0,1)	102
Gambar 4.14 Spektra FTIR ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZNi-1, ZNi-2 ZNi-3.....	103
Gambar 4.15 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ terhadap Luas Permukaan	104
Gambar 4.16 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ terhadap Nilai Band Gap	105
Gambar 4.17 Sifat Magnet ZnO, NiFe ₂ O ₄ , ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3.....	108
Gambar 4.18 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ terhadap Nilai Magnet.....	109
Gambar 4.19 Pola XRD Nanokomposit ZnO/MnFe ₂ O ₄	112
Gambar 4.20 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/MnFe ₂ O ₄ terhadap Ukuran Kristal.....	112
Gambar 4.21 SEM Nanokomposit ZnO/MnFe ₂ O ₄	114
Gambar 4.22 Spektra FTIR Nanokomposit ZnO/MnFe ₂ O ₄	116
Gambar 4.23 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/MnFe ₂ O ₄ terhadap Luas Permukaan	118
Gambar 4.24 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/MnFe ₂ O ₄ terhadap Nilai Band Gap	119

Gambar 4.25 Sifat Magnet ZnO, MnFe ₂ O ₄ , ZMn-1, ZMn-2, ZMn-3	121
Gambar 4.26 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/MnFe ₂ O ₄ Nilai Magnet .	122
Gambar 4.27 Pola XRD Nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄	124
Gambar 4.28 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/Fe ₃ O ₄ terhadap Ukuran Kristal	126
Gambar 4.29 SEM Nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄	128
Gambar 4.30 Spektra FTIR Fotokatalis Nanokomposit ZnO/Fe ₃ O ₄	131
Gambar 4.31 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/Fe ₃ O ₄ terhadap Luas Permukaan	132
Gambar 4.32 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/Fe ₃ O ₄ terhadap..... Band Gap	134
Gambar 4.33 Sifat magnet ZnO, Fe ₃ O ₄ , ZFe-1, ZFe-2 dan ZFe-3.....	136
Gambar 4.34 Pengaruh Variasi Fotokatalis ZnO/Fe ₃ O ₄ terhadap Nilai Magnet.....	137
Gambar 4.35 Pengaruh Waktu Kontak dan Variasi Fotokatalis ZnO/NiFe ₂ O ₄ terhadap degradasi Zat Warna MB	139
Gambar 4.36 pH Muatan Titik Nol (pHpzc) dengan Fotokatalis ZNi-2 ...	140
Gambar 4.37 Pengaruh pH Larutan MB terhadap Degradasi dengan ZnO/NiFe ₂ O ₄	141
Gambar 4.38 Pengaruh Konsentrasi Awal MB terhadap degradasi Menggunakan Fotokatalis ZNi-2	142
Gambar 4.39 Pengaruh Berat Katalis dan Waktu terhadap Degradasi MB dengan Fotokatalis ZNi-2	143
Gambar 4.40 Pengaruh Waktu Kontak dan Variasi Fotokatalis ZnO/MnFe ₂ O ₄ terhadap Degradasi Zat Warna MB	144
Gambar 4.41 pH Muatan Titik Nol (pHpzc) dengan Fotokatalis ZMn-2..	145
Gambar 4.42 Pengaruh pH Larutan MB terhadap Degradasi..... Menggunakan ZMn-2.....	147
Gambar 4.43 Pengaruh Konsentrasi Awal MB terhadap Degradasi Menggunakan Fotokatalis ZMn-2	148
Gambar 4.44 Pengaruh Berat Katalis dan Waktu Kontak terhadap..... Degradasi Zat Warna MB dengan Fotokatalis ZMn-2.....	149
Gambar 4.45 Pengaruh Waktu Kontak dan Variasi Fotokatalis ZnO/Fe ₃ O ₄ terhadap Degradasi Zat Warna MB	151
Gambar 4.46 pH Muatan Titik Nol (pHpzc) dengan Fotokatalis ZFe-2 ...	152
Gambar 4.47 Pengaruh pH larutan terhadap degradasi MB menggunakan Fotokatalis ZFe-2	153
Gambar 4.48 Pengaruh Konsentrasi Awal MB terhadap Degradasi Menggunakan Fotokatalis ZFe-2	154
Gambar 4.49 Pengaruh Berat Katalis dan Waktu Kontak terhadap Degradasi MB Menggunakan Fotokatalis ZFe-2.....	155
Gambar 4.50 Kemampuan Degradasi dari Ketiga Nanokomposit.....	157
Gambar 4.51 Pengaruh Waktu Kontak dan Sumber Cahaya terhadap Degradasi Zat Warna MB dengan Fotokatalis ZNi-2	158
Gambar 4.52 Siklus Daur Ulang Penggunaan Fotokatalis Nanokomposit terhadap Degradasi.....	160

Gambar 4.53 Fotokatalis Nanokomposit ZNi-2 Dipisahkan dari..... Larutan Menggunakan Magnet Eksternal	161
Gambar 4.54 Grafik Kinetika Reaksi Degradasi Orde Satu	163
Gambar 4.55 Grafik Kinetika Reaksi Degradasi Orde Dua	163
Gambar 4.56 Grafik Kinetika Reaksi Degradasi Orde Tiga.....	164
Gambar 4.57 Grafik Kinetika Reaksi Degradasi Difusi Intrapartikel	164

DAFTAR SINGKATAN

ZnO	=	Zinc oxide
MB	=	Methylene blue
ZNi	=	Zinc Nickel
ZMn	=	Zinc Mangan
ZFe	=	Zinc Ferric
UV	=	Ultra Violet
VB	=	Valence Band
CB	=	Conduction Band
FTIR	=	Fourier Transform Infrared Spectroscopy
VSM	=	Vibrating Sample Magnetometer
XRD	=	X-ray Diffraction
SEM	=	Scanning Electron Microscope
EDX	=	Energy Dispersive X-Ray
BET	=	Brunnaeur Emmet Teller
pHpzc	=	pH Point Zero Charge
JCPDS	=	Joint Committee on Powder Diffraction Standards

RINGKASAN

PENINGKATAN AKTIFITAS SEMIKONDUKTOR ZNO DENGAN SENYAWA FERIT UNTUK APLIKASI FOTOKATALITIK DALAM PENGOLAHAN AIR LIMBAH TEKSTIL

Karya Tulis Ilmiah Berupa Disertasi, 12 Januari 2024

Yuniar dibimbing oleh Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D, Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si dan Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA

Program Studi Doktor Ilmu Teknik, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya

Zink oksida (ZnO) adalah material yang ramah lingkungan tanpa pengaruh resiko kehidupan organisme, kesehatan manusia dan lingkungan. Namun, proses fotokatalisis ZnO kebanyakan menggunakan sumber sinar UV karena energi celah pita ZnO cukup besar yaitu 3,37 eV sehingga bila menggunakan sinar matahari kurang efisien karena fraksi sinar UV hanya 5% yang terkandung didalam sinar matahari, mengurangi kelemahan ZnO maka dimodifikasi dengan menambahkan senyawa ferit. Penelitian ini bertujuan mendapatkan kondisi optimum pengolahan air limbah tekstil menggunakan semikonduktor ZnO yang dimodifikasi dengan senyawa ferit (NiFe_2O_4 , MnFe_2O_4 , Fe_3O_4) dengan metode kopresipitasi dan mendapatkan satu nanokomposit dan rasio ZnO:senyawa ferit yang dapat mendegradasi dengan efektif zat warna metilen biru (MB), Ada 5 tahap penelitian ini yaitu (a) Mensintesis nanokomposit fotokatalis ZnO, ZnO/ Fe_3O_4 (ZFe-1, ZFe-2, ZFe-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1), ZnO/ NiFe_2O_4 (ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1), ZnO/ MnFe_2O_4 (ZMn-1, ZMN-2, ZMn-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1) ZnO/ NiFe_2O_4 , Fe_3O_4 , MnFe_2O_4 dan NiFe_2O_4 serta karakterisasi, (b) Menentukan kemampuan masing-masing nanokomposit fotokatalis dalam mendegradasi zat warna sintetik yaitu metilen biru (MB) (c) Menentukan kondisi optimum degradasi meliputi konsentrasi zat warna, berat katalis, waktu kontak dan pH (d) Menentukan, kinetika adsorpsi dan mekanismenya dalam menentukan efisiensi degradasi (e) Aplikasi nanokomposit fotokatalisis pada air limbah industri tekstil yang mengandung zat warna MB. Hasil penelitian didapatkan fotokatalis nanokomposit ZnO/ NiFe_2O_4 dengan rasio 2:0,1 (ZNi-2) yang dapat mendegradasi zat warna metilen biru sebesar 95,2% yang mempunyai ukuran kristal 31,82 nm, luas permukaan 25,246 g^2/m , celah pita energi (band gap) 2,46 eV, sifat magnet 33,11 emu/gr, waktu kontak 50 menit, pH 7,03. Kinetika reaksi degradasi zat warna MB yaitu sesuai orde satu dengan konstanta laju reaksi 0,0690. Nanokomposit ZnO/ NiFe_2O_4 (2:0,1) efektif digunakan untuk pengolahan air limbah industri tekstil khususnya jumputan. Penggunaan fotokatalis dapat dipakai kembali sebanyak 5x dengan kemampuan degradasi sebesar 89,31%

Kata kunci : Fotokatalis, zat warna, semikonduktor, senyawa ferit, nanokomposit

SUMMARY

INCREASING THE ACTIVITY OF ZnO SEMICONDUCTORS WITH SPINEL FERRITES FOR PHOTOCATALYTIC APPLICATIONS IN TEXTILE WASTEWATER TREATMENT

Scientific writing in the form of a disertation, January 12, 2024

Yuniar: Supervised by Prof. Tuty Emilia Agustina, S.T., M.T., Ph.D, Prof. Dr. Dra. Poedji Loekitowati Hariani, M.Si dan Prof. Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA

Study Program of Ph.D, Engineering Department, Post Graduate Program of Sriwijaya University

Zinc oxide (ZnO) is an environmentally friendly material with no risk to organisms, human health, or the environment. However, the ZnO photocatalyst process mostly uses a UV light source because the band gap energy of ZnO is quite large, namely 3.37 eV, so if you use sunlight, it is less efficient. After all, only 5% of the UV light fraction is contained in sunlight, reducing the weakness of ZnO, so it is modified by adding spinel ferrite. This research aims to obtain optimum conditions for processing textile wastewater using ZnO semiconductors modified with spinel ferrites (NiFe₂O₄, MnFe₂O₄, and Fe₃O₄) using the coprecipitation method and obtain a nanocomposite and a ratio of ZnO: spinel ferrite that can effectively degrade methylene blue (MB) dye. There are 5 stages of this research, namely (a) synthesizing ZnO, ZnO/Fe₃O₄ (ZFe-1, ZFe-2, ZFe-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1) ZnO/MnFe₂O₄ (ZMn-1, ZMN-2, ZMn-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1), ZnO/NiFe₂O₄ (ZNi-1, ZNi-2, ZNi-3 rasio mol 1:0,1; 2:0,1; 3:0,1), Fe₃O₄, MnFe₂O₄, and NiFe₂O₄ photocatalyst nanocomposites and characterization. (b) Determining the ability of each photocatalyst nanocomposite to degrade synthetic dyes, namely methylene blue (MB) (c) Determine the optimum degradation conditions, including dye concentration, catalyst weight, contact time, and pH. (d) Determine the adsorption kinetics and mechanism for determining degradation efficiency. (e) Application of photocatalysis nanocomposites in textile industry wastewater contains MB dye. The research results showed that the ZnO/NiFe₂O₄ nanocomposite photocatalyst with a ratio of 2:0.1 (ZNi-2) was able to degrade methylene blue dye by 95.2% and had a crystal size of 31.82 nm, a surface area of 25.246 g²/m, and a band gap. energy 2.46 eV, magnetic properties 33.11 emu/gr, contact time 50 minutes, pH 7.03. The kinetics of the MB dye degradation reaction are in first order, with a reaction rate constant of 0.0690. The ZnO/NiFe₂O₄ (2:0.1) nanocomposite is effectively used for processing textile industry wastewater, especially jumputan. The use of photocatalysts can be reused five times, with a degradation capacity of 89.31%.

Key words: Photocatalyst, dye, semiconductor, spinel ferrite, nanonomposite

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertumbuhan sektor industri tekstil di Indonesia berkembang pesat sehingga berdampak positif bagi kehidupan manusia. Namun, selain memberikan dampak positif juga memberikan dampak negatif bagi lingkungan karena menghasilkan limbah yang mengandung zat warna dalam jumlah besar. Air limbah yang mengandung polutan berupa zat warna dari air limbah tekstil tersebut memiliki banyak masalah besar yakni dampak negatif seperti karsinogenik, menyebabkan alergi, dermatitis atau iritasi kulit dan lain lain. Polutan berupa zat warna ini ditemukan sangat tahan terhadap reaksi biologis, fisik dan kimia (Wang et al., 2010). Sebagian besar zat warna yang digunakan dalam proses pewarnaan di industri tekstil akan terbuang ke lingkungan sebagai limbah. Air limbah industri tekstil mengandung senyawa organik dengan konsentrasi yang cukup tinggi pada hampir setiap unit prosesnya. Akibatnya, kualitas air menurun karena tercampur dengan air limbah tersebut. Zat warna dari air limbah yang dihasilkan merupakan senyawa organik yang memiliki struktur aromatik yang sulit terdegradasi secara alamiah dan tidak ramah lingkungan, karena berat molekul tinggi dan stabilitas biokimia dari polutan organik ini. Sangat sulit untuk menghilangkan limbah beracun organik ini dengan menggunakan teknik umum seperti kimia, fisik dan proses biologi.

Zat warna tekstil yang banyak digunakan dalam industri diantaranya metilen biru dan metil oranye (Długosz et al., 2020). Zat warna metilen biru merupakan senyawa hidrokarbon aromatik yang beracun termasuk zat warna kationik dengan daya adsorpsi yang sangat kuat (Długosz et al., 2020). Metil oranye adalah zat warna anionik yang mengandung gugus azo. Zat warna azo tidak mudah terdegradasi oleh perlakuan kimia, sehingga jika terbuang ke lingkungan dapat bertahan dalam jangka waktu yang cukup lama serta dapat menimbulkan pencemaran lingkungan. Berdasarkan efek yang ditimbulkan oleh zat warna terhadap lingkungan maka perlu dilakukan berbagai upaya untuk meminimalisir limbah zat warna tersebut sebelum dibuang ke perairan.

Berbagai metode seperti filtrasi kimia, koagulasi, elektrokoagulasi dan adsorpsi telah diterapkan untuk upaya menghilangkan limbah zat warna tekstil. Namun, metode-metode tersebut kurang efektif untuk mengatasi limbah zat warna tekstil, sehingga akan menimbulkan masalah yang baru bagi lingkungan (Gómez-pastora et al., 2017). Untuk mengatasinya telah dilakukan beberapa penelitian tentang pengolahan air limbah tersebut. Dari beberapa cara yang dapat dilakukan, penggunaan fotokatalis merupakan salah satu cara yang efektif dalam pengolahan air limbah. Fotokatalis mengubah energi cahaya menjadi energi kimia dan dalam prosesnya akan menghasilkan radikal hidroksil yang akan bereaksi redoks dengan senyawa organik (polutan), sehingga air akan kembali jernih karena terpisahkan dari air limbah. Polutan ini diubah menjadi O_2 dan H_2 yang lebih ramah lingkungan. Fotokatalis melibatkan reaksi fotokimia pada permukaan semikonduktor oksida logam yang terjadi reaksi secara bersamaan yaitu reaksi oksidasi dari lubang positif (h^+) dan reaksi reduksi dari elektron negatif (e^-) (Mano et al., 2015; D. Wang et al., 2015).

Penggunaan semikonduktor dalam proses fotokatalisis merupakan teknologi ramah lingkungan, rendah biaya untuk menghilangkan zat warna menggunakan cahaya matahari secara langsung untuk mendisosiasi zat warna menjadi CO_2 , H_2O atau udara dan membantu mengurangi polusi lingkungan (Li et al., 2012). Berbagai jenis semi konduktor yang digunakan dalam fotokatalisis adalah ZnO (Verma et al., 2018), TiO_2 (Kumar et al., 2018), CdS (Wang et al., 2017), CeO_2 (S. S. Zhou & Liu, 2017). Semikonduktor fotokatalis yang murah dengan efisiensi fotokatalitik yang tinggi dan mengkonversikan energi cahaya menjadi energi kimia. Diantara semikonduktor yang tersebut diatas maka nanopartikel ZnO dapat dipertimbangkan sebagai semikonduktor fotokatalis yang mudah beradaptasi untuk fotooksidasi polutan organik (Shekofteh-Gohari et al., 2018).

Zink oksida (ZnO) adalah material yang ramah lingkungan tanpa pengaruh resiko kehidupan organisme, kesehatan manusia dan lingkungan. Di bidang fotokatalisis saat ini, ZnO telah muncul sebagai kandidat utama yang efisien dan menjanjikan dalam menghasilkan lingkungan hijau karena karakteristiknya yang unik yaitu mempunyai celah pita langsung dan lebar yaitu 3,37 eV yang berada

didaerah dekat sinar Ultra Violet (UV), kemampuan oksidasi yang kuat, sifat fotokatalitik yang baik, dan ikatan energi eksiton bebas yang besar (Lee et al., 2016). ZnO juga mempunyai efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan dan mendegradasi zat warna serta kapasitas untuk menyerap spektrum sinar UV dibandingkan metal oksida semikonduktor lainnya (Ong et al., 2018). Namun, proses fotokatalis ZnO kebanyakan menggunakan sumber sinar UV karena energi celah pita ZnO cukup besar yaitu 3,37 eV sehingga bila menggunakan sinar matahari kurang efisien karena fraksi sinar UV hanya 5% yang terkandung didalam sinar matahari. Sinar UV selalu berada didalam sinar matahari selama matahari bersinar, hanya berbeda kadarnya pada waktu pagi, siang dan malam. Waktu yang paling baik dengan fraksi sinar UV tertinggi yaitu pukul 11.00 – 14.00 WIB. Dalam proses fotokatalis mendegradasi zat warna dalam air limbah, sinar UV sangat berpengaruh terhadap proses fotokatalitik, hanya saja jika menggunakan sinar matahari, fraksi sinar UV didalam sinar matahari sedikit sekali hanya 5% sehingga pengaruhnya kecil terhadap proses fotokatalitik. Penggunaan lampu UV saat ini menimbulkan pemborosan energi sehingga meningkatkan biaya operasi sistem fotokatalitik

Peningkatan ZnO dengan fitur skala nano yang dapat dikontrol dengan tepat, dan juga mengurangi kelemahan ZnO yaitu dimodifikasi dengan menambahkan senyawa lain. Fotokatalis semikonduktor ZnO apabila digunakan secara tunggal mempunyai kelemahan utama yaitu Rekombinasi lubang fotogenerasi (h_{VB}^+) dan elektron (e_{CB}^-). Langkah rekombinasi ini menurunkan hasil kuantum dan menyebabkan pemborosan energi, oleh karena itu proses rekombinasi e^-h^+ harus dihambat untuk memastikan fotokatalisis yang efisien. Doping logam dapat mengatasi masalah rekombinasi dengan meningkatkan pemisahan muatan antara elektron dan hole. Selain itu, dopan dapat menjebak elektron, mengurangi kemungkinan rekombinasi lubang elektron yang menonaktifkan sistem fotokatalitik. Selanjutnya, radikal hidroksil dan spesies oksigen aktif akan sangat meningkat akibat peningkatan efisiensi pemisahan muatan . Umumnya konsentrasi dan sifat ion dari dopan, metode sintesis dan kondisi operasi secara signifikan mempengaruhi fotoaktivitas semikonduktor logam (Lee et al., 2016).

Modifikasi terhadap fotokatalis ZnO yang dapat menggunakan sinar tampak untuk aktivasinya akan menghilangkan keterbatasan dari penggunaan ZnO untuk mendegradasi polutan organik khususnya zat warna. Selain itu ZnO dibuat dalam bentuk nanopartikel karena mempunyai energi lebih besar dari material ukuran biasa karena memiliki luas permukaan yang besar. Hal ini berkaitan dengan resistivitas elektrik yang mengalami kenaikan dengan berkurangnya ukuran partikel. Tingkat kemagnetan akan meningkat dengan penurunan ukuran butiran partikel dan kenaikan spesifik luas permukaan persatuan volume partikel sehingga nanopartikel memiliki sifat yang baik dalam peningkatan sifat magnet (ketika ukuran butir bahan magnetik diperkecil hingga skala nano, bahan feromagnetik berubah menjadi bahan superparamagnetik). Hal ini memungkinkan terjadinya penurunan *band gap* karena terjadinya pertukaran ion jaraknya dalam skala nano serta memiliki sistem dengan *interface* yang tinggi.

Nanopartikel cenderung memiliki aktivitas katalisis yang lebih baik. Hal ini disebabkan luas permukaan yang bertambah dan atom di ujung-ujung permukaan semakin banyak mengakibatkan bertambahnya reaktivitas dari bahan. Penerapan ZnO terhambat oleh fotokorosi yang akan menghasilkan rekombinasi yang cepat dari *photogenerated charges* dan dengan demikian menyebabkan efisiensi fotokatalitik menjadi rendah. Begitu juga dengan semikonduktor ZnO dalam skala nano (ukuran yang sangat kecil dengan luas permukaan spesifiknya yang sangat besar) nanomaterial mempunyai kapasitas adsorpsi dan reaktivitas sangat kuat, lebih dari itu mobilitas nanomaterial dalam larutan sangat tinggi. Pemisahan nanopartikel dari sistem terolah agar bisa digunakan kembali masih sulit. Untuk meningkatkan efisiensi fotodegradasi maka ZnO digabungkan dengan nanomagnetik senyawa ferit, sehingga dapat dipisahkan menggunakan magnetik eksternal. Beberapa peneliti telah melakukan modifikasi untuk meningkatkan aktivitas fotokatalitik di antaranya Fe₃O₄/ZnO/graphene oksida (Abbasi et al., 2020), ZnO/ZnFe₂O₄ (Chandel et al., 2020), ZnO/MnFe₂O₄ (Rahmayeni et al., 2017), ZnO/NiFe₂O₄ (Jamarun & Arief, 2016). Dari hasil penelitian yang telah dilakukan fotokatalis semikonduktor ZnO yang dimodifikasi dengan senyawa lain

menunjukkan peningkatan kinerja degradasi fotokatalitik dibandingkan dengan ZnO tunggal.

Nanomagnetik adalah material berukuran nano yang bersifat magnetik. Sifat kemagnetan bahan dikelompokkan menjadi empat golongan yaitu diamagnetik, paramagnetik, feromagnetik dan antiferomagnetik. Sifat feromagnetik dimiliki oleh bahan yang elektron-elektronnya tidak berpasangan dengan *spin* yang tersusun secara paralel karena itu sifat kemagnetannya sangat besar, contohnya besi, nikel, mangan dan kobalt.

Senyawa ferit (*Spinel ferrites*) secara umum memiliki formula molekul MFe_2O_4 ($M = Ni, Zn, Mn, Co$ atau Mg) menarik perhatian yang sangat besar sebab tidak beracun, mudah modifikasi permukaan, kinerja elektrokimia, katalitik, stabilitas kimia yang baik, *band gap* rendah dan ketersediaanya mudah didapat (Adeleke et al., 2018). Di antara senyawa ferit yang akan dipelajari secara luas yaitu Fe_3O_4 , $MnFe_2O_4$ dan $NiFe_2O_4$ yang mempunyai sifat kinerja elektromagnetik yang tinggi, stabilitas kimia sangat baik, kekerasan mekanik, koersivitas rendah dan saturasi magnet bersifat sedang (Singh et al., 2017).

Senyawa ferit mempunyai celah pita energi (*band gap energy*) yang rendah, untuk Fe_3O_4 , $MnFe_2O_4$ dan $NiFe_2O_4$ mempunyai *band gap*, pita konduksi (CB) dan pita valensi (VB) untuk skala potensial redoks yaitu masing-masing 2,4 ; 1,47 dan 1,6 eV. (Chandel et al., 2020; Kefeni & Mamba, 2020). Gabungan ZnO/Fe_2O_3 , $ZnO/NiFe_2O_4$ dan $ZnO/MnFe_2O_4$ akan meningkatkan kinerja semikonduktor. Spinel Ferrit yang bersifat magnetik dapat memudahkan dalam pemisahan sehingga gabungan ZnO/Fe_2O_3 , $ZnO/NiFe_2O_4$ dan $ZnO/MnFe_2O_4$ menggunakan magnetik eksternal dan fotokatalis dapat digunakan berulang-ulang (Kefeni & Mamba, 2020).

Aplikasi nanokomposit yang berhasil bergantung pada metode sintesis dan modifikasi permukaan. Sintesis nanokomposit fotokatalis ZnO/senyawa ferit menggunakan metode ko-presipitasi. Metode kopresipitasi merupakan suatu metode sintesis senyawa yang didasarkan pada pengendapan lebih dari satu substansi secara bersama ketika senyawa tersebut melewati titik jenuh. Metode ko-presipitasi merupakan metode yang sederhana dan murah dalam biaya

operasional, sehingga metode ini menjadi salah satu teknik pembuatan nanomagnetik yang sering digunakan. Kelebihan dari metode kopresipitasi adalah prosesnya menggunakan suhu kamar dan mudah untuk partikel mengontrol ukuran, sehingga waktu yang dibutuhkan relatif singkat. Produk dari metode kopresipitasi memiliki ukuran partikel yang lebih kecil dan lebih homogen. Metode kopresipitasi merupakan metode yang paling efektif karena dapat dilakukan pada kondisi lingkungan yang normal dan dalam sintesisnya metode ini menggunakan pasangan asam dan basa, dimana asam berfungsi sebagai pelarut dan basa membawa zat terlarut ke bawah sehingga terbentuk endapan yang dikehendaki (Gautam & Chattopadhyaya, 2016).

Berdasarkan uraian tersebut, pada penelitian ini dilakukan sintesis fotokatalis nanokomposit $\text{ZnO}/\text{Fe}_3\text{O}_4$, $\text{ZnO}/\text{MnFe}_2\text{O}_4$ dan $\text{ZnO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ dengan metode kopresipitasi. Metode kopresipitasi merupakan teknik sintesis sederhana yang memberikan potensi hasil yang tinggi. Proses sintesisnya menggunakan suhu kamar agar ukuran partikel dapat diatur dan waktu yang dibutuhkan relatif singkat. Dengan metode ini Hasil sintesis tersebut dapat diamati fasanya menggunakan Difraksi sinar X (XRD). Difraksi sinar-X (XRD) adalah salah satu teknik karakterisasi yang digunakan untuk mengungkapkan kristalinitas dan sifat struktur suatu padatan kristalin (kubus, tetragonal, ortorombik, rombohedral, heksagonal, monoklin, triklin), kualitas kristal (kristal tunggal, polikristalin, dan amorf). Hasil pengamatan menggunakan XRD fasa murni ZnO dan fasa campuran $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ menunjukkan fasa kristal struktur kubik dan kualitas kristal yaitu kristal tunggal (Kulkarni et al., 2017). Identifikasi gugus fungsi menggunakan Fourier Transform Infra Red (FTIR). Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS) untuk mengamati morfologi dan elemen dari ketiga nanokomposit serta distribusi ukuran partikel. Dari ketiga karakterisasi yang tersebut diatas dapat menunjukkan keberadaan semua komponen bergabung dengan ZnO. Vibrating Sample Magnetometer (VSM) untuk menentukan besarnya sifat kemagnetan, dan Brunauer, Emmet dan Teller (BET) untuk mengamati luas permukaan. Selanjutnya, nanokomposit hasil sintesis akan digunakan dalam proses

photodegradation yang akan dikombinasikan dengan pengaruh konsentrasi awal zat warna, pH, berat katalis dan waktu kontak.

1.2 Perumusan Masalah

Nanopartikel ZnO merupakan salah satu fotokatalis semikonduktor yang banyak digunakan dalam pengolahan air limbah khususnya zat warna yang sulit didegradasi. Fotokatalis ZnO yang banyak digunakan dalam aplikasi fotodegradasi, karena memiliki kestabilan termal dan kimia yang tinggi, inert, non toksik, luas permukaan tinggi dan mudah dipreparasi, meskipun demikian semikonduktor ZnO apabila digunakan secara tunggal memiliki keterbatasan yaitu Celah pita yang lebar 3,37 eV, Penyerapan cahaya terbatas di daerah sinar UV dan Rekombinasi yang cepat dari pembawa muatan fotoinduksi, sehingga semikonduktor ZnO harus dimodifikasi untuk meningkatkan aktivitas dalam mendegradasi zat warna. Adapun tujuan modifikasi ZnO yaitu mengurangi keterbatasan sinar tampak dan sinar matahari, menurunkan band gap, dibuat dalam bentuk nano sehingga dapat mempunyai energi lebih besar, tingkat kemagnetan lebih meningkat, memperlambat rekombinasi dan dibuat dalam bentuk nano sehingga dapat mempunyai energi lebih besar, maka dipilih tiga jenis senyawa ferit (Fe^{3+} , Mn^{2+} dan Ni^{2+}). Alasan pemilihan senyawa ferit Fe^{3+} , Mn^{2+} dan Ni^{2+} karena biaya rendah, bersifat magnetik, band gap rendah, meningkatkan kinerja semikonduktor, mempunyai kinerja fotokatalitik yang tinggi dan dapat digunakan berulang karena mempunyai stabilitas kimia yang baik. Untuk meningkatkan aktifitas semikonduktor ZnO adalah dengan dikompositkan dengan senyawa ferit yaitu $\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$, $\text{ZnO/MnFe}_2\text{O}_4$ dan $\text{ZnO/Fe}_3\text{O}_4$. Dari penjelasan diatas, maka yang menjadi permasalahan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah kemampuan masing-masing dari ketiga nanokomposit ($\text{ZnO/NiFe}_2\text{O}_4$, $\text{ZnO/MnFe}_2\text{O}_4$ dan $\text{ZnO/Fe}_3\text{O}_4$) dengan variasi rasio mol ZnO:senyawa ferit (1:0,1 ; 2:0,1 ; 3:0,1), dalam mendegradasi zat warna serta bagaimanakah hasil karakterisasi.
2. Bagaimana kemampuan degradasi nanokomposit yang efektif dalam menyerap zat warna MB (Metilen biru)

3. Berapakah rasio mol ZnO:senyawa ferit menjadi nanokomposit yang efektif dalam mendegradasi zat warna MB
4. Bagaimana kondisi optimum degradasi nanokomposit ZnO:senyawa ferit terhadap zat warna MB meliputi konsentrasi awal zat warna MB, berat katalis, waktu kontak dan pH
5. Bagaimanakah kinetika fotodegradasi zat warna terhadap reaksi fotokatalisis heterogen meminimalkan kehilangan elektron selama keadaan eksitasi dan memaksimalkan penyerapan foton.
6. Bagaimanakah kemampuan nanokomposit untuk mendegradasi air limbah industri tekstil (jumputan) dan berapa kali dapat digunakan kembali nanokomposit fotokatalis tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode alternatif proses fotodegradasi menggunakan nanokomposit ZnO/Fe₃O₄, ZnO/MnFe₂O₄, ZnO/NiFe₂O₄ sebagai fotokatalis untuk pengolahan zat warna dalam air limbah. Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut :

1. Melakukan sintesis nanopartikel ZnO dengan metode kopresipitasi dan pembuatan nanokomposit ZnO/Fe₃O₄, ZnO/MnFe₂O₄, ZnO/NiFe₂O₄ dan karakterisasinya.
2. Menentukan kemampuan degradasi dari ketiga nanokomposit yang efektif dalam mendegradasi zat warna MB.
3. Menentukan rasio mol ZnO:senyawa ferit dan nanokomposit yang efektif dalam mendegradasi zat warna dengan variabel pengaruh konsentrasi awal zat warna, pH, waktu kontak dan berat adsorben
4. Menentukan kondisi optimum degradasi nanokomposit terhadap zat warna dengan interaksi antar variabel konsentrasi awal zat warna, berat katalis, waktu kontak dan pH
5. Menentukan kinetika reaksi degradasi nanokomposit terhadap zat warna

6. Aplikasi nanokomposit fotokatalisis pada air limbah industri tekstil yang mengandung zat warna dan penggunaan kembali nanokomposit fotokatalis yang pemisahannya menggunakan magnet eksternal.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Menghasilkan nanokomposit fotokatalis ZnO yang dilapisi senyawa ferit dengan kondisi optimum penyerapan zat warna MB dengan variabel konsentrasi awal, pH, berat katalis dan waktu kontak. Kondisi ini yang nantinya akan diaplikasikan untuk pengolahan air limbah industri tekstil (jumptan).
2. Memberikan solusi terhadap penanganan air limbah terkait zat warna. Model kinetika degradasi yang didapat diharapkan dapat digunakan dalam proses secara luas.

1.5 Peta Jalan Penelitian terdahulu dan kebaruan (Novelty)

Penelitian tentang nanokomposit ZnO yang didoping senyawa ferit telah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini dilakukan didasarkan pada penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Nanokomposit ZnO/spinel ferit telah berhasil disintesis menggunakan ekstrak daun mangga sebagai sumber ZnO. Metode sintesis yang digunakan adalah metode *solid state*, yaitu dengan reaksi keadaan padat, yaitu padatan ZnO, NiFe₂O₄, dan thiourea dengan rasio 20:1:10 difurnace pada suhu 800°C selama 10 jam, sedangkan NiFe₂O₄ disintesis dengan mereaksikan FeCl₃ 6H₂O, NiCl₂ 6H₂O, NaOH dan PVP (Polivinilpirolidon) sebagai *capping agent*. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi yang tinggi dalam mendegradasi metilen biru dibawah sinar UV dan sinar matahari dengan berat katalis 75 mg. Penambahan *spinel ferit* ke ZnO menghasilkan penurunan nilai band gap. Band gap ZnO : NiFe₂O₄ : ZnO/NiFe₂O₄ semakin kecil yaitu masing-masing 3,12 : 1,6 : 1,71 eV. Senyawa yang dihasilkan adalah padatan yang mempunyai struktur heksagonal wurtzite untuk ZnO dan kubik spinel untuk NiFe₂O₄ (Adeleke et al., 2018).

Moradi et al (2018) juga berhasil melakukan sintesis NiFe₂O₄/ZnO dengan metode sol-gel. Sebelumnya sintesis NiFe₂O₄ terlebih dahulu dengan mereaksikan

gel tragakan, $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Sintesis $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ yaitu mereaksikan gel tragakan, NiFe_2O_4 , $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanokomposit $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ bersifat feromagnetik dan dapat mendegradasi warna *direct blue* sebesar 98% dengan berat katalis 50 mg dan konsentrasi larutan 20 ppm, sedangkan zat warna *reactive blue* sebesar 96% , katalis 70 mg konsentrasi larutan 20 ppm dibawah sinar tampak. Nanokomposit $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ dapat dipisahkan dengan magnet eksternal sehingga dapat digunakan sebanyak 5 kali.

Pada tahun (2016), Zhu et al mensintesis $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ menggunakan metode hidrotermal dengan rasio berat NiFe_2O_4 : ZnO yaitu 1:2, mereaksikan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, ZnO (komersil) dan NaOH hingga pH 13, dioven pada temperatur 180°C selama 20 jam. Nanokomposit $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ dapat medegradasi zat warna *congo red* sebesar 94,55%, konsentrasi larutan 20 ppm selama 10 menit dibawah sinar matahari.

Huy et al (2018) mensintesis $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ (core shell) metode gabungan hidrotermal dan kopresipitasi dengan mereaksikan $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Zn}(\text{AC})_2$ menggunakan natrium sitrat sebagai perekat permukaan. Nanokomposit $\text{NiFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ yang terbentuk dikalsinasi pada temperatur 350°C selama 2 jam, didapatkan hasil dengan sifat magnet yang tinggi.

Boutra et al (2020b) berhasil melakukan preparasi senyawa $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{TA}/\text{ZnO}$ dengan metode hidrotermal. Sintesis MnFe_2O_4 mereaksikan senyawa $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, Asam tanat dan NaOH . Sintesis ZnO mereaksikan $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan NaOH , setelah itu mereaksikan MnFe_2O_4 dan ZnO menghasilkan $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$. Hasil degradasi zat warna *congo red* sebesar 90,32% dengan berat katalis 100 mg, konsentrasi larutan 50 ppm selama 35 menit dibawah sinar tampak.

Zamani et al (2020) telah berhasil mensintesis $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ dengan metode ko-presipitasi. Sintesis MnFe_2O_4 dengan mereaksikan $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ dan NH_4OH . Selanjutnya larutan MnFe_2O_4 direaksikan dengan $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ dan diaduk pada suhu 90°C selama 2 jam. Hasil padatan $\text{MnFe}_2\text{O}_4/\text{ZnO}$ dikalsinasi pada suhu 200°C selama 3 jam. Hasilnya diaplikasikan untuk mendegradasi zat warna Congo red yaitu 92,32% selama 35 menit dibawah sinar matahari.

Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ disintesis menggunakan metode ko-presipitasi. Sintesis $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ dengan mereaksikan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, Na sitrat, Zn asetat dan NaOH. Diaplikasikan untuk mendegradasi Metilen biru konsentrasi 20 ppm, berat katalis 20 mg selama 20 menit dibawah sinar lampu UV (Mufti et al., 2019)

Dlugosz et al (2020) telah berhasil mensintesis nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ dengan metode ko-presipitasi. Sintesis Fe_3O_4 menggunakan senyawa $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaOH hingga pH 9. Selanjutnya mereaksikan Fe_3O_4 , $\text{ZnSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, dan Na_2CO_3 . Senyawa tersebut diaplikasikan untuk mendegradasi zat warna *Trypan blue* didapat 95,61% dan 63% terhadap zat warna metilen biru dengan berat katalis 200 gr, konsentrasi 20 ppm selama 60 menit dibawah sinar lampu UV 365 nm.

Hasil penelitian Kulkarni et al (2017) melaporkan hasil penelitian nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ disntesis dengan metode kombinasi ko-presipitasi & refluks dengan rasio $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ yaitu 1:10 menggunakan senyawa $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NH_4OH , selanjutnya Fe_3O_4 yang didapat direaksikan dengan ZnCl_2 dan NaOH. Nanokomposit $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{ZnO}$ diaplikasikan mendegradasi metilen biru sebesar 90% dengan berat katalis 20 mg konsentrasi zat warna 20 ppm selama 20 menit di bawah sinar UV dan sinar tampak.

Sintesis nanopartikel ZnO (Chandel et al., 2020) dengan metode pengendapan langsung (*direct precipitation*) yaitu menggunakan senyawa kimia ZnCl_2 yang direaksikan dengan NaOH menghasilkan ZnO. Untuk sintesis nanopartikel Fe_3O_4 merujuk (P. L. Hariani et al., 2013) dengan metode ko-presipitasi dengan mereaksikan $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ dan NaOH. Sintesis nanopartikel NiFe_2O_4 dan MnFe_2O_4 modifikasi (Adeleke et al., 2018) juga menggunakan metode ko-presipitasi, hanya *capping agent* menggunakan PEG-4000 dan larutan NaOH 2 M. Setelah terbentuk endapan nanopartikel NiFe_2O_4 dan MnFe_2O_4 yang sudah dikeringkan dengan oven, dilanjutkan furnace pada temperatur 500°C selama 2 jam.

Dalam penelitian ini, nanokomposit ZnO/*Spinel ferit* (NiFe_2O_4 , MnFe_2O_4 dan Fe_3O_4) akan disintesis menggunakan metode ko-presipitasi. Adapun kebaruan (novelty) penelitian ini adalah nanopartikel ZnO yang disintesis didoping oleh spinel ferit (NiFe_2O_4 , MnFe_2O_4 dan Fe_3O_4), agar dalam pengaplikasiannya dapat

dengan mudah dipisahkan dengan magnet eksternal. Sintesis nanokomposit ZnO/NiFe₂O₄ yaitu mereaksikan NiCl₂ · 6H₂O, FeCl₃ · 6H₂O dan NaOH. Begitu juga dengan sintesis nanokomposit ZnO/MnFe₂O₄ yaitu mereaksikan FeCl₂ · 4H₂O, FeCl₃ · 6H₂O dan NaOH. Dalam hal ini semikonduktor nanopartikel ZnO yang dilapisi senyawa ferit, selanjutnya dari ketiga nanokomposit akan diaplikasikan pada zat warna dan akan dievaluasi serta dianalisis fotokatalis nanokomposit mana yang efektif dalam mendegradasi zat warna dalam penelitian ini adalah metilen biru.

DAFTAR PUSTAKA

- Ade Caro, C. (2015). UV/VIS Spectrophotometry. Metteler-Toledo International, September 2015, 4-14
- Abbas, M., Parvatheeswara Rao, B., Naga, S. M., Takahashi, M., & Kim, C. (2013). Synthesis of high magnetization hydrophilic magnetite (Fe₃O₄) nanoparticles in single reaction - Surfactantless polyol process. *Ceramics International*, 39(7), 7605–7611. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.03.015>
- Abbasi, S., Ahmadpoor, F., Imani, M., & Ekrami-Kakhki, M. S. (2020). Synthesis of magnetic Fe₃O₄@ZnO@graphene oxide nanocomposite for photodegradation of organic dye pollutant. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 100(2), 225–240. <https://doi.org/10.1080/03067319.2019.1636038>
- Adeleke, J. T., Theivasanthi, T., Thiruppathi, M., Swaminathan, M., Akomolafe, T., & Alabi, A. B. (2018). Applied Surface Science Photocatalytic degradation of methylene blue by ZnO / NiFe₂O₄ nanoparticles. *Applied Surface Science*, 455(May), 195–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.05.184>
- Agustina, T. E. (2011). Pengolahan air limbah pewarna sintetik dengan metode adsorpsi menggunakan karbon aktif. *Jurnal Rekayasa Sriwijaya*, 20(1), 36–42.
- Agustina, T. E. (2013). AOPs Application on Dyes Removal. In Rashmi Sharma, Sanjay K. & Sanghi (Ed.), *Wastewater Reuse and Management* (pp. 353–372). Springer US.
- Agustina, T. E., Melwita, E., Bahrin, D., Gayatri, R., & Purwaningtyas, I. F. (2020). Synthesis of nano-photocatalyst ZnO-natural zeolite to degrade procion red. *International Journal of Technology*, 11(3), 472–481. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v11i3.3800>
- Alfina, A., Stiadi, Y., Lee, H. J., Faculty, N. S., Manis, K. L., & Nano, G. (2019). *Green synthesis and Characterization of ZnO-CoFe₂O₄ Semiconductor Photocatalysts Prepared Using Rambutan (Nephelium lappaceum L .) Peel Extract 2 . Experimental Procedure*. 22(5), 2–11.
- Al-Fori, M., Dobretsov, S., Myint, M. T. Z., & Dutta, J. (2014). Antifouling properties of zinc oxide nanorod coatings. *Biofouling*, 30(7), 871–882. <https://doi.org/10.1080/08927014.2014.942297>

- Al Dairy, A. R., Al-Hmoud, L. A., & Khatatbeh, H. A. (2019). Magnetic and structural properties of Barium Hexaferrite nanoparticles doped with Titanium. *Symmetry*, *11*(6), 1–11. <https://doi.org/10.3390/sym11060732>
- Ali, A. F., Atwa, S. M., & El-Giar, E. M. (2017). Development of magnetic nanoparticles for fluoride and organic matter removal from drinking water. In *Water Purification*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804300-4.00006-x>
- Belessi, V., Romanos, G., Boukos, N., Lambropoulou, D., & Trapalis, C. (2009). Removal of Reactive Red 195 from aqueous solutions by adsorption on the surface of TiO₂ nanoparticles. *Journal of Hazardous Materials*, *170*(2–3), 836–844. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.05.045>
- Benhachem, F., Attar, T., & Bouabdallah, F. (2019). Kinetic study of adsorption methylene blue dye from aqueous solutions using activated carbon from starch. *Chemical Review and Letters*, *2*, 33–39.
- Bodke, M. R., Purushotham, Y., & Dole, B. N. (2014). Crystallographic and optical studies on Cr doped ZnS nanocrystals. *Ceramica*, *60*(355), 425–428. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000300015>
- Boutra, B., Güy, N., Özacar, M., & Trari, M. (2020a). Journal of Magnetism and Magnetic Materials Magnetically separable MnFe₂O₄ / TA / ZnO nanocomposites for photocatalytic degradation of Congo Red under visible light. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *497*(September 2019), 165994. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165994>
- Boutra, B., Güy, N., Özacar, M., & Trari, M. (2020b). Magnetically separable MnFe₂O₄/TA/ZnO nanocomposites for photocatalytic degradation of Congo Red under visible light. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *497*, 165994. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.165994>
- ce pte d M us pt.* (2018).
- Chandel, N., Sharma, K., Sudhaik, A., Raizada, P., Hosseini-Bandegharai, A., Thakur, V. K., & Singh, P. (2020). Magnetically separable ZnO/ZnFe₂O₄ and ZnO/CoFe₂O₄ photocatalysts supported onto nitrogen doped graphene for photocatalytic degradation of toxic dyes. *Arabian Journal of Chemistry*, *13*(2), 4324–4340. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2019.08.005>
- Chen, C., Liu, J., Liu, P., & Yu, B. (2011). Investigation of Photocatalytic Degradation of Methyl Orange by Using Nano-Sized ZnO Catalysts. *Advances in Chemical Engineering and Science*, *01*(01), 9–14. <https://doi.org/10.4236/aces.2011.11002>
- Chen, J., Shi, J., Wang, X., Cui, H., & Fu, M. (2013). Recent progress in the

preparation and application of semiconductor/graphene composite photocatalysts. *Cuihua Xuebao/Chinese Journal of Catalysis*, 34(4), 621–640. [https://doi.org/10.1016/s1872-2067\(12\)60530-0](https://doi.org/10.1016/s1872-2067(12)60530-0)

- Chen, L. C., Tu, Y. J., Wang, Y. S., Kan, R. S., & Huang, C. M. (2008). Characterization and photoreactivity of N-, S-, and C-doped ZnO under UV and visible light illumination. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 199(2–3), 170–178. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2008.05.022>
- Długosz, O., Szostak, K., Krupiński, M., & Banach, M. (2020). Synthesis of Fe₃O₄/ZnO nanoparticles and their application for the photodegradation of anionic and cationic dyes. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02852-4>
- Doruk ARACAGÖK, Y., & CİHANGİR, N. (2013). Decolorization of Reactive Black 5 by *Yarrowia lipolytica* NBRC 1658. *American Journal of Microbiological Research*, 1(2), 16–20. <https://doi.org/10.12691/ajmr-1-2-1>
- Eastoe, J., Hollamby, M. J., & Hudson, L. (2006). Recent advances in nanoparticle synthesis with reversed micelles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 128–130(2006), 5–15. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.009>
- El-Moselhy, M. M., Mahmoud, N. M. R., & Emar, M. M. (2014). Copper modified exchanger for the photodegradation of methyl orange dye. *Desalination and Water Treatment*, 52(37–39), 7225–7234. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.823625>
- Emery, A. A., Saal, J. E., Kirklın, S., Hegde, V. I., & Wolverton, C. (2016). High-Throughput Computational Screening of Perovskites for Thermochemical Water Splitting Applications. *Chemistry of Materials*, 28(16), 5621–5634. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b01182>
- Etape, E. P., Foba-tendo, J., Ngolui, L. J., Namondo, B. V., Yollande, F. C., Borel, M., & Nguimezong, N. (2018). *Structural Characterization and Magnetic Properties of Undoped and Ti-Doped ZnO Nanoparticles Prepared by Modified Oxalate Route*. 2018.
- Feng, Z., Zhu, S., Martins De Godoi, D. R., Samia, A. C. S., & Scherson, D. (2012). Adsorption of Cd²⁺ on carboxyl-terminated superparamagnetic iron oxide nanoparticles. *Analytical Chemistry*, 84(8), 3764–3770. <https://doi.org/10.1021/ac300392k>
- Fu, M., Li, Y., Wu, S., Lu, P., Liu, J., & Dong, F. (2011). Sol-gel preparation and enhanced photocatalytic performance of Cu-doped ZnO nanoparticles. *Applied Surface Science*, 258(4), 1587–1591.

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.10.003>

- G.E. Boyd, Adamson A N, A. W., Myers, D. L. S., Vol, J. K., Midland, E. D. J. U. L. Y., L~daimson3, A. \ I. ', & Myers, L. S. (1947). [*CONTRIBUTION FROM THE CL?NTON xATIOSAL LABORATORY*] *The Exchange Adsorption of Ions from Aqueous Solutions by Organic Zeolites. 11. Kinetics*'.
- Gautam, R. K., & Chattopadhyaya, M. C. (2016). Functionalized Magnetic Nanoparticles: Adsorbents and Applications. *Nanomaterials for Wastewater Remediation*, 139–159. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804609-8.00007-8>
- Glaze, W. H., & Kang, J.-W. (1988). Advanced Oxidation Processes for Treating Groundwater Contaminated With TCE and PCE: Laboratory Studies. *Journal - American Water Works Association*, 80(5), 57–63. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1988.tb03038.x>
- Gómez-pastora, J., Dominguez, S., Bringas, E., Rivero, M. J., Ortiz, I., & Dionysiou, D. D. (2017). *Review and perspectives on the use of magnetic nanophotocatalysts (MNPCs) in water treatment. 310*, 407–427. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.140>
- Güy, N., & Özacar, M. (2018). Visible light-induced degradation of indigo carmine over ZnFe₂O₄/Tannin/ZnO: Role of tannin as a modifier and its degradation mechanism. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(18), 8779–8793. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.114>
- Habibi, M. H., & Habibi, A. H. (2014). Nanostructure composite ZnFe₂O₄-FeFe₂O₄-ZnO immobilized on glass: Photocatalytic activity for degradation of an azo textile dye F3B. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(1), 68–73. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.04.025>
- Hariani, P. L., Faizal, M., Ridwan, R., Marsi, M., & Setiabudidaya, D. (2013). Synthesis and Properties of Fe₃O₄ Nanoparticles by Co-precipitation Method to Removal Procion Dye. *International Journal of Environmental Science and Development*, 4(3), 336–340. <https://doi.org/10.7763/ijesd.2013.v4.366>
- Hariani, P. L., Fatma, F., & Zulfikar, Z. (2015). Alumina-Activated Carbon Composite as Adsorbent of Procion Red Dye from Wastewater Songket Industry. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, 4(1), 25–33. <https://doi.org/10.21776/ub.jpacr.2015.004.01.206>
- Hariani, P. L., & Riyanti, F. (2014). Magnetic CuFe₂O₄ nanoparticles for adsorpstion of Cr(VI) from aqueous solution. *Advanced Materials Research*, 896, 104–107. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.896.104>

- Hariani, P., Said, M., Rachmat, A., & Sari, S. (2020). Hydroxyapatite-PEG/Fe₃O₄ Composite for Adsorption of Phenol from Aqueous Solution. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(2), 1621–1629. <https://doi.org/10.15244/pjoes/125769>
- Hassan, M., Riaz, S., & Naseem, S. (2015). Modification in structural and magnetic properties of pure ZnO realized by Bi addition. In *Materials Today: Proceedings* (Vol. 2, Issue 10). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.11.093>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998a). A Comparison of chemisorption kinetic models applied to pollutant removal on various sorbents. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(4), 332–340. <https://doi.org/10.1205/095758298529696>
- Ho, Y. S., & McKay, G. (1998b). Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood. *Process Safety and Environmental Protection*, 76(2), 183–191. <https://doi.org/10.1205/095758298529326>
- Huang, H., & Li, W. (2011). Destruction of toluene by ozone-enhanced photocatalysis: Performance and mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental*, 102(3–4), 449–453. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.12.025>
- Huy, D. K., , Nguyen Phuc Duong,* , T. T. L., & Chung, Hoang Manh, Nguyen Kim Thanh, V. V. K. (2018). Synthesis and Characterization of NiFe₂O₄/ZnO core-shell Nanocomposites. *VNU Journal of Science: Mathematics – Physics*, 34(4), 35–43. <https://doi.org/10.25073/2588-1124/vnumap.4297>
- Indonesia, R. (2001). *Presiden republik indonesia*.
- Ingham, B. (2015). X-ray scattering characterisation of nanoparticles. *Crystallography Reviews*, 21(4), 229–303. <https://doi.org/10.1080/0889311X.2015.1024114>
- Jamarun, N., & Arief, S. (2016). Synthesis of ZnO-NiFe₂O₄ Magnetic Nanocomposites by Simple Solvothermal Method for Photocatalytic Dye Degradation under Solar Light. *Oriental Journal of Chemistry*, 32(3), 1411–1419. <https://doi.org/10.13005/ojc/320315>
- Kafshgari, L. A., Ghorbani, M., & Azizi, A. (2019). Synthesis and characterization of manganese ferrite nanostructure by co-precipitation, sol-gel, and hydrothermal methods. *Particulate Science and Technology*, 37(7), 900–906. <https://doi.org/10.1080/02726351.2018.1461154>
- Karim, S. A., Al-Gubury, H. Y., & Abd Alrazzak, N. (2019). The Synthesis of a Novel Azo Dyes and Study of Photocatalytic Degradation. *Journal of*

Physics: Conference Series, 1294(5). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1294/5/052054>

- Kaur, J., Bansal, S., & Singhal, S. (2013). Photocatalytic degradation of methyl orange using ZnO nanopowders synthesized via thermal decomposition of oxalate precursor method. In *Physica B: Condensed Matter* (Vol. 416). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2013.02.005>
- Kefeni, K. K., & Mamba, B. B. (2020). Photocatalytic application of spinel ferrite nanoparticles and nanocomposites in wastewater treatment: Review. *Sustainable Materials and Technologies*, 23, e00140. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00140>
- Khan, I., Ali, S., Mansha, M., & Qurashi, A. (2017). Sonochemical assisted hydrothermal synthesis of pseudo-flower shaped Bismuth vanadate (BiVO₄) and their solar-driven water splitting application. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 386–392. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.12.014>
- Kim, J. R., Lee, K. Y., Suh, M. J., & Ihm, S. K. (2012). Ceria-zirconia mixed oxide prepared by continuous hydrothermal synthesis in supercritical water as catalyst support. *Catalysis Today*, 185(1), 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.08.018>
- Kooti, M., & Sedeh, A. N. (2013). Synthesis and Characterization of NiFe₂O₄ Magnetic Nanoparticles by Combustion Method. *Journal of Materials Science & Technology*, 29(1), 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2012.11.016>
- Kulkarni, S. D., Kumbar, S. M., Menon, S. G., Choudhari, K. S., & Santhosh, C. (2017). Novel magnetically separable Fe₃O₄@ZnO core-shell nanocomposite for UV and visible light photocatalysis. *Advanced Science Letters*, 23(3), 1724–1729. <https://doi.org/10.1166/asl.2017.8484>
- Kumar, N., Chauhan, N. S., Mittal, A., & Sharma, S. (2018). TiO₂ and its composites as promising biomaterials: a review. *BioMetals*, 31(2), 147–159. <https://doi.org/10.1007/s10534-018-0078-6>
- Kumari, V., Mittal, A., Jindal, J., Yadav, S., & Kumar, N. (2019). S-, N- and C-doped ZnO as semiconductor photocatalysts: A review. *Frontiers of Materials Science*, 13(1). <https://doi.org/10.1007/s11706-019-0453-4>
- Kwon, Y. E., Kim, J. K., Kim, Y. ju, Kim, J. G., & Kim, Y. J. (2019). Development of SEM and STEM-in-SEM grid holders for EDS analysis and their applications to apatite phases. *Journal of Analytical Science and Technology*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40543-019-0186-0>
- Kyzas, G. Z., & Matis, K. A. (2018). Flotation in water and wastewater treatment.

Processes, 6(8). <https://doi.org/10.3390/pr6080116>

- Lam, S. M., Sin, J. C., Abdullah, A. Z., & Mohamed, A. R. (2012). Degradation of wastewaters containing organic dyes photocatalysed by zinc oxide: A review. *Desalination and Water Treatment*, 41(1–3), 131–169. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.664698>
- Laurent, S., Forge, D., Port, M., Roch, A., Robic, C., Vander Elst, L., & Muller, R. N. (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: Synthesis, stabilization, vectorization, physicochemical characterizations and biological applications. *Chemical Reviews*, 108(6), 2064–2110. <https://doi.org/10.1021/cr068445e>
- Lee, K. M., Lai, C. W., Ngai, K. S., & Juan, J. C. (2016). Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: A review. In *Water Research* (Vol. 88). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.045>
- Lestari, J., Fahyuan, H. D., & Ngatijo, N. (2018). Pengaruh Doping Al Terhadap TiO₂ Sebagai Pendegradasi Limbah Tekstil Metyelene Blue. *Journal Online of Physics*, 3(2), 15–20. <https://doi.org/10.22437/jop.v3i2.5147>
- Li, B., Liu, T., Wang, Y., & Wang, Z. (2012). ZnO/graphene-oxide nanocomposite with remarkably enhanced visible-light-driven photocatalytic performance. *Journal of Colloid and Interface Science*, 377(1), 114–121. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.03.060>
- Liang, S., Xiao, K., Mo, Y., & Huang, X. (2012). A novel ZnO nanoparticle blended polyvinylidene fluoride membrane for anti-irreversible fouling. *Journal of Membrane Science*, 394–395, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.040>
- Ling, M. M., Wang, K. Y., & Chung, T. S. (2010). Highly water-soluble magnetic nanoparticles as novel draw solutes in forward osmosis for water reuse. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 49(12), 5869–5876. <https://doi.org/10.1021/ie100438x>
- Liu, J., Wang, L., Wang, J., & Zhang, L. (2013). Simple solvothermal synthesis of hydrophobic magnetic monodispersed Fe₃O₄ nanoparticles. *Materials Research Bulletin*, 48(2), 416–421. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2012.10.060>
- Lu, A. H., Salabas, E. L., & Schüth, F. (2007). Magnetic nanoparticles: Synthesis, protection, functionalization, and application. *Angewandte Chemie - International Edition*, 46(8), 1222–1244. <https://doi.org/10.1002/anie.200602866>
- Lu, H. M., Zheng, W. T., & Jiang, Q. (2007). Saturation magnetization of

- ferromagnetic and ferrimagnetic nanocrystals at room temperature. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(2), 320–325. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/2/006>
- Ma, H., Han, J., Fu, Y., Song, Y., Yu, C., & Dong, X. (2011). Synthesis of visible light responsive ZnO-ZnS/C photocatalyst by simple carbothermal reduction. *Applied Catalysis B: Environmental*, 102(3–4), 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.12.014>
- Ma, Z., & Liu, H. (2007). Synthesis and surface modification of magnetic particles for application in biotechnology and biomedicine. *China Particuology*, 5(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.cpart.2006.11.001>
- Manju, B. G., & Raji, P. (2018). Synthesis and magnetic properties of nano-sized Cu_{0.5}Ni_{0.5}Fe₂O₄ via citrate and aloe vera: A comparative study. *Ceramics International*, 44(7), 7329–7333. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.201>
- Mano, T., Nishimoto, S., Kameshima, Y., & Miyake, M. (2015). Water treatment efficacy of various metal oxide semiconductors for photocatalytic ozonation under UV and visible light irradiation. *Chemical Engineering Journal*, 264, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.11.088>
- Mehra, M., Sharma, T. R., & College, K. G. K. D. (2012). Photo catalytic degradation of two commercial dyes in aqueous phase using photo catalyst TiO₂. *Advances in Applied Science Research*, 3(2), 849–853.
- Mehrjouei, M., Müller, S., & Möller, D. (2015). A review on photocatalytic ozonation used for the treatment of water and wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 263, 209–219. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.10.112>
- Moradi, S., Taghavi Fardood, S., & Ramazani, A. (2018). Green syn thesis and characterization of magnetic NiFe₂O₄@ZnO nanocomposite and its application for photocatalytic degradation of organic dyes. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(16), 14151–14160. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9548-4>
- Mufti, N., Maryam, S., Sari Puspita Dewi, A., Taufiq, A., Kurniawan, R., & Sunaryono. (2019). The effect of Zn-acetate molar variation on phase formation and photocatalytic degradation activity of Fe₃O₄/ZnO core-shell nanocomposite. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 694(1), 49–59. <https://doi.org/10.1080/15421406.2020.1723896>
- Mulvaney, P., Liz-Marzán, L. M., Giersig, M., & Ung, T. (2000). Silica encapsulation of quantum dots and metal clusters. *Journal of Materials Chemistry*, 10(6), 1259–1270. <https://doi.org/10.1039/b000136h>

- Nurlela, N. (2018). Pengolahan Air Limbah Pewarna Sintetis Untuk Menurunkan Kadar Cod Dan Warna Dengan Metode Adsorpsi. *Jurnal Redoks*, 1(2), 1. <https://doi.org/10.31851/redoks.v1i2.2023>
- Obeid, L., Bée, A., Talbot, D., Jaafar, S. Ben, Dupuis, V., Abramson, S., Cabuil, V., & Welschbillig, M. (2013). Chitosan/maghemite composite: A magsorbent for the adsorption of methyl orange. *Journal of Colloid and Interface Science*, 410, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.07.057>
- Ohno, T., Akiyoshi, M., Umebayashi, T., Asai, K., Mitsui, T., & Matsumura, M. (2004). Preparation of S-doped TiO₂ photocatalysts and their photocatalytic activities under visible light. *Applied Catalysis A: General*, 265(1), 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2004.01.007>
- Ohtani, B. (2011). Photocatalysis by inorganic solid materials: Revisiting its definition, concepts, and experimental procedures. In *Advances in Inorganic Chemistry* (1st ed., Vol. 63). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385904-4.00001-9>
- Ohtani, B. (2013). Titania photocatalysis beyond recombination: A critical review. *Catalysts*, 3(4), 942–953. <https://doi.org/10.3390/catal3040942>
- Okoli, C., Sanchez-Dominguez, M., Boutonnet, M., Järås, S., Civera, C., Solans, C., & Kuttuva, G. R. (2012). Comparison and functionalization study of microemulsion-prepared magnetic iron oxide nanoparticles. *Langmuir*, 28(22), 8479–8485. <https://doi.org/10.1021/la300599q>
- Ong, C. B., Ng, L. Y., & Mohammad, A. W. (2018). A review of ZnO nanoparticles as solar photocatalysts: Synthesis, mechanisms and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(March 2017), 536–551. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.020>
- Osman, H., Su, Z., Ma, X., Liu, S., Liu, X., & Abduwayit, D. (2016). Synthesis of ZnO/C nanocomposites with enhanced visible light photocatalytic activity. *Ceramics International*, 42(8), 10237–10241. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.147>
- Panthi, G., Park, M., Kim, H. Y., Lee, S. Y., & Park, S. J. (2015). Electrospun ZnO hybrid nanofibers for photodegradation of wastewater containing organic dyes: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.03.044>
- Paramesh, D., Kumar, K. V., & Reddy, P. V. (2016). Influence of nickel addition on structural properties of aluminium substituted Ni-Zn ferrite nanoparticles. *Processing and Application of Ceramics*, 10(3), 161–167. <https://doi.org/10.2298/PAC1603161P>

- Pasinszki, T., & Krebsz, M. (2020). Synthesis and application of zero-valent iron nanoparticles in water treatment, environmental remediation, catalysis, and their biological effects. *Nanomaterials*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/nano10050917>
- Patil, A. B., Patil, K. R., & Pardeshi, S. K. (2010). Ecofriendly synthesis and solar photocatalytic activity of S-doped ZnO. *Journal of Hazardous Materials*, *183*(1–3), 315–323. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.026>
- Pourbabaee, A. A., Malekzadeh, F., Sarbolouki, M. N., & Mohajeri, A. (2008). Decolorization of Methyl Orange (as a Model Azo Dye) by the Newly Discovered Bacillus sp. *Modern Multidisciplinary Applied Microbiology: Exploiting Microbes and Their Interactions*, *24*(3), 494–499. <https://doi.org/10.1002/9783527611904.ch87>
- Primantoro A.Y. (2023). "Slow Fashion" Dapat Kurangi Limbah Industri Tekstil - Kompas (p. 5). Kompas. <https://www.kompas.id/baca/humaniora/2023/04/16/gaya-hidup-alternatif-dapat-mengurangi-dampak-lingkungan>
- Qiu, H., Lv, L., Pan, B. C., Zhang, Q. J., Zhang, W. M., & Zhang, Q. X. (2009). Critical review in adsorption kinetic models. *Journal of Zhejiang University: Science A*, *10*(5), 716–724. <https://doi.org/10.1631/jzus.A0820524>
- Rahmayeni, Arief, S., Jamarun, N., Emriadi, & Stiadi, Y. (2017). Magnetically separable ZnO-MnFe₂O₄ nanocomposites synthesized in organic-free media for dye degradation under natural sunlight. *Oriental Journal of Chemistry*, *33*(6), 2758–2765. <https://doi.org/10.13005/ojc/330608>
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, Pub. L. No. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia No. P.16 /MENLHK /SETJEN /KUM.1 /4/2019, 1 (2019). http://jdih.menlhk.co.id/uploads/files/P_16-2019_BAKU_MUTU_AIR_LIMBAH_menlhk_07162019080451.pdf
- Rueda-Marquez, J. J., Levchuk, I., Fernández Ibañez, P., & Sillanpää, M. (2020). A critical review on application of photocatalysis for toxicity reduction of real wastewaters. *Journal of Cleaner Production*, *258*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120694>
- Ruxandra, O., Serdaru, I., Andronescu, E., & Trus, R. (2015). *Comptes Rendus Chimie Influence of the size and the morphology of ZnO nanoparticles on cell viability*. *18*, 1335–1343. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.08.005>
- Sagadevan, S., Chowdhury, Z. Z., & Rafique, R. F. (2018). Preparation and characterization of nickel ferrite nanoparticles via co-precipitation method. *Materials Research*, *21*(2), 21–25. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0533>

- Sahoo, T. R., & Prelot, B. (2020). Adsorption processes for the removal of contaminants from wastewater. In *Nanomaterials for the Detection and Removal of Wastewater Pollutants*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818489-9.00007-4>
- Said, B., Souad M', R., & Ahmed, E. H. (2020). A review on classifications, recent synthesis and applications of textile dyes. *Inorganic Chemistry Communications, January 2017*, 107891.
- Salam, A., Agustina, T. E., & Mohadi, R. (2018). Photocatalytic degradation of procion red synthetic dye using ZnO-Zeolite composites. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 7(8), 54–59.
- Schrittwieser, S., Reichinger, D., & Schotter, J. (2017). Applications, surface modification and functionalization of Nickel nanorods. *Materials*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/ma11010045>
- Shah, M. P., Patel, K. A., & Darji, A. M. (2013). Microbial Degradation and Decolorization of Methyl Orange Dye by an Application of Pseudomonas Spp. ETL-1982. *International Journal of Environmental Bioremediation & Biodegradation*, 1(1), 26–36. <https://doi.org/10.12691/ijebb-1-1-5>
- Shaikh, S. F., Ubaidullah, M., Mane, R. S., & Al-Enizi, A. M. (2020). Types, Synthesis methods and applications of ferrites. In *Spinel Ferrite Nanostructures for Energy Storage Devices*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819237-5.00004-3>
- Shekofteh-Gohari, M., Habibi-Yangjeh, A., Abitorabi, M., & Rouhi, A. (2018). Magnetically separable nanocomposites based on ZnO and their applications in photocatalytic processes: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(10–12), 806–857. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1487227>
- Shi, J., Zheng, J., Wu, P., & Ji, X. (2008). Immobilization of TiO₂ films on activated carbon fiber and their photocatalytic degradation properties for dye compounds with different molecular size. *Catalysis Communications*, 9(9), 1846–1850. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2008.02.018>
- Shojaie, A., Fattahi, M., Jorfi, S., & Ghasemi, B. (2018). Synthesis and evaluations of Fe₃O₄-TiO₂-Ag nanocomposites for photocatalytic degradation of 4-chlorophenol (4-CP): effect of Ag and Fe compositions. *International Journal of Industrial Chemistry*, 9(2), 141–151. <https://doi.org/10.1007/s40090-018-0145-4>
- Shoueir, K., El-Sheshtawy, H., Misbah, M., El-Hosainy, H., El-Mehasseb, I., & El-Kemary, M. (2018). Fenton-like nanocatalyst for photodegradation of methylene blue under visible light activated by hybrid green

- DNSA@Chitosan@MnFe₂O₄. *Carbohydrate Polymers*, 197, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.05.076>
- Singh, R., Ladol, J., Khajuria, H., & Sheikh, H. N. (2017). Nitrogen doped graphene nickel ferrite magnetic photocatalyst for the visible light degradation of methylene blue. In *Acta Chimica Slovenica*. <https://doi.org/10.17344/acsi.2016.2995>
- Siong, C. T., Daik, R., & Hamid, M. A. A. (2014). Thermally conductive of nano fluid from surfactant doped polyaniline nanoparticle and deep eutectic ionic liquid. *AIP Conference Proceedings*, 1614, 381–385. <https://doi.org/10.1063/1.4895227>
- Sivasankaran, S., & Kishor Kumar, M. J. (2015). A novel sonochemical synthesis of nano-size silicon nitride and titanium carbide. *Ceramics International*, 41(9), 11301–11305. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.05.087>
- Sonu, Dutta, V., Sharma, S., Raizada, P., Hosseini-Bandegharai, A., Kumar Gupta, V., & Singh, P. (2019). Review on augmentation in photocatalytic activity of CoFe₂O₄ via heterojunction formation for photocatalysis of organic pollutants in water. *Journal of Saudi Chemical Society*, 23(8), 1119–1136. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2019.07.003>
- Su, Y., Yang, Y., Zhang, H., Xie, Y., Wu, Z., Jiang, Y., Fukata, N., Bando, Y., & Wang, Z. L. (2013). Enhanced photodegradation of methyl orange with TiO₂ nanoparticles using a triboelectric nanogenerator. *Nanotechnology*, 24(29). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/24/29/295401>
- Subash, B., Krishnakumar, B., Swaminathan, M., & Shanthi, M. (2013). Highly efficient, solar active, and reusable photocatalyst: Zr-loaded Ag-ZnO for reactive red 120 dye degradation with synergistic effect and dye-sensitized mechanism. *Langmuir*, 29(3), 939–949. <https://doi.org/10.1021/la303842c>
- Tai, Y., Wang, L., Gao, J., Amer, W. A., Ding, W., & Yu, H. (2011). Synthesis of Fe₃O₄@poly(methylmethacrylate-co-divinylbenzene) magnetic porous microspheres and their application in the separation of phenol from aqueous solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 360(2), 731–738. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.04.096>
- Tajizadegan, H., Torabi, O., Heidary, A., Golabgir, M. H., & Jamshidi, A. (2016). Study of methyl orange adsorption properties on ZnO–Al₂O₃ nanocomposite adsorbent particles. *Desalination and Water Treatment*, 57(26), 12324–12334. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1049558>
- Tran, D. L., Le, V. H., Pham, H. L., Hoang, T. M. N., Nguyen, T. Q., Luong, T. T., Ha, P. T., & Nguyen, X. P. (2010). Biomedical and environmental applications of magnetic nanoparticles. *Advances in Natural Sciences:*

Nanoscience and Nanotechnology, 1(4). <https://doi.org/10.1088/2043-6262/1/4/045013>

- Ullah, H., Khan, I., Yamani, Z. H., & Qurashi, A. (2017). Sonochemical-driven ultrafast facile synthesis of SnO₂ nanoparticles: Growth mechanism structural electrical and hydrogen gas sensing properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 34, 484–490. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.025>
- Ullah, I., Ali, S., Hanif, M. A., & Shahid, S. A. (2012). Nanoscience for environmental remediation: A Review. *Ijcbcs*, 2, 60–77.
- Umpuch, C., & Sakaew, S. (2013). Removal of methyl orange from aqueous solutions by adsorption using chitosan intercalated montmorillonite. *Songklanakarinn Journal of Science and Technology*, 35(4), 451–459.
- Verma, N., Yadav, S., Marí, B., Mittal, A., & Jindal, J. (2018). Synthesis and Characterization of Coupled ZnO/SnO₂ Photocatalysts and Their Activity towards Degradation of Cibacron Red Dye. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 77(1), 1–7. <https://doi.org/10.1080/0371750X.2017.1417059>
- Vidal-Vidal, J., Rivas, J., & López-Quintela, M. A. (2006). Synthesis of monodisperse maghemite nanoparticles by the microemulsion method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 288(1–3), 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.04.027>
- Wan, J., Yao, Y., & Tang, G. (2007). Controlled-synthesis, characterization, and magnetic properties of Fe₃O₄ nanostructures. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 89(2), 529–532. <https://doi.org/10.1007/s00339-007-4107-5>
- Wang, D., Guo, Z., Peng, Y., & Yuan, W. (2015). Visible light induced photocatalytic overall water splitting over micro-SiC driven by the Z-scheme system. *Catalysis Communications*, 61, 53–56. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2014.12.008>
- Wang, L., Li, J., Wang, Y., Zhao, L., & Jiang, Q. (2012). Adsorption capability for Congo red on nanocrystalline MFe₂O₄ (M=Mn, Fe, Co, Ni) spinel ferrites. *Chemical Engineering Journal*, 181–182, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.088>
- Wang, L., Zhang, J., Zhao, R., Li, C., Li, Y., & Zhang, C. (2010). Adsorption of basic dyes on activated carbon prepared from Polygonum orientale Linn: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies. *Desalination*, 254(1–3), 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.012>
- Wang, Q., Lian, J., Ma, Q., Zhang, S., He, J., Zhong, J., Li, J., Huang, H., & Su,

- B. (2017). Preparation of carbon spheres supported CdS photocatalyst for enhancement its photocatalytic H₂ evolution. *Catalysis Today*, 281, 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.05.013>
- Wu, W., Hao, R., Liu, F., Su, X., & Hou, Y. (2013). Single-crystalline α -Fe₂O₃ nanostructures: Controlled synthesis and high-index plane-enhanced photodegradation by visible light. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(23), 6888–6894. <https://doi.org/10.1039/c3ta10886d>
- Xu, C., Cao, L., Su, G., Liu, W., Liu, H., Yu, Y., & Qu, X. (2010). Preparation of ZnO/Cu₂O compound photocatalyst and application in treating organic dyes. *Journal of Hazardous Materials*, 176(1–3), 807–813. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.11.106>
- Xu, J., Sun, J., Wang, Y., Sheng, J., Wang, F., & Sun, M. (2014). Application of iron magnetic nanoparticles in protein immobilization. *Molecules*, 19(8), 11465–11486. <https://doi.org/10.3390/molecules190811465>
- Xu, M., Li, Q., & Fan, H. (2014). Monodisperse nanostructured Fe₃O₄/ZnO microrods using for waste water treatment. *Advanced Powder Technology*, 25(6), 1715–1720. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.06.019>
- Yao, Y., Cai, Y., Lu, F., Wei, F., Wang, X., & Wang, S. (2014). Magnetic recoverable MnFe₂O₄ and MnFe₂O₄-graphene hybrid as heterogeneous catalysts of peroxy monosulfate activation for efficient degradation of aqueous organic pollutants. *Journal of Hazardous Materials*, 270, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.01.027>
- Yousef, R., Qiblawey, H., & El-Naas, M. H. (2020). Adsorption as a process for produced water treatment: A review. *Processes*, 8(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/pr8121657>
- Yuniar, Y., Mawarni, T., Hariani, P. L., Faizal, M., & Agustina, T. E. (2022). Degradation of Methylene Blue Dye Using ZnO / NiFe₂O₄ Photocatalyst Under Visible Light. *Atlantis Highlights in Engineering*, 9, 90–95.
- Zamani, A., Mahjoub, A., & Sadjadi, M. S. (2020). Synthesis and characterization of MnFe₂O₄@ZnO-GO and MnFe₂O₄@ZnO-rGO nanocomposites with evaluation of improved photocatalytic performance under sun light. *Journal of Nanostructures*, 10(3), 581–606. <https://doi.org/10.22052/JNS.2020.03.013>
- Zhang, L., Ran, J., Qiao, S. Z., & Jaroniec, M. (2019). Characterization of semiconductor photocatalysts. *Chemical Society Reviews*, 48(20), 5184–5206. <https://doi.org/10.1039/c9cs00172g>
- Zhang, N., Xie, S., Weng, B., & Xu, Y. J. (2016). Vertically aligned ZnO-

- Au@CdS core-shell nanorod arrays as an all-solid-state vectorial Z-scheme system for photocatalytic application. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(48), 18804–18814. <https://doi.org/10.1039/C6TA07845A>
- Zhang, S., Li, J., Wen, T., Xu, J., & Wang, X. (2013). Magnetic Fe₃O₄@NiO hierarchical structures: Preparation and their excellent As(v) and Cr(vi) removal capabilities. *RSC Advances*, 3(8), 2754–2764. <https://doi.org/10.1039/c2ra22495j>
- Zhao, P., Jian, M., Zhang, Q., Xu, R., Liu, R., Zhang, X., & Liu, H. (2019). A new paradigm of ultrathin 2D nanomaterial adsorbents in aqueous media: Graphene and GO, MoS₂, MXenes, and 2D MOFs. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(28), 16598–16621. <https://doi.org/10.1039/c9ta02935d>
- Zheng, Y. M., Li, N., & Zhang, W. De. (2012). Preparation of nanostructured microspheres of Zn-Mg-Al layered double hydroxides with high adsorption property. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 415, 195–201. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.10.014>
- Zhou, S. S., & Liu, S. Q. (2017). Photocatalytic reduction of CO₂ based on a CeO₂ photocatalyst loaded with imidazole fabricated N-doped graphene and Cu(II) as cocatalysts. *Photochemical and Photobiological Sciences*, 16(10), 1563–1569. <https://doi.org/10.1039/c7pp00211d>
- Zhou, Y. T., Nie, H. L., Branford-White, C., He, Z. Y., & Zhu, L. M. (2009). Removal of Cu²⁺ from aqueous solution by chitosan-coated magnetic nanoparticles modified with α -ketoglutaric acid. *Journal of Colloid and Interface Science*, 330(1), 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2008.10.026>
- Zhu, H. Y., Jiang, R., Fu, Y. Q., Li, R. R., Yao, J., & Jiang, S. T. (2016). Novel multifunctional NiFe₂O₄/ZnO hybrids for dye removal by adsorption, photocatalysis and magnetic separation. *Applied Surface Science*, 369, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.02.025>